



03-04 NİSAN / APRIL 2017

2. 3B BASKI TEKNOLOJİLERİ ULUSLARARASI SEMPOZYUMU(3B-BTS2017)
2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 3D PRINTING TECHNOLOGIES (3D-PTS2017)



Editor : Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

BİLDİRİLER KİTABI



Istanbul
GEDİK
Üniversitesi



Teesside
University



Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü

www.3dexpoturkey.com



03-04 NİSAN / APRIL 2017

2. 3B BASKI TEKNOLOJİLERİ ULUSLARARASI SEMPOZYUMU(3B-BTS2017)
2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 3D PRINTING TECHNOLOGIES (3D-PTS2017)



Editor : Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

BİLDİRİLER KİTABI



İstanbul
GEDİK
Üniversitesi



Teesside
University



Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü

www.3dexpoturkey.com

The 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 3D PRINTING TECHNOLOGIES (3D-PTS2017), 3-4 April 2017, Istanbul, Turkey.

The 2nd International Symposium on 3D Printing Technologies (3D-PTS2017), organized by DEMOS exhibition in cooperation with Karabuk University, Faculty of Technology, Department of Industrial Design Engineering, will be held on 3-4 April 2017 in Süleyman Demirel Culture Center, Istanbul, Turkey. (3d-pts2017) will be the next in the series of the annual conferences under the same name. The series aims to bring researchers and practitioners together to address contemporary and future issues on 3d Printing Technologies. We invite submissions for this year's conference themed "the 2nd International Symposium on 3d Printing Technologies (3d-pts2017)". Symposium topics of interest for submission include, but are not limited to the following:

MEDICAL APPLICATIONS FOR 3D PRINTING; (Bioprinting Tissues and Organs, Challenges in Building 3D Vascularized Organs, Customized Implants and Prostheses, Low-Cost Prosthetic Parts, Anatomical Models for Surgical Preparation, Synthetic skin, Cranium Replacement, Medical equipment, Bone, Tailor-made sensors, Personalized Drug Dosing, Unique Dosage Forms, Complex Drug-Release Profiles)

PROGRAM – CONTROL TECHNOLOGIES; (Control programs, Design Programs, 3D Scanning Technologies, DMLS Technologies, SLA Technologies, SLS Technologies, FDM Technologies, Digital Production Technologies, Other 3D Printer Technologies).

DESIGN, MODELLING AND ANALYSIS; (3D Printer Design, Extruder Design, Product Development, Ceramic Systems Design, Food Systems Design, Table System Design, Electronics Components, Mechanic Components, Standard Components)

MECHANICAL PROPERTIES OF FILAMENTS; (Polymer Materials, Flexible Materials, Bio Materials, Metallic Materials, Wood Materials, Composite Materials)

APPLICATION FIELDS; (Medical and Dental Applications, Soft Robotics Systems, Robot Gripper Systems, Building Applications, Die/Mold Applications, Architecture Applications, Models Applications, Prototype Applications, Visual Arts Applications, Textile Applications, Digital Factories)

Dental practices and materials, Soft robotics systems, Robot gripper systems, Architectural-model applications and materials, Industrial applications and materials, Rapid prototyping, Food applications and materials, Artistic practices and materials, Scanning methods and modeling

BU BİLDİRİLER KİTABINDAKİ ESERLERİN SORUMLULUĞU YAZARLARINA AİTTİR

Yayına Hazırlık
Ufuk AKSOY

ÖNSÖZ

Ülkemizin orta-yüksek gelir grubu ülkeler arasından çıkarak, yüksek gelir grubu ülkeler arasına girmesi, bilim ve teknoloji ile yenilik alanında yapılacak atılımlarla mümkün olacaktır. Kalkınma stratejimizin özünü; daha donanımlı, daha yenilikçi ve girişimci, bilgi üreten ve bunu yüksek katma değere dönüştüren insanımız ve işletmelerimiz oluşturmaktadır.

Bu doğrultuda, geleceğin teknolojisi olarak tanımlanan 3B yazıcı teknolojisine gereken önemin verilmesi büyük önem arz etmektedir.

Ürünün modellenmesi, yazdırılması ve nihai ürünün elde edilmesi şeklinde 3 ana grupta toplayabileceğimiz 3B yazıcı teknolojisi, bilgisayar ortamındaki 3 boyutlu karmaşık şeklin gerçek ortamdaki nesneye kusursuza yakın doğrulukta ve yüksek hızda dönüşmesine olanak sağlamaktadır.

Ülkemizde birçok firma ve akademisyen 3B yazıcıların önemini kavrayarak çalışmalarını bu eksene kaydırmıştır. 3B yazıcılar ile üretim mekândan bağımsız hale gelmiş nesnenin üretimi sürecinde insan faktörünün asgari seviyede olması da hata oranının en aza indirgenmesine imkân tanımıştır. Ayrıca, malzemelerin birleşiminden ürünün nihai hale bürünmesine kadar geçen süreçte herhangi bir atığın ortaya çıkmaması bahse konu teknolojinin işlevselliğini ortaya koymaktadır.

Yapay organların üretilmeye başlandığı bu teknoloji ile hasta tarafından ihtiyaç duyulan nesne hastaya en yakın noktada, hastaya özel ve süratli bir şekilde üretililecek ve bu durum sağlık teknolojilerine çağ atlatacaktır. Diğer taraftan, mimariden gıda üretimine, eğlenceden sanayiye, otomotivden giyim sektörüne kadar hayatımızın hemen hemen her alanına etkili bir biçimde tesir edecektir.

Söz konusu teknolojinin dikkatle takip edilmesi ve geliştirilmesi ülkemizin geleceği açısından tarifi mümkün olmayan öneme sahiptir.

Bu sebeple; Ar-Ge, yenilik ve nitelikli işgücüne dayalı yüksek katma değerli mal üreten şirketlere sahip, orta ve yüksek teknoloji ürünlerde Avrasya'nın üretim merkezi haline gelmiş bir ülke olma vizyonu ile hareket eden ülkemizde, geleceğin teknolojisi 3B yazıcılara ilişkin bu önemli etkinliği düzenleyen ve katkıda bulunan herkese teşekkür eder, sempozyumun başarılı geçmesini dilerim.

Prof. Dr. Ersan ASLAN

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Müsteşarı

2. 3B BASKI TEKNOLOJİLERİ ULUSLARARASI SEMPOZYUMU (3B-BTS2017)

3-4 April 2017, Istanbul, Turkey.

2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON 3D PRINTING TECHNOLOGIES (3D-PTS2017)

Honour Committee

Dr. Ersan ASLAN	Undersecretary, Ministry of Science, Industry and Technology
Dr. Mehmet KARACA	Rector of Istanbul Technical University
Dr. Refik POLAT	Rector of Karabük University
Dr. M. Emin ARAT	Rector of Marmara University
Dr. İbrahim USLAN	Rector of Gazi University
Dr. Muhammet GÜVEN	Rector of Erciyes University
Dr. Berrak KURTULUŞ	Rector of İstanbul Gedik University

Organisation Committee

Dr. Kerim ÇETİNKAYA	Karabük University
Dr. Mustafa YAŞAR	Karabük University
Dr. Mustafa KURT	Marmara University
Dr. Gültekin ÇETİNER	Marmara University
Dr. Metin Orhan KAYA	İstanbul Technical University
Dr. Nnamdi Ekere	Wolverhampton University
Dr. Hüseyin Rıza BÖRKLÜ	Gazi University
Dr. Cem SİNANOĞLU	Erciyes University
Dr. Savaş DİLİBAL	İstanbul Gedik University
Dr. Emeka Amalu	Teesside University

Secretary

Rümeysa CEREN	Demos Fuarçılık
Ufuk AKSOY	Demos Fuarçılık
Esra AKGÜL	Erciyes University
Murat AYDIN	Karabük University
Mustafa AYDIN	Karabük University
Abdurrahim TEMİZ	Karabük University
Gülce KAYA	Karabük University
Oğulcan EREN	Gazi University
Çağrı ÇERÇİ	İstanbul Gedik University

Science Committee

Dr. Ola Harrysson	North Carolina State University, NC, USA
Gözde Sultan Peduk	North Carolina State University, NC, USA
Dr. Mohammad Elahinia	University of Toledo, Ohio USA
Dr. Arif ÖZKAN	Düzce University
Dr. Ahmet ÖZKURT	Dokuz Eylül University
Dr. Hasan ÖZTÜRK	Dokuz Eylül University
Dr. Murat AKDAĞ	Dokuz Eylül University
Dr. Vasıf HASIRCI	Middle East Technical University
Dr. Nesrin HASIRCI	Middle East Technical University
Dr. Serdar BİROĞUL	Düzce University

Dr. Bedri TUÇ	Başkent University
Dr. Cemal ÖZCAN	Karabük University
Dr. Erkan LİKOS	Ondokuz Mayıs University
Dr. Zeki KIRAL	Dokuz Eylül University
Dr. Özgür YILMAZEL	Anadolu University
Dr. David HUGHES	Teesside University United Kingdom
Dr. Kristina BLIZNAKOVA	Technical University of Varna
Dr. H. Kürşad SEZER	Gazi University
Dr. Leyla TÜRKER ŞENER	İstanbul University
Dr. Hatice EVLEN	Karabük University
Dr. İbrahim KADI	Karabük University
Dr. Onyemaechi V. EKECHUKWU	University of Nigeria Nsukka
Dr. Muhammet UZUNTARLA	Bülent Ecevit University
Dr. Daqing GUO	University of Electronic Science and Technology China
Dr. Mustafa YASAR	Karabük University
Dr. Nnamdi EKERE	Wolverhampton University
Dr. Ender YILDIRIM	Çankaya University
Dr. Emeka Amalu	Teesside University
Dr. Fuat KARTAL	Kastamonu University
Dr. Arif UZUN	Kastamonu University
Dr. Özkan ÖZ	Karabük University
Dr. Suat ALTUN	Karabük University
Dr. Tahsin Tecelli ÖPÖZ	Liverpool John Moores University (UK)
Dr. Salman NİSAR	National University of Sciences & Technology, Pakistan
Dr. Cemal AKAY	Ege University
Dr. Candan EFEOĞLU	Ege University
Dr. Serap ÇELEN	Ege University
Dr. Raşit ESEN	Karabük University
Dr. M. Cengiz KAYACAN	Süleyman Demirel University
Dr. Burhan DUMAN	Süleyman Demirel University
Dr. Mustafa AYDIN	Dumlupınar University
Dr. Mustafa BOZDEMİR	Kırıkkale Üniversitesi
Dr. Nuri SEYMAN	Kırıkkale Üniversitesi
Dr. Afşin Alper CERİT	Erciyes University
Dr. Ahmet CAN	Necmettin Erbakan University
Dr. Arif GÖK	Amasya University
Dr. Mehmet KARA	Amasya University
Dr. Barış BULDUM	Mersin University
Dr. Bilçen MUTLU	Marmara University
Dr. Bülent KAYA	Erciyes University
Dr. Derya HAROĞLU	Erciyes University
Dr. İhsan TOKTAŞ	Yıldırım Beyazıt University
Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN	Trakya University
Dr. Süleyman NEŞELİ	Selçuk University
Dr. Salih ÖZER	Muş Alparslan University
Dr. Fatma Nazlı SARI	Erciyes University
Dr. Savaş DİLİBAL	İstanbul Gedik University
Dr. Haydar ŞAHİN	İstanbul Gedik University
Dr. Halime KENAR	Kocaeli University
Dr. Pınar Yılğör HURİ	Ankara University
Dr. Bahattin KOÇ	Sabancı University
Dr. Serdar KÜÇÜK	Kocaeli University
Dr. Nermin DEMİRKOL	Kocaeli University
Dr. Sinan GÜVEN	Dokuz Eylül University
Dr. Ozan KARAMAN	İzmir Katip Çelebi University
Dr. Özgün BAŞER	İzmir Katip Çelebi University
Dr. Sezai Alper TEKİN	Erciyes University
Dr. Ünal KURT	Amasya University
Dr. Bülent Nafi ÖRNEK	Amasya University
Dr. Vedat TAŞKIN	Trakya University

Dr. Ramazan YAMAN	Balıkesir University
Dr. Davut AKDAŞ	Balıkesir University
Dr. Yılmaz GÜR	Balıkesir University
Doç. M.Sevtap AYTUĞ	Gelişim University
Dr. Hesna Nursevin ÖZTOP	Cumhuriyet University
Dr. Dursun SARAYDIN	Cumhuriyet University
Dr. Kadir GÖK	Celal Bayar University
Dr. Ahmet Murat PINAR	Celal Bayar University
Dr. İhsan Hakan SELVİ	Sakarya University
Dr. Osman İYİBİLGİN	Sakarya University
Dr. Atakan AKAR	Çukurova University
Dr. Murat MAYDA	Karamanoglu Mehmetbey University
Dr. Ali AKDAĞLI	Mersin University
Dr. İskender ÖZKUL	Aksaray University
Dr. Tuncay ŞİMŞEK	Hacettepe University
Dr. Numan ÇELEBİ	Sakarya University
Dr. Mustafa KILIÇ	Adana Science and Technology University
Dr.Cem EMEKSİZ	Gaziosmanpaşa University
Dr.Erkan DURSUN	Marmara University
Dr.Turan ŞİŞMAN	Haliç University
Dr. İsmail ŞAHİN	Gazi University
Dr. M. Tolga ÖZKAN	Gazi University
Dr. Abdullah TOGAY	Gazi University
Dr. Serkan GÜNEŞ	Gazi University
Dr. Binnur SAĞBAŞ	Yıldız Technical University
Dr. Cem Bülent ÜSTÜNDAĞ	Yıldız Technical University
Dr. Mustafa ASLAN	Karadeniz Technical University
Dr. Ahu ÇELEBİ	Celal Bayar University
Dr. Koray ÖZSOY	Süleyman Demirel University
Dr. Murat DİLMEÇ	Necmettin Erbakan University

CONTENTS / İÇİNDEKİLER

Comparing the Printing Parameters of Food Material in Cartesian Type 3D Printers with Screw Transfer Systems	
Vidalı Transfer Sistemlerine Sahip Kartezyen Tipi 3B Yazıcılarda Gıda Malzemesi Yazdırma Parametrelerinin Karşılaştırılması	
<i>Gülce KAYA , Kerim ÇETİNKAYA</i>	16
Current 3D Dimensional Printing Technologies Used In Scaffold Design In Tissue Engineering	
Doku Mühendisliğinde Doku İskelesi Tasarımında Kullanılan Güncel 3B Yazdırma Teknolojileri	
<i>B. Çotur, H.K.Sezer</i>	25
Determination of Cross Sectional Geometries of Beams According to Tension and Compression Strength Which 3D Printed With the Same Amount of Filament	
Eşit Miktarda Filament Kullanımı İle 3 Boyutlu Baskısı Yapılacak Ankastre Kirişlerin Çekme/Basma Mukavemetine Göre Kesit Geometrilerinin Belirlenmesi	
<i>Murat Tolga ÖZKAN, Hüseyin Alp ÇETİNDAG, İhsan TOKTAŞ</i>	38
Investigation of The Effect Of Open And Closed System Design On Product Strength in 3D Printers	
Açık Ve Kapalı Sistem Tasarımının 3B Yazıcılarda Parça Mukavemetine Etkisinin İncelenmesi	
<i>Gülçin EREL, Hatice EVLEN Elif YILMAZ</i>	48
3D Bioprinting Of Anatomically-Shaped Bone	
3B Biyobaskı İle Anatomik Şekli Kemik Dokusu Üretimi	
<i>Pınar YILGÖR HURİ</i>	60
Optimization Of Cross Sectional Geometry Of 3D Printed Beams According To Pure Bending Strength With The Same Amount Of Filament	
3 Boyutlu Baskısı Yapılacak Ankastre Kirişlerin Eşit Miktarda Filament Kullanımı İle Eğilme Mukavemetine Göre Kesit Geometrisi Optimizasyonu	
<i>Hüseyin Alp ÇETİNDAG, İhsan TOKTAŞ, Murat Tolga ÖZKAN</i>	63
2 Different Three Dimensional Bio Printer Design, Prototype, Manufacturing and Performance Comparison	
2 Farklı Üç Boyutlu Biyo Yazıcısı Tasarımı, Prototip İmalatı Ve Performanslarının Karşılaştırılması	
<i>H. Evlen, M. Rakanoğlu, C. Ünal, E. Eğin, S. Özkaya, , S. M. Yavuz</i>	73
Performance Of Cross Sectional Geometries Of Beams According To Buckling Strength Which Are 3D Printed With The Same Amount Of Filament	
Burkulma Mukavemetine Göre Eşit Miktarda Filament Kullanımı İle 3 Boyutlu Baskısı Yapılacak Ankastre Kirişlerin Kesit Geometri Biçimlerinin Performansı	
<i>İhsan TOKTAŞ, Murat Tolga ÖZKAN, Hüseyin Alp ÇETİNDAG</i>	81

**A New Design Methodology: A Different Approach To 3D Printing (3DP) Process: XD Partitio-
ning (XDP)**

**Yeni Bir Tasarım Metodolojisi: 3D Yazdırma (3DP) Prosesine Farklı Bir Yaklaşım: XD Bölümle-
me (XDP)**

Mustafa YURDAKUL, Serkan GÜNEŞ, Yusuf Tansel IÇ 90

**The Algorithm Development and Implementation for 3D Printers based on Adaptive PID
Controller**

**3 Boyutlu Yazıcılar için Uyarlamalı PID Kontrol Tabanlı Algoritma Geliştirilmesi ve Gerçeklen-
mesi**

Aytaç ALTAN, Rifat HACIOĞLU 100

Modelling and 3D Manufacturing of Material Crystal Structures for Engineering Education

Mühendislik Eğitimi İçin Malzeme Kristal Kafes Yapılarının Modellenmesi ve 3B Baskısı

Kutay AYDIN, Arif GÖK, Ferhat GÜL 109

**Influence of Fill Rates on The Mechanical Properties of Poly Lactic Acid (PLA) Specimen Pro-
duced By 3D Printing**

**3 Boyutlu Yazıcı İle Üretilen Polylaktikasit (PLA) Numunelerde Doluluk Oranlarının Mekanik
Özelliklere Etkisi**

Ahu ÇELEBİ, Süleyman DEMİRDAL, Murat AKBULUT 119

Reconstruction Of Damaged Gears Using Reverse Engineering Approach

Hasarlı Dişlilerin Tersine Mühendislik Yaklaşımıyla Yeniden Oluşturulması

İsmail ŞAHİN, Tolgahan ŞAHİN, Harun GÖKÇE, Oğulcan EREN 126

The Case Of Digital Design And Fabrication LAB In Product Design Education; Gazi DLAB

Ürün Tasarımı Eğitiminde Dijital Tasarım Ve Fabrikasyon Laboratuvarı Örneği; Gazi DLAB

Abdullah TOGAY, Serkan GÜNEŞ, Merve COŞKUN, Ebru GEDİK.....135

An Exploratory Study On The Use Of 3D Printing Technology In Product Design

Ürün Tasarımında 3B Baskı Teknolojisi Kullanımı Üzerine Keşfedici Bir Çalışma

Abdullah TOGAY, Ebru GEDİK 144

**The Applying Of 3d Printing Technology On Design And Prototyping Of A Circular Stapler Fol-
dable Anvil**

**Dairesel Zimba Katlanabilir Anvilinin Tasarım Ve Prototiplenmesinde 3d Baskı Teknolojilerinin
Uygulanması**

Mahmut Arıkan, Ahmet Can , Ahmet Samancı , Serdar Nuhoglu, Hüseyin Yılmaz, Mustafa Şahin.....152

3D Bioprinting of a Natural Polymer-Ceramic based composite Bio-Ink for Bone Tissue Engineering Applications

Kemik Doku Mühendisliği Uygulamalarında Kullanılabilecek Doğal Polimer-Seramik Temelli Kompozit Biyo Mürekkebin 3B Biyo-Basımı

L. Aydın, N. Demirkol, H. Kenar 162

Modeling Of Brain Vessel From Mr Images And 3D Printing

Mr Görüntülerinden Beyin Damarının Modellenmesi Ve 3 Boyutlu Baskısı

M. Kürşad ERBAŞ, G. Rabia AKTAŞ Sevdâ ŞANVER Eylül DEMİR, İhsan TOKTAŞ Oktay ALGI, Hakan OFLAZ 164

Determining Process Parameters Of Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Bench For Research And Development Purpose

Ar-Ge Amaçlı Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) Tezgâhı İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi

M. Cengiz KAYACAN Burhan DUMAN 170

Reproduction Of Silicone Molding Methods Of Produced Parts Three Dimensional Printing Technologies

Üç Boyutlu Baskı Teknolojileri İle Üretilmiş Parçaların Silikon Kalıplama Yöntemiyle Çoğaltılması

Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN, Zekeriya YERLİKAYA 186

Comparison Of Operating Costs Of PLA And ABS Produced Parts

PLA ve ABS İle Üretilmiş Parçaların Elektrik Tüketim Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN, Zekeriya YERLİKAYA 192

Structural Comparison Of Three-Dimensional Printer Applications Using Ceramic And Plastic Materials With Sensitivity Feature

Seramik Ve Plastik Malzeme Kullanılarak Yapılan Üç Boyutlu Yazıcı Uygulamalarının Hassasiyet Unsuru İle Yapısal Karşılaştırılması

Arif ÖZKAN, İrfan AKGÜL 197

4th Industrial Revolution And Turkey

4. Endüstri Devrimi Ve Türkiye

Mehmet Cengiz KAYACAN, Koray ÖZSOY, Özden KOR 203

Investigation Of Mechanical Properties Of Materials Printed In 3D Printers Using Carbon Fiber Reinforced Filaments

Karbon Fiber Takviyeli Filamentler Kullanarak 3 Boyutlu Yazıcıda Basılan Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Hüseyin KAYGISIZ, Hatice YAKUT PEKTÜRK, Polat TOPUZ 213

Investigation of the FDM process performance at different printing parameters**Farklı baskı parametrelerinde FDM işlem performansının incelenmesi***Ebubekir ÇANTI, Mustafa AYDIN, Ferhat YILDIRIM, Meltem GÜNAY, Bünyamin KAYA* 218**The Performance of Acetone Vapor Is Effected On Plastic Fabricated Parts Surfaces.****PLA Filament İle Üretilmiş Parça Yüzeylerine Aseton Buharının Pürüzlülüğe Etkisi***Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN, Zekeriya YERLİKAYA* 226**Dimensional Performance Analysis For Open Source 3D Printer****Açık Kaynak Kodlu 3B Yazıcı İçin Boyutsal Performans Analizi***Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN, Zekeriya YERLİKAYA* 234**Geometrical Tolerances For Additive Manufacturing: An Overview****Eklemeli İmalatta Geometrik Toleranslar: Genel Bakış***Binnur SAĞBAŞ, Aslı GÜNAY BULUTSUZ* 242**Orthoses Production with Rapid Prototyping Approach: A Literatur Review****Hızlı Prototipleme Yaklaşımı ile Ortez üretimi: Kaynak Araştırması***İsmail ŞAHİN, M. İ. SARI, Tolgahan ŞAHİN* 249**Savonius Turbine Rotor Design Produced By 3D Printer****3B Yazıcı İle Üretilen Savonius Türbin Kanadı Tasarımı***Kaan ASLAN, Süleyman Çınar ÇAĞAN, Berat Barış BULDUM* 259**Investigation of 3D Printers For Micro-Scale Producing****Mikro Boyutta Üretim Yapan 3B Yazıcıların İncelenmesi***Süleyman Çınar ÇAĞAN, Kaan ASLAN, Berat Barış BULDUM* 267**Investigation Of 3D Printer By Using Mks Sbase V 1.3 In Terms Of Control On The Internet****3B Yazıcının Mks Sbase V 1.3 Kullanılarak İnternet Üzerinden Kontrolünün İncelenmesi***Eser ÖZENGİZ, Seyfettin GÜREL, Sezai Alper TEKİN* 276**Multi-Filament Holder Design for 3D Printers****3B Yazıcılar İçin Çoklu Filament Tutucu Tasarımı***Mustafa BOZDEMİR* 282**User-Specific Pistol Grip Design With 3D Printers****3B Yazıcılarla Kullanıcıya Özel Silah Kabzası Tasarımı***Mustafa BOZDEMİR* 289**Plastic Products Strengthening Techniques In FDM Type 3D Printers****FDM Tip 3B Yazıcılarda Plastik Ürünleri Güçlendirme Teknikleri***Mustafa BOZDEMİR* 296**Smart Printing Cabin Design For 3D Printers****Üç Boyutlu Yazıcılar İçin Akıllı Baskı Kabini Tasarımı***Mustafa BOZDEMİR* 303

Solder Printing with Cartesian 3D Printers

Kartezyen 3B Yazıcılarda Lehim Yazdırma

Ecem Tuğçe ÖZBEK, Mustafa AYDIN, Begüm ERTÜRK, Hatice EVLEN 311

3D Printing for Tissue Engineering Applications

Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin 3D Baskı

Askican HACIOĞLU, Hakan YILMAZER, Cem Bülent USTUNDAG.....317

Design and Production Of 3D Ceramic Printer with Screw Extruder

3 Boyutlu Vidalı Seramik Yazıcı Tasarımı Ve Prototip Üretimi

Bahtınur CEYLAN, Murat AYDIN, Deniz KANTAR, Hatice EVLEN 328

Design And Production Of 3D Ceramic Printer With Compressor

3B Kompresörlü Seramik Yazıcı Tasarımı Ve Prototip Üretimi

Çiğdem CEBECİ, Murat AYDIN, Fatih Huzeyfe ÖZTÜRK, Uğur CAH, Hatice EVLEN 337

From 3D Print-Aided Design to Modern Manufacturing Methods: An Investigation for a Centrifugal Pump

3B Yazıcı Destekli Tasarımdan Modern Üretim Teknolojilerine: Santrifüj Pompa Araştırması

Serap ÇELEN 345

Use Of Composite Materials On 3 Dimensional Printers

3 Boyutlu Yazıcılarda Kompozit Malzemelerin Kullanılması

Burak Emre YAPANMIŞ, Berat Barış BULDUM, İbrahim SEVİM 351

Production and Characterization of Composite Filaments for FDM Printing

FDM Baskı için Kompozit Filamentlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Ebubekir ÇANTI, Mustafa AYDIN, Ferhat YILDIRIM 361

Multi-Extruder Method, Development And Educational Contribution Three-Dimensional Printers

Üç Boyutlu Yazıcılarda Çoklu-Ekstrüder Yöntemi, Geliştirilmesi ve Eğitime Katkısı

Mehmet Fatih UÇAR, Mustafa YAŞAR 369

Determination Of Thickness Distributions Of Sheet Metal Parts 3D Scanning Method

3B Tarama Yöntemiyle Sac Metal Parçaların Kalınlık Dağılımlarının Belirlenmesi

Murat DİLMEÇ, Fahrettin ÖZTÜRK, Hüseyin Selçuk HALKACI 376

Investigation Of Effect Of Layer Thickness And Fan Speed On Mechanical, Surface And Microscopic Properties Of 3D Printed ABS Polymers

3 Boyutlu Yazıcı İle Üretilen ABS Polimerlerin Mekanik, Yüzey Ve Mikroskopik Özellikleri Üzerine Katman Kalınlığı Ve Fan Hızı Etkisinin İncelenmesi

Mustafa ASLAN, Ümit ALVER, Onur GÜLER, Kutay CAVA 383

Comparison of the Production Processes of Nickel-Titanium Shape Memory Alloy through Additive Manufacturing

Katmanlı İmalatla Üretilen Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşımların Üretim Proseslerinin Karşılaştırılması

Peduk G.S.A., Dilibal S., Harrysson O., Özbek S. 391

A New Design Procedure Model For Manufacturing Based On Reverse Engineering Tersine Mühendislik Yaklaşımına Dayalı Yeni Bir İmalat İçin Tasarım İşlem Modeli <i>Tamer TÜRKÜCÜ, H. Rıza BÖRKLÜ</i>	400
Analysis of Parameters Required to Produce Flexible Product with Polymeric Material in Additive Manufacturing Technology Katmanlı İmalat Teknolojisinde Polimerik Malzeme İle Esnek Ürün Elde Edilmesi İçin Gerekli Parametrelerin Analizi <i>Elbaba Ö., Sezer S., Şahin H., Dilibal S.,</i>	411
Applications Of Three-Dimensional Printers By The Catalytic Converters Used In Ceramic Parts The Automotive Sector Üç Boyutlu Yazıcıların Otomotiv Sektöründe Kullanılan Katalitik Konvertörlerin Seramik Kısımlarındaki Uygulamaları <i>Edanur BALI, Berat Barış BULDUM</i>	417
Additive Manufacturing Of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites By Fused Deposition Modelling: Effect Of Process Parameters On Tensile Properties Ergiyik Biriktirme Yöntemi İle Karbon Fiber Takviyeli Plastik Kompozitlerin Eklemeli İmalatı: İşlem Parametrelerinin Çekme Özelliklerine Etkisi <i>H. Kürşad SEZER, Oğulcan EREN, H. Rıza BÖRKLÜ</i>	424
An Overview Of The Developments Of Additive Manufacturing Eklemeli İmalattaki Gelişmelere Genel Bir Bakış <i>Ferhat BOZBUĞA, H. Rıza BÖRKLÜ</i>	434

Vidalı Transfer Sistemlerine Sahip Kartezyen Tipi 3B Yazıcılarda Gıda Malzemesi Yazdırma Parametrelerinin Karşılaştırılması

Gülce KAYA^a, Kerim ÇETİNKAYA^b

^aKarabük Üniversitesi , Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Karabük/TÜRKİYE

glcekaya@gmail.com

^bKarabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Karabük/TÜRKİYE

kcetinkaya@karabuk.edu.tr

Özet

Bu çalışmada yiyecek sektöründe kullanılmak üzere 2 nozullu kartezyen tipi ve tek nozullu Kartezyen tipi 3B yazıcı tasarımı ve prototipi yapılmıştır. Yazıcılarda pasta süsleme, pankek yazdırma ve çikolata yazdırma yapılabilir. Kontrol kartı olarak Arduino kullanılmıştır. Arayüz programı olarak Simplify 3D, Cura ve Repetier Host programları kullanılmaktadır. 2 nozullu kartezyen tipi 3B yazıcıda malzeme iletimi paslanmaz çelik malzemeden helezonik mil ile, tek nozullu kartezyen tipi 3B yazıcıda PowerABS malzemeden üretilmiş helezonik mil ile yapılmıştır. Yazdırma malzemeleri olarak çikolata, pasta süsleme malzemesi, kurabiye hamuru ve meyve aromalı yenilebilir jel malzemeler kullanılmıştır. 3B Yiyecek yazıcılarında üretilen gıdalar çeşitli malzeme karışım oranlarıyla denenmiştir. Aynı parametrelerde yazdırılan benzer ürünlerin zaman ve boyut parametreleri karşılaştırılmıştır. Malzeme yayılımını minimize etmek amacı ile optimum malzeme karışım oranının bulunması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: 3B Yiyecek yazıcısı, vidalı nozul

Comparing the Printing Parameters of Food Material in Cartesian Type 3D Printers with Screw Transfer Systems

Abstract

In this study, 2 nozzles of Cartesian type and single nozzle Cartesian type 3D printer were designed and prototyped for use in the food industry. The pie decorations, pancake prints and chocolate prints can be made in the printer. Arduino was used as a control card. Simplify 3D, Cura and Repetier Host programs are used as the interface program. 2 nozzles Cartesian type In the 3D printer, the material conveyance is made from the stainless steel material with the helical spindle and the single nozzle Cartesian type 3D printer with the helical spindle made of PowerABS material. Chocolate, cake decorating material, cookie dough and fruit flavored edible gel materials were used as printing materials. Foods produced in 3D food writers have been tested with various material mixture ratios. The time and size parameters of similar products printed at the same parameters were compared. It is aimed to minimize the material spread and to find the optimum material mixture ratio.

Key words: 3D Food Printer, Screw Type Nozzle

1.Giriş

Sanal ortamda tasarlanan 3 boyutlu nesnelerin katı forma geçirilmesi işlemine 3 boyutlu baskı denir ve bu işlemi gerçekleştiren cihazlara 3 boyutlu yazıcılar denir. Hızlı prototipleme (Additive Manufacturing) olarak bilinen bu teknoloji de farklı yöntemler ve farklı hammaddeler kullanılmaktadır. En yaygın kullanıma sahip olan üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi, bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu nesnenin bilgisayar ortamında katmanlara bölünmesi (STL formatına dönüştürülmesi) ve sonra katman katman inşa edilerek gerçek objeyi oluşturmasıdır [1].

3 boyutlu yazıcı teknolojileri birçok farklı teknolojiyi bir arada sunar. Bu teknolojiler, Stereolithography (SL), Fused Deposition Modelling (FDM), Shape Deposition Manufacturing (SDM), Selective Laser Sintering (SLS), Objet Polyjet, Multijet, ColorJet gibi teknolojilerdir [2]. Günümüzde en çok kullanılanı FDM yöntemidir, yani bilgisayarda 3 boyutlu modeli bulunan cismin 2 boyutlu katmanlar halinde yığıla-

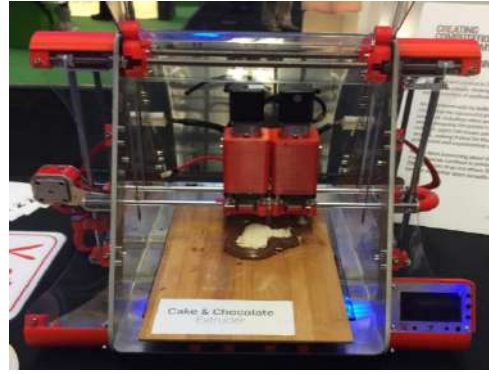
rak 3 boyutlu ürün elde edilmesidir. Bu teknolojiler de ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PLA (polylactic acid), metal, plastik, demir tozu gibi farklı malzemeler kullanılır [3].

Gıda Katmanlı Üretim (Food Layered Manufacturing) terimi, (Additive Manufacturing) eklemeli imalat işleminin gıda üretimine çevirisi olan yeni bir gıda üretim sürecini tanımlamak için kullanılmaktadır. Gıda Katmanlı Üretim, yeni yiyecek formları oluşturmak ve katı ve jöle içerikli gıdalar içinde özelleştirilmiş dokuları, renkleri ve lezzetleri yeni yollarla oluşturma potansiyeline sahiptir. Bir 3B gıda yazıcısı, ağırlıklı olarak viskoz malzemelerden (örneğin peynir, hamur, çikolata, jöle) ve toz haline getirilmiş maddelerden (örneğin şeker) elde edilen yenilebilir malzemeleri kullanarak parçaların yapımını sağlayan özel bir katkı maddesi imalatı sistemidir. Gıda uygulamaları için FDM, SL, 3DP ve PolyJet gibi çeşitli standart eklemeli imalat teknolojileri kullanılmıştır [4].

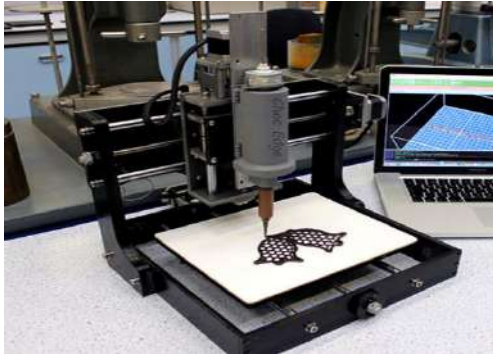
Örnek olarak 'Naturel Machines' den 'Foodini' (Şekil 1.a), ilk çikolata yazıcılarından olan 'Choc Creator', çok amaçlı üretim yapabilen 'Zmorph' (Şekil 1.b), kendi tasarladığımız jelibonları yememize olanak sağlayan 'Magic Candy Factory' (Şekil 1.c) gibi firmalar bu sektöre giriş yapmıştır ve 'FoodInk' (Şekil 1d) firması da İngiltere' de 3B yiyecek restoranını açarak bu sektörde bir ilke imza atmıştır [5-8].



a. Foodini [5]



b. ZMorph [6]



c. Choc Creator [7]



d. FoodInk [8]

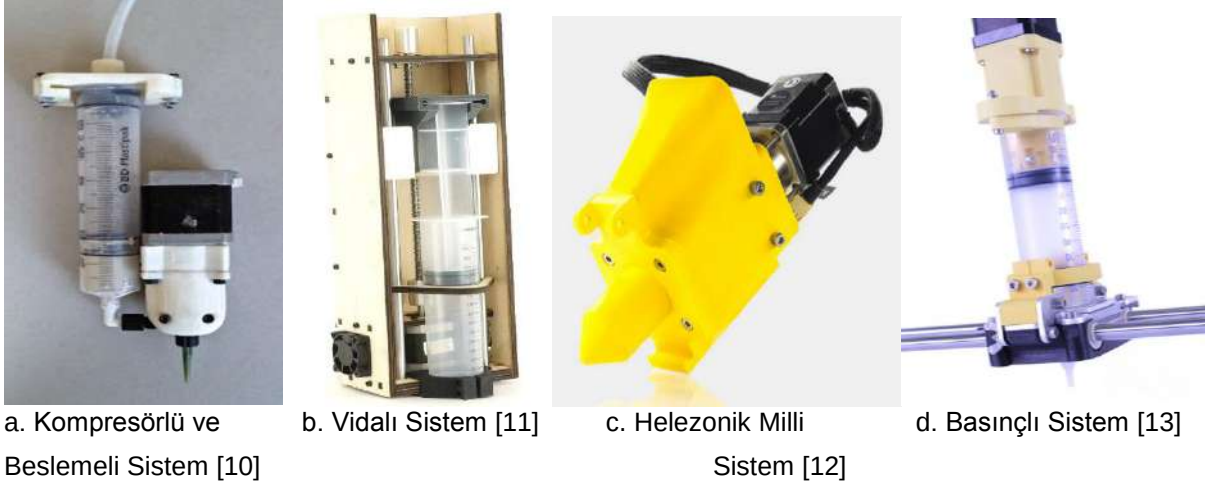
Şekil 1. Literatürdeki 3B Yiyecek Yazıcıları

3B gıda baskısı ile sağlanan faydalar görsel açıdan çekici gıdaların müşteri talebine göre özel tasarımı ve üretimi, özel öğütme ihtiyacı olan insanlar için gıdalar hazırlama, tasarım ve imalat süresi ve maliyetinde azalma ve personel becerilerine bağımlılığın azaltılması gibi sıralanabilir [9].

Bu çalışmada yiyecek sektöründe kullanılmak üzere 2 nozullu kartezyen tipi ve tek nozullu Kartezyen tipi 3B yazıcı tasarımı ve prototipi yapılmış ve gıda malzemesi yazdırma parametreleri karşılaştırılmıştır. Sistemlere göre en uygun gıda malzemeleri belirlenmiş, doluluk oranları ve kullanılan malzemeye göre yayılma parametreleri ölçülmüştür.

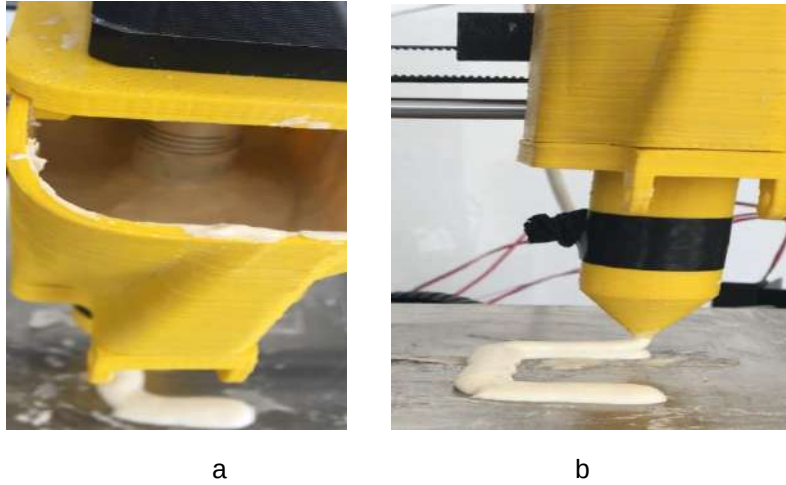
2. Materyal ve Metot

Günümüzde, 3 boyutlu yiyecek yazıcılarında kullanılan ekstrüzyon sistemleri vidalı ve basınçlı sistemlerdir. Bu sistemlerde silindirik pistonuna hareketi sağlamak için step motor veya kompresör kullanılmaktadır. Step motorlu sistemlerde piston hareketi için vidalı mil kullanılmaktadır. Milin dönüş hareketinin, piston kolunun doğrusal hareketine dönüşmesiyle malzemenin katmanlı yazdırılması sağlanmaktadır. Şekil 2'de 3B yiyecek yazıcılarında kullanılan basınçlı ve vidalı sistemler verilmiştir [10-13].



Şekil 2. Literatürdeki 3B Yiyecek Yazıcısı Ekstrüzyon Sistemleri

Tek nozullu Kartezyen 3B yiyecek yazıcı sisteminde malzeme çıkışı, step motorun esnek kaplinle bağlandığı helezonik, PowerABS' den üretilmiş mili tahrik etmesiyle gerçekleşir (Şekil 3.a-b) [14].



Şekil 3. Tek Nozullu 3B Yazıcı Ekstrüzyon Sistemi

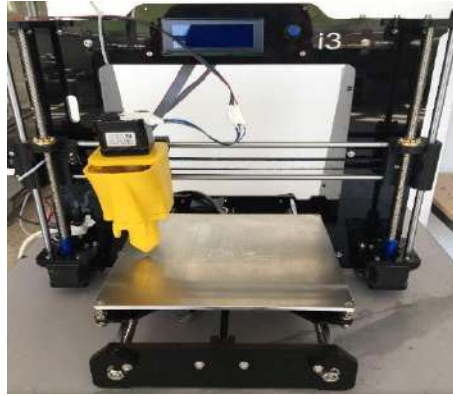
Çift Nozullu Kartezyen tipi 3B yiyecek yazıcısının çalışma prensibi aynıdır. Tek nozullu sistemdeki plastik helezon mil yerine paslanmaz çelikten helezon matkap ucu kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çift Nozullu 3B Yazıcı Ekstrüzyon Sistemi

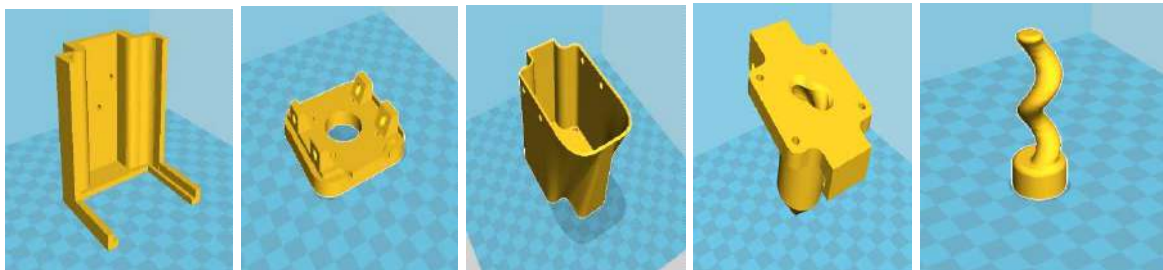
3.Tasarım ve Prototip

Tek nozullu 3B yiyecek yazıcı sistemi için Şekil 5.'te görülen Prusa i3 modeli 3 boyutlu yazıcı demonte olarak alınmış, montaj ve kurulumu yapılmıştır. Sistemle birlikte olan filament ekstruderi çıkartılmış ve yiyecek baskısı yapabilmek için hazne tasarımı ve prototipi yapılmıştır. Ekstruder vidalı transfer sistemi gibi çalışmakta olup vidalı mil step motor ile tahrik edilmektedir. Sistemde Arduino Mega 2560 mikrodeneleyici kart ve açık kaynaklı Marlin yazılımı kullanılmıştır [15-16].



Şekil 5. 3Boyutlu Yiyecek Yazıcısı

Hazne ve vidalı transfer sistemi modeli, STL formatında Thingiverse internet sayfasından alınmıştır. Sistemin parçaları Şekil 6' da verilmiştir [17]. Sistem elemanları Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü 3B yazıcı laboratuvarında PowerABS malzemesinden yazdırılmıştır. Sistemin 3B yazıcıya bağlantısını sağlayan Şekil 6.a 'da verilen parça çalışma kapsamında tasarlanıp üretilerek haznenin kolayca sökülüp değiştirilebilirliğini sağlamıştır.



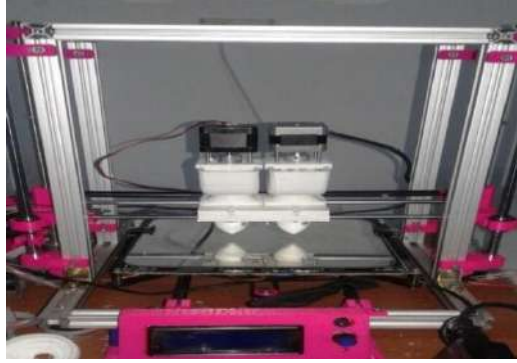
a. Destek Parça b. Motor Tutucu c. Hazne d. Hazne Alt Parça e. Helezon Mil

Şekil 6. Tek Nozullu 3B Yiyecek Yazıcısı Ektrüzyon Sistemi Parçaları

Çift nozullu 3B Yiyecek yazıcısı sisteminde Sigma3D yazıcı parçaları üretilmiş ve prototip imalatı Şekil 7.a ve b' de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir [18].



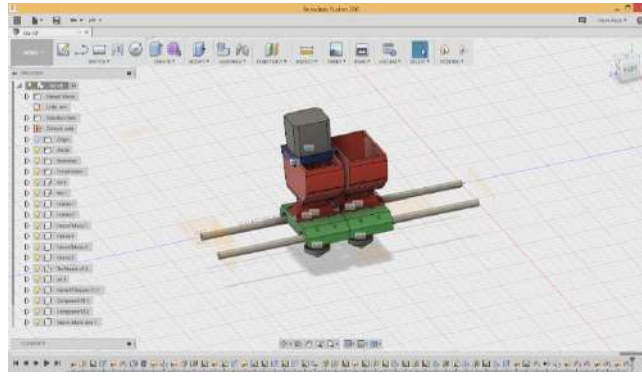
a. Kasa Montajı



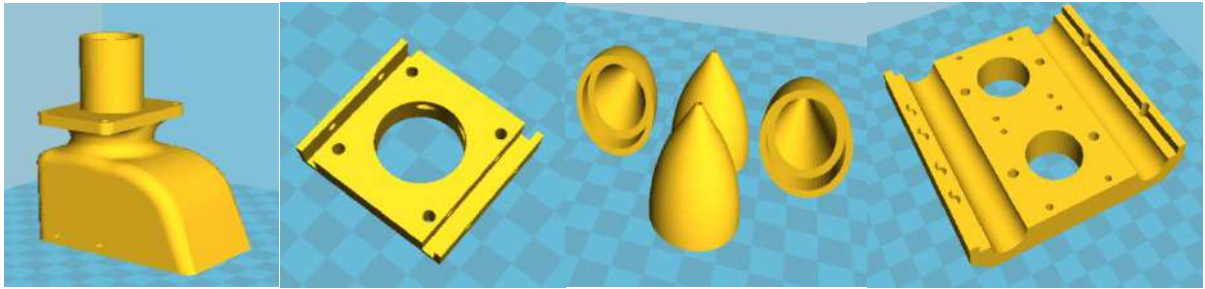
b. Montaj Son Hali

Şekil 7. Çift Nozullu 3B Yazıcı Prototip İmalatı Aşamaları

Hazneler, motor tutucu ve rulman tutucu parçalar ve farklı çaplarda nozul uçları Autodesk Fusion360 programı kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 8) [18].

**Şekil 8.** Çift Nozullu 3B Yazıcı Ekstrüzyon Sistemi Tasarımı

STL formatına dönüştürülen parçalar Cura programı ile dilimlenmiş (Şekil 9) ve imalatı yine aynı 3B yazıcıya filament ekstruderi monte edilerek yapılmıştır.

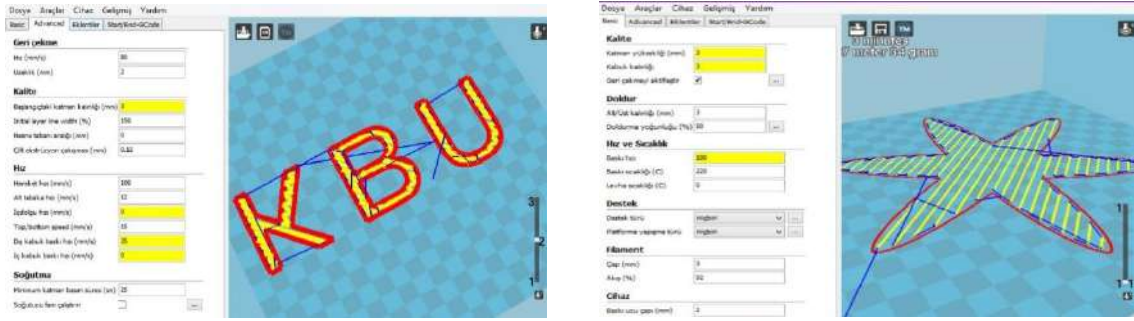
**Şekil 9.** Ekstrüzyon Parçaları

4. Deneysel Çalışmalar

Tek nozullu ve çift nozullu 3B yiyecek yazıcılarında hamur, çikolata, salça, krem peynir gibi gıda malzemeleri farklı doluluk oranlarıyla denenmiştir ve baskılar alınmıştır.

4.a. Tek Nozullu 3B Yiyecek Yazıcısı' nda Gıda Malzemeleri Yazdırma Parametreleri

Cura programı kullanılarak dilimlenen parçaların baskı parametreleri Şekil 10.a ve 10.b' de gösterilmiştir. Hamur kullanılarak yapılan kurabiye ve çikolata baskısı Şekil 11.a ve 11.b' de gösterilmiştir. Doluluk oranlarına göre malzeme yayılma oranları Tablo 1' de gösterilmiştir.



a. Kurabiye Uygulaması Cura Ayarları b. Pasta Süsleme Uygulaması Cura Ayarları

Şekil 10. Kurabiye ve Pasta Süsleme Uygulamasının Cura Dilimleme İşlemi

Nozul çapı 3mm olan 3B yazıcıda Cura ayarlarında katman kalınlığı 3mm verilmiş ve baskı hızı için 35mm/sn girilmiştir ve baskı alınmıştır.



a. Kurabiye Uygulaması



b. Pasta Süsleme Uygulaması

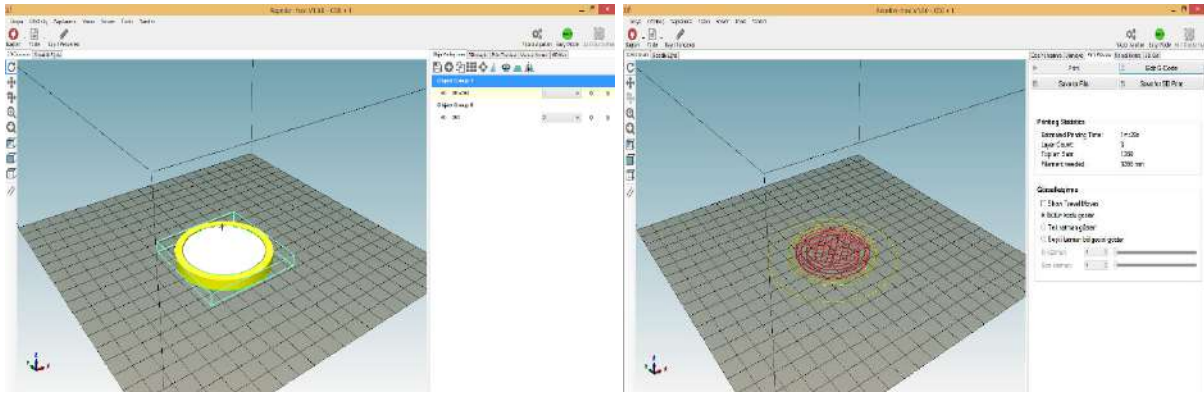
Şekil 11. Kurabiye ve Pasta Süsleme Uygulamaları

Tablo 1. Doluluk Oranlarına ve Nozul Çaplarına Göre Malzeme Yayılma Oranları

	Yayılma Oranları					
	Doluluk Oranı %10 (mm)		Doluluk Oranı %20 (mm)		Doluluk Oranı %30 (mm)	
	Nozul		Çapı			
Kullanılan Malzemeler	Ø3	Ø4	Ø3	Ø4	Ø3	Ø4
Hamur	0.3	0.5	0.7	0.9	1.5	2
Çikolata	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	0.7

4.b. Çift Nozullu 3B Yiyecek Yazıcısı' nda Gıda Malzemeleri Yazdırma Parametreleri

Repetier Host programı kullanılarak dilimlenen parçaların baskı parametreleri Şekil 12.a ve 12.b' de gösterilmiştir. Hamur ve salça kullanılarak yapılan pizza baskısı Şekil 13.a ve 13.b' de gösterilmiştir. Krem peynir ve salça kullanılarak yapılan baskı Şekil 13.c' de gösterilmektedir. Doluluk oranlarına göre malzeme yayılma oranları Tablo 2' de gösterilmiştir.



a. Parçaların Programa Atılması

b. Dilimleme İşlemi

Şekil 12. Tasarlanmış Parçaların Repetier Host Programında Dilimlenme İşlemleri

Nozul çapı 2mm olan çift nozullu 3B yazıcıda Repetier Host program ayarlarında katman kalınlığı 2mm verilmiş ve baskı hızı için 35mm/sn girilmiş ve baskı alınmıştır. Çift nozulla baskı alabilmek için iki nozul için de ayrı ayrı parçalar tasarlanmış ve Repetier Host programına atılmıştır (Şekil 12.a). Şekil 12.b' de dilimlenmiş parçalar kırmızı ve sarıyla gösterilmiştir. Sarıyla görülen parça 1. nozula, kırmızıyla görülen parça 2. Nozula atanmıştır.



a. Pizza Baskısı Yapımı



b. Pizza Baskısı Son Hali



c.Krem Peynir ve Salça Baskısı

Şekil 13. Salça, Krem Peynir ve Hamur Kullanılarak Alınan Baskılar

Tablo 2. Doluluk Oranlarına ve Nozul Çaplarına Göre Malzeme Yayılma Oranları

Yayılma Oranları						
	Doluluk Oranı %10 (mm)		Doluluk Oranı %20 (mm)		Doluluk Oranı %30 (mm)	
Nozul Çapı						
Kullanılan Malzeme-ler	Ø2	Ø3	Ø2	Ø3	Ø2	Ø3
Hamur	0.2	0.4	0.7	0.9	1.5	2.2
Krem Peynir	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Salça	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.4

5. Sonuç

Bu çalışmada yiyecek sektöründe kullanılmak üzere 2 nozullu kartezyen tipi ve tek nozullu kartezyen tipi 3B yazıcı tasarımı ve prototipi yapılmış ve gıda malzemesi yazdırma parametreleri karşılaştırılmıştır. Sistemlere göre en uygun gıda malzemeleri belirlenmiş, doluluk oranları ve kullanılan malzemeye göre yayılma parametreleri ölçülmüştür. Çift nozullu sistemde paslanmaz çelik helezon mil kullanıldığından sağlık açısından daha uygundur. Sistemlerde hamur, salça, krem peynir gibi malzemeler denenmiştir ve 2 ve 3 mm nozul uçlarıyla farklı gıda malzemeleri yazdırılmıştır. %10, %20 ve %30 doluluk oranları karşılaştırıldığında, doluluk oranları arttıkça malzeme yayılımının arttığı ve buna bağlı olarak nozul çapları arttıkça malzeme yayılımının arttığı gözlemlenmiştir. Malzeme viskozitesine göre de malzeme yayılımı değişmektedir. Çalışmalardaki tek nozullu sistemde üretilen gıda malzemeleri deneme amaçlı olup, iki nozullu sistemde yazdırılan parçalar ısıtıcı tabla sayesinde pişirilip yenilebilir. Bu çalışma ile görsel açıdan çekici gıdaların müşteri talebine göre özel tasarımı ve üretimi, özel öğütme ihtiyacı olan insanlar için gıdalar hazırlama, tasarım ve imalat süresi ve maliyet düşürülmesi amaçlanabilir.

Referanslar

- [1] Levy, Gideon N.; Schindel, Ralf; Kruth, Jean-Pierre. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, 52.2: 589-609.
- [2] Guo, Nannan; Leu, Ming C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering, 2013, 8.3: 215-243.
- [3] Kreiger, Megan; Pearce, Joshua M. Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2013, 1.12: 1511-1519.
- [4] Antle, K., Leen, R., & Russo, A. (2017). 3D Food Printing in Museum Makerspaces: Creative Reinterpretation of Heritage. KnE Engineering, 2(2), 1-7.
- [5] <https://www.naturalmachines.com/> (ET: 18.02.2017)
- [6] <https://zmorph3d.com/> (ET: 18.02.2017)
- [7] <http://chocedge.com/> (ET: 18.02.2017)
- [8] <http://foodink.io/> (ET: 18.02.2017)

- [9] Kouzani, A. Z., Adams, S., Whyte, D. J., Oliver, R., Hemsley, B., Palmer, S., & Balandin, S. (2017). 3D Printing of Food for People with Swallowing Difficulties. KnE Engineering, 2(2), 23-29.
- [10] <http://www.thingiverse.com/thing:28018> (ET: 21.02.2017)
- [11] <https://printrbot.com/shop/paste-extruder-beta/> (ET: 21.02.2017)
- [12] <https://store.zmorph3d.com/produkt/thick-paste-extruder/> (ET: 21.02.2017)
- [13] <http://sandbox.zmorph3d.com/cake-and-chocolate-extruder/> (ET: 21.02.2017)
- [14] Kaya G., Evlen H., Çetinkaya K. (2016). 3 Boyutlu Yiyecek Yazıcısı Tasarımı ve Prototipi: 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (3B-BTS2016) (web adresi: www.3dexpoturkey.com)
- [15] <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560> (ET: 22.02.2017)
- [16] <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin> (ET: 22.02.2017)
- [17] <http://www.thingiverse.com/thing:210290> (ET: 22.02.2017)
- [18] <http://www.thingiverse.com/thing:817504> (ET: 23.02.2017)
- [19] <http://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> (ET: 24.02.2017)

DOKU MÜHENDİSLİĞİNDE DOKU İSKELESİ TASARIMINDA KULLANILAN GÜNCEL 3 BOYUTLU YAZDIRMA TEKNOLOJİLERİ

Beka Çotur^a, H.Kürşad Sezer^{b,*}

^a, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Mühendisliği YL., Ankara/TÜRKİYE, beka.cotur@gazi.edu.tr

^b, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE, kursadsezer@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışmada günümüzde kullanılan 3 boyutlu yazdırma teknolojileri incelenmiş ve biyoyazdırma için kullanılan yazdırma teknolojileri arasında en uygun doku iskelesi inşa edenler tanımlanmıştır. Araştırma kapsamında üretilmesi hedeflenen doku yapısına göre kullanılacak olan biyomalzemelere uygun 3 boyutlu yazıcıların özellikleri, 3 boyutlu yazıcıların doku mühendisliği için gerekli olan gözeneklilik, yapısal dayanım, pürüzsüzlük, biyoçözünürlük kalitesini sağlama koşullarına yer verilmiştir. Bu araştırmada özetlenmiş olan bulgular, Doku İskelesi Tasarımı ve 3 Boyutlu Yazdırma Teknolojileri gibi biyoyazdırma uygulamaları ile ilgilenen akademik ve sanayi çevre için yararlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu yazdırma, doku iskelesi, doku mühendisliği

CURRENT 3 DIMENSIONAL PRINTING TECHNOLOGIES USED IN SCAFFOLD DESIGN IN TISSUE ENGINEERING

Beka Çotur^a, H.Kürşad Sezer^{b,*}

^a Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey.

beka.cotur@gazi.edu.tr

^b Industrial Design Engineering, Technology Faculty, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey.

kursadsezer@gazi.edu.tr

Abstract

In this study, current 3 dimensional printing technologies have been critically reviewed and most suitable printer technologies for tissue scaffold building used in bioprinting has been identified. The specifications of 3 dimensional printers appropriate for biomaterials used in building artificial tissue structures include the bioplotter's ability to provide porosity, structural strength, smoothness and biodegradability conditions required for tissue engineering. The findings outlined in this paper can be useful to both academic and industry followers interested in bioprinting applications such as Scaffold Design and manufacturing by 3 Dimensional Printer Technologies.

Keywords: 3 Dimensional printing, scaffold, tissue engineering

1. Introduction

Tissue engineering is regeneration, restoration, or replacement of defective or injured functional living organs, bones or tissues. The need for tissue engineering is emerged from long waiting list and supply shortage of organ transplant [1], long recovery times of surgery patients, unhealed parts, compulsory removal of organs due to cancer, accident or birth defects [2].

Tissue engineering starts with data acquisition, namely collecting cells by biopsy from the patient, imaging of body parts and defining which material composition to be used. Imaging methods include X-ray computed tomography, magnetic resonance imaging, ultrasound echoscopy, single-photon gamma rays (SPECT) and bioluminescence imaging [3]. Although a patient's organ can successfully be scanned using one of these methods, scan results usually lacks sufficient information about the organ layers. Each one of these layers can have different density and porosity, thus making the design of tissues more complex than traditional scan-and-print process of industrial production methods.

The complex cellular behaviours of organs and heterogeneous nature of native cellular environments impede 2-dimensional fabrication techniques since they cannot precisely tailor 3D culture systems [1]. In order to form complex 3D organ structures, a combination of biomaterial scaffolds, cells and growth factors (bioreactors) are required (Figure 1 - Osteochondral tissue [3])

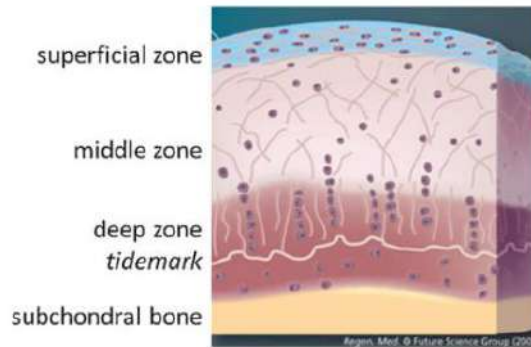


Figure 1 - Osteochondral tissue [3]

Tissue engineering field relies extensively on the use of these porous 3D scaffolds which essentially act as a template for tissue formation [4]. Scaffolds can be produced either growing or fabricating biomaterial scaffolds and a person's own cells [1]. Two types of strategy are utilized in developing scaffolds. In the first strategy, the scaffold has to provide support in vivo. It is directly implanted into the injured site, using the body's own systems, meaning regeneration of tissues or organs is induced in living environment. In the second strategy cell-seeded scaffolds are cultured in vitro (test tube, culture dish etc.) to synthesize tissues which can then be implanted into an injured site [4]. The scaffold only provides support in vitro until the cells are strong enough to support themselves in vivo [5].

Apart from the material and functional properties of tissue scaffolds, successful production of organs also requires the correct 3D printing mechanism to be chosen. The vulnerability of tissue materials makes it hard to choose any 3D printing device normally used in custom made non-living products.

Building speed, nozzle temperature, porosity requirements, provision of different material options are among many of the factors affecting cell viability and structure. Thus, in order to engineer a tissue, 3 factors must be taken into consideration: 3D bioprinting device specifications, types of materials and materials' design structure.

In general, 3D printing technology advanced mostly on solid – non-living structures, nonetheless bioprinting using this technology is emerging as new application. Proprietary materials developed for 3D printing devices available for various applications. These materials are the major part of what makes this technology works and made available after they have been tested again and again to find the correct settings of device, material composition, environment and structure. For the tissue engineering the problem is further complicated as the limitations on tissue engineering research is that the subject materials are not easy to find, reproduce and to test. To overcome the difficulties of material consumption and real life testing impossibilities, artificial environments like 3D simulation analysis software can be used to design and test the final products. The success of this analysis depends mostly on the previously collected bioinformatics data.

2. 3D Bio-production methods

Production of artificial tissues started for cells, peptides and biomaterials around a half century back. However manufacturing of biological constructs including living cells (Figure 2 - History of 3D Bioprinting Technologies [3]) dates back to 1990s [3]. In year 2000, bioengineer Thomas Boland get inspired by scientists who modified inkjet printers to print fragments of DNA to study the gene expression. Boland discovered that the same hardware could print other biomaterials since the smallest human cells are 10 μm , roughly the dimension of standard ink droplets. Thus he printed proteins with Lexmark's ink cartridge, and after 90% successful trials with other materials, Boland has patented the bioprinting device used for the tests in 2003 [6]. After this major breakthrough, several patterns, viable cells and biomaterials have been developed, and the structures turned into a 3D format. Printing technologies like biolaserprinting, stereolithography and robotic dispensing (fused deposition modeling, bioplotting) have been developed or modified to include cells in the fabrication process. In vivo printing is realized by biolaserprinting recently [3].

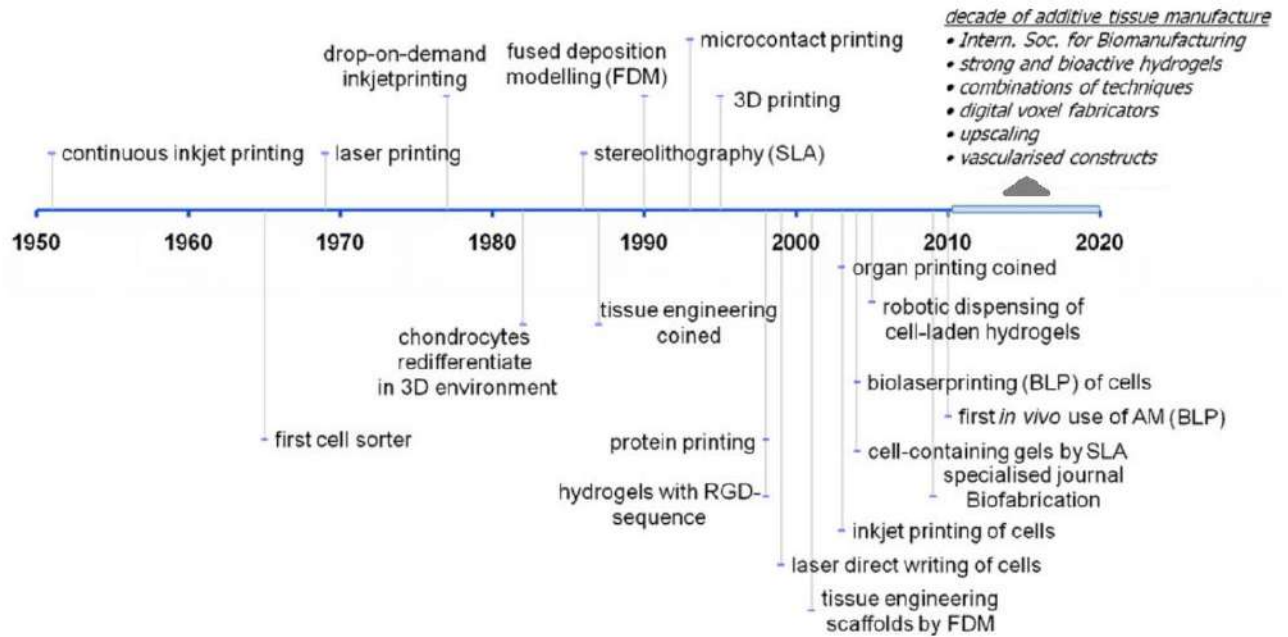


Figure 2 - History of 3D Bioprinting Technologies [3]

In a recent study [2], Xiaohong and colleagues classified the 3D printing technologies under 4 different categories, namely: the working principles; starting material states; energy sources; and the biological functions.

2.1. 3D Bio-plotting technologies

2.1.1. Binder jetting

This is one of the earliest rapid prototyping technologies and also known as powder bed and inkjet head 3D printing. Broadly, a liquid bonding agent (such as a polymer solution) is selectively deposited in conjunction with the powder materials. 'Adhesive Mediated Fabrication' is the bioplotting process based on this well-known binder jet printing technology. A natural biopolymer powder is binded with adhesives or solvents, by using binder solution as a cartridge in such inkjet printers. Multiple layers can be fabricated on the scale of polymer particle size (approximately 200–300 μm).

Scaffolds composed of natural biopolymers such as starch, dextran, and gelatin can be formed using aqueous solvents, and micropores can be formed by particle leaching. Griffith et al. used PLGA for liver tissue engineering and demonstrated rat hepatocyte attachment [7].

2.1.2. Material extrusion

Also known as Fused deposition modeling (FDM) / fused filament fabrication (FFF) and stick deposition molding (SDM), is a process in which material is selectively dispensed through a nozzle or orifice. FDM creates models using thermoplastic materials melted and extruded through a nozzle over a computer-controlled table. The thermoplastic material is usually needed in filament form as the printing material. 3D structures of any complexity can be formed by adding 2D layers on top of one another. In the emerging field of so-called computer aided tissue engineering (CATE) several groups are reporting the use of FDM for the fabrication of 3D constructs. The FDM is the most common and simplest 3D printing technology [8].

2.1.3. 3D Bioplotting

This process is similar to binder jetting with the difference is that the actual model/part material is deposited through microsyringe/micronozzle rather than depositing a liquid bonding agent on the powder material to hold them together. In bioplotting, also known as Precise Extrusion Manufacturing (PEM), a micro needle (outer diameter around 10-20 μm [7]) is employed as the extrusion nozzle where liquids, reactive oligomers or dispersions are stored in a heated cartridge [9]. The syringe / cartridge setup makes it easier to change between materials which allows ease of use and versatility [10]. These materials are then extruded into a temperature controlled liquid dispensing medium which induces solidification of the deposited material by cooling, heating or through chemical reaction [10]. The polymer stream thickness can be modified by varying the solution viscosity, syringe-tip diameter, syringe pressure, and stage motor speed which enables creation of structures from 5 μm to 600 μm [7]. The use of dispensing solution which has similar density as the building material, is that the buoyancy exerted by the medium on the build can prevent the collapse of complex structures thus eliminating the need for sacrificial support structures [9] and allows the seeding of living cells into the scaffold [10].

This technology has been used by Mulhaupt and coworkers to deposit agar and gelatin solutions heated to 90 $^{\circ}\text{C}$ into a cooled plotting medium, resulting in a 3-D hydrogel scaffold [7], and also used by Ang and colleagues in forming chitosan and chitosanhydroxyapatite scaffolds [7]. A recent work by Hee et al. an oscillating nozzle system was used in order to increase elastic modulus and yield strength of the strand in the scaffold [9]. Various materials were studied including PLGA Scaffold with controlled pore structures by Daoud et al. [9], non-stoichiometric apatite (ns-AP) and poly(ϵ -caprolactone) (PCL) scaffolds with well interconnected 400–500 μm pores by Ye et al. [9] and starch/polycaprolactone SPCL scaffolds with a 0 $^{\circ}$ /90 $^{\circ}$ strut structure by Oliveira et al. [9].

2.1.4. Directed energy deposition

This process uses focused thermal energy (e.g., laser, ultraviolet (UV), electron beam and plasma arc) to fuse or melt the materials being deposited. Electron beam manufacturing (EBM) and laser powder forming (LPF) are some well-known individual processes using this technology.

EBM comprises of an electron gun (similar to one in a scanning electron microscope) which operates at a power of 60 kW to generate a focused beam of energy density above 100 kW/cm². The beam focus is controlled by the electromagnetic lenses and the beam movement is controlled by deflection coils. For building a part, a powder layer of ~100 μ thickness is spread over the table. The powder is supplied from two hoppers (cassettes) kept inside the build chamber. A moving rake spread the powder over the table. The electron beam first pre-heats the powder layer with a higher scan speed, followed by melting the powder layer based on the geometry defined by the CAD file. In EBM, every layer of a part is built in two steps. The contour part is produced first and then the powder inside the contour is melted and together they form the first layer [11]. EBM is used for production of orthopedic components such as knee, hip replacements, and maxillofacial plates [11].

2.1.5. Powder bed fusion

Similarly to the directed energy deposition, powder bed fusion uses thermal energy to fuse regions of a powder bed. Selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), selective heat sintering (SHS), and electron beam melting (EBM) are all exemplary processes named after the source of

thermal energy. Of these processes, SLS is the most widely used technology in the powder bed fusion process [8]. SLS is a heat based technique, where a thin layer (~100 – 200 μm) of powdered polymeric material is spread on a surface using a cylindrical roller. A laser is then scanned over the powder bed, which heats the powder locally and sinter-bonds the adjacent particles to form layer of patterned structures. High porosity and surface area obtained by removing the non-sintered particles released from the part without loss of mechanical integrity makes this technology especially suitable for scaffold manufacturing [7]. SLS parameters, notably scan direction and spacing can significantly effect on the dimensional accuracy and mechanical properties of scaffolds. The effect was shown for HA (hydroxyapatite) and PCL (poly(ϵ -caprolactone)) scaffolds. Cellulose based scaffolds like starch cellulose and cellulose acetate can be produced at satisfactory level of porosity and mechanical properties for the design and fabrication of scaffolds with potential use in tissue engineering and drug delivery by optimizing the laser power and scan speed. SLS is also a successful method in fabricating nanocomposite scaffolds for bone tissue engineering using Calcium Phosphate (Ca-P) / poly (hydroxybutyratecohydroxyvalerate) (PHBV), and carbonated hydroxyapatite (CHAp)/poly(L-lactic acid) (PLLA) nanocomposites [9].

Selective Laser Melting (SLM) has a similar principle to SLS, except that a fibre laser source is used to melt very fine metal powders in an inert gas filled chamber which ensures higher purity by minimizing the oxygen in the environment and reduces the risk of hydrogen pick up [11]. In order to build a part, a powder layer of 20–100 μm thickness is spread over the table which can be preheated up to 200°C. The powder is carried and spread by the powder re-coater across the table [11]. Advantage of full melting is that it eliminates the need for post process furnace operations which is done in SLS, and it doesn't require any binders or laminating operation [9]. Different types of metals are used in SLM (such as stainless steels, cobalt-chrome and titanium), mostly for production of custom fitting implants and prostheses. Research conducted by Lindner et.al.(2011) [9] to assess the SLM production of scaffolds using β -tricalcium phosphate (β -TCP) and poly (D, L)- lactide (PDLLA). Results showed that biodegradable composite materials can have completely interconnected porous structure offering a regular and reproducible morphology of the pores [9].

2.1.6. Material jetting

Processes such as multi-jet printing (MJP) / multiJet modeling (MJM), polyJet printing, and contour crafting (CC) can all be considered under material jetting process in which droplets of build material are selectively deposited.

When this technology is used for biological materials, the process is called Inkjet Bioprinting. Inkjet bioprinters are one of the most widely used for bioprinting applications. The ink cartridge found in the material jetting machine is filled with a biological material. Thermal or acoustic forces are then used to eject drops of liquid from a nozzle onto a substrate. Thermal inkjet printers function by electrically heating print head to produce pulses of pressure that force droplets from the nozzle [12].

Several studies have shown that this localized heating (from 200 °C to 300 °C) does not have a substantial impact either on the stability of biological molecules or on the viability or post-printing function of mammalian cells. It has been demonstrated that the short duration of the heating (~2 μs) results in an overall temperature rise of only 4–10 °C in the printer head. The advantages of thermal inkjet printers include high print speed, low cost and wide availability. However, the risk of exposing cells and materials to thermal and mechanical stress, low droplet directionality, nonuniform droplet size, frequent clogging of the nozzle and unreliable cell encapsulation pose considerable disadvantages for the use of these printers in 3D bioprinting [12].

Piezoelectric crystal is another method used to break the liquid into droplets at regular intervals by acoustic wave inside the print head [12].

Thermal and piezoelectric ink-jet printing model can be seen in Figure 3 - Drop-on Demand Printers [13].

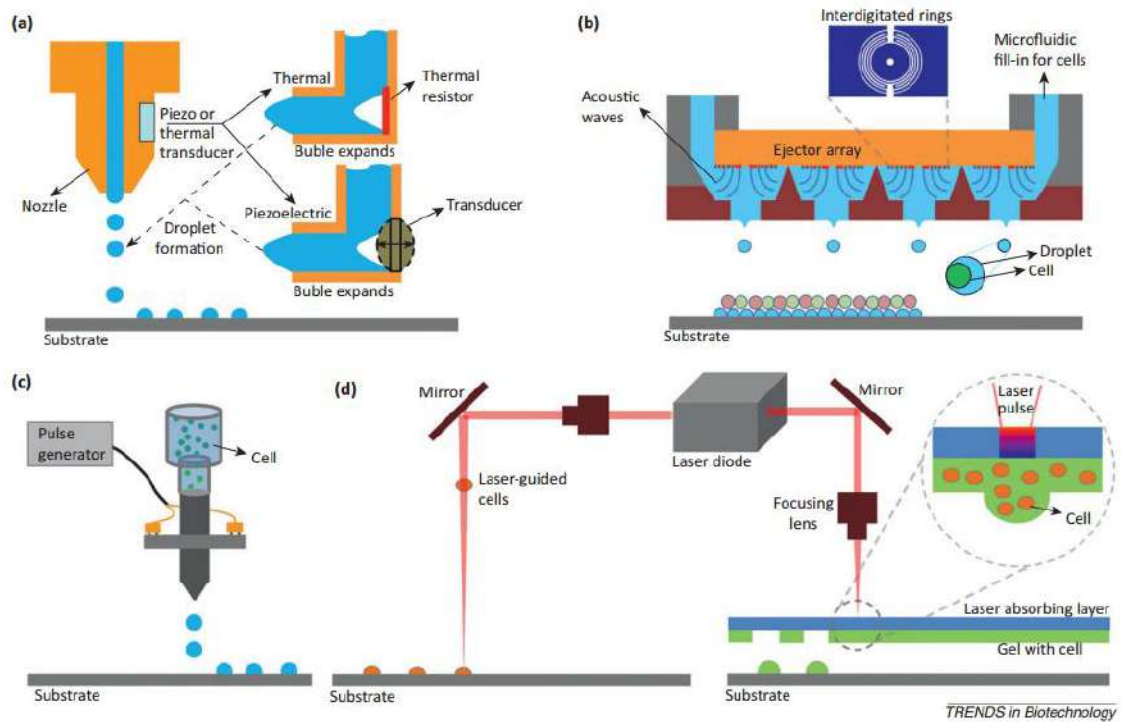


Figure 3 - Drop-on Demand Printers [13]

(a) Thermal and piezoelectric ink-jet printing; (b) Acoustic droplet generation; (c) Valve based printing; (d) Laser induced printing

Inkjet bioprinters have limitations on material viscosity. Higher viscosity materials requires excessive force and can cause clogging of the nozzle. In piezoelectric inkjet printing systems, ideal viscosity is below 10 cps for PLGA (poly(lactic-co-glycolic acid) and ideal surface tension of bio-ink should be in the range of 30–70 mN/m, high enough to prevent dripping of the ink from the nozzle and low enough to allow spreading over the substrate and prevent clogging at the nozzle [14]. Acoustic Droplet Ejection uses focused acoustic radiation pressure to eject discrete droplets of uniform size from the surface of a dextran solution. The pulse duration, and amplitude size of droplets is controlled by adjusting ultrasound parameters. The ejected dextran droplets are captured on a cell culture substrate that can be positioned by 3D positioning system [15].

Laser assisted bioprinting uses a laser beam, trapping photons and guide cells by focusing the laser is into a cell suspension and the force due to the difference in refractive indexes moves the cells onto an acceptor substrate. The cell–hydrogel compound is propelled forward as a jet by the pressure of

vapor bubble passing through laser absorbing layer [13]. Thermal transducers or laser power that's used in droplet ejection can increase the cell compounds to temperatures that cell viability is no longer valid, as a solution near-infrared wavelengths (700–1000 nm) have been used [13].

Robocasting is also referred as direct-write assembly is used to build scaffolds using water-based inks with minimal organic content (< 1 wt%). Scaffolds are formed by depositing highly concentrated colloidal suspensions (inks) capable of fully supporting their own weight during assembly owing to carefully tailored composition and viscoelastic properties so they don't need a sacrificial support material or mold [16].

Miranda and colleagues has studied Tricalcium phosphate (TCP, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) for tissue engineering bone and cartilage, since bioceramics exhibit a higher biodegradability (higher resorption rate) than other materials like hydroxyapatite (HA, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), which is the main inorganic component of bone. Among the three allotropic forms of TCP, β -TCP is preferred as a bioceramic because of its chemical stability, mechanical strength, and intermediate bioresorption rate. Commercially available β -TCP (Fluka, Buchs, Switzerland) powders were used to prepare inks for robocasting. The resulting samples were dried in air at room temperature for 24 hours and then at 400°C (1°C/min heating rate) for 1 hour to evaporate organics, followed by the appropriate sintering treatment at temperatures ranging from 1250°C to 1550°C (heating rate 3°C/min), depending on the starting powders, and sintering times of from 2 to 6 hours [16].

2.1.7. Vat polymerisation

3d printing methods known as stereolithography (SLA or SL), digital light processing (DLP), scan-LED technology (SLT), multiphoton lithography are all vat polymerisation process where liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization. SLA is curing of thin layers of liquid photopolymer, using a laser beam emitting at UV (ultraviolet) or visible spectrum. There are two methods of irradiation; 1st is a mask-based method in which an image is transferred to a liquid polymer by irradiating through a patterned mask; and the 2nd method is a direct writing by using a focused UV beam produces polymer structures [3]. The light is scanned on the photopolymer resin in accordance with designed model in forms of thin layer. Sequentially printed 2D layers then form a 3D structure [12]. Stereolithography is limited in resolution by laser beam diameter to approximately 250 μm , although small-spot laser systems are capable of production of smaller (70 μm or less) feature [7]. Even smaller features can be produced by a process called micro-stereolithography (μSL) where the laser beam is focused more precisely in order to reduce the spot size to a few micrometers of diameter to solidify a thin layer of 1–10 μm in thickness. Cell proliferation on the μSL scaffold was clearly superior [9].

Biodegradable 3-D polymer scaffolds were produced for bony tissue consisting of diethyl fumarate, poly (propylene fumarate) and the photoinitiator bisacylphosphine oxide. Also, cancellous bone and hydroxyapatite bone tissue scaffolds were formed by photocurable ceramic acrylate suspension, with overall dimensions suitable for healing critical-sized (4-mm thickness, 50-mm diameter) bone defects [7].

Multiphoton Lithography is working on two-photon absorption method; the beam of a fast laser is focused into the volume of the transparent photosensitive material, the polymerization process can be initiated by nonlinear absorption within the focal volume three-dimensionally through the material, so that 3D structures can be fabricated. Materials like acrylate and epoxy and several components have been fabricated such as photonic crystal templates. Difference from SLA is that the mono-

mer/oligomers used as materials should be transparent enough to enable the laser to focus inside the volume, and the transparency should be at the absorption wavelength [17].

The disadvantages of the light processing printing techniques are the long fabrication times and the gravitational incline tendency of the scaffold towards the nozzle direction. To overcome the speed limitation, a mirror device was replaced single laser tip to produce whole layer at once [3].

2.1.8. Sheet lamination

Sheet lamination processes include laminated object modeling (LOM), and film transfer imaging (FTI) or selective deposition lamination (SDL), where sheets of material are bonded to form an object. The process also known as heat-mediated 3D fabrication when pre-fabricated polymer layers are combined by heat energy into 3D structures by raising the polymer above its glass transition temperature and fusing the softened layers together with applied pressure. A setback for this method is that it has low void volume and high density for allowing high cellularity [7].

Chen and colleagues found out more intricate scaffolds lamination techniques can be used with biodegradable polyester polymers such as poly(DL-lactic-co-glycolic) acid (PLGA) by micropatterning using various techniques. They included Borenstein and colleagues (2002) laminated thin biodegradable films containing small trenches by casting PLGA onto microfabricated silicon masters and formed a vascular tissue engineering scaffold with 20 μm diameter channels between layers [7]. Bhatia and colleagues (2003) created polymer layers that have similar shape and resolution (20–30 μm) to those on the silicon master and could be fused together [7].

2.2. Other Bio-plotting methods

2.2.1. Production by molding

For sensitive biomaterials its inverse production is used by molding. The mold is subjected to the production process, so that the resulting scaffold is not effected by the process environment [7].

2.2.2. Solvent casting or particle leaching

Solvent casting or particle leaching is another technique to have least impact on the results. The polymer solution is dissolved in a solvent with uniformly distributed salt particles, after the solvent evaporated the composite is left with uniformly distributed salt particles. After the matrix is immersed in water, salt particles are leached leaving same size of pores (up to 500 μm) and 90% porosity in the resulting polymer [1].

Bajaj and colleagues included the findings of research made for different materials by Park et al.(2007) by using sodium chloride as the porogen and dimethyl sulfoxide as the solvent to form a block polymeric scaffold of PEG and poly(E-caprolactone) (PCL) [1]. Mehrabanian and colleagues (2011) fabricated nanohydroxyapatite (nHA) nylon 6,6 composite scaffolds where the microstructure of the scaffold had pores size ranging from 200 to 500 μm , which was similar to the size of the porogen used [1]. Bajaj referenced another study done by Ford et al. (2006) used a salt-leached PLGA scaffold as a template around which the authors synthesized a hydrogel by cross-linking PEG with poly-L-lysine. This hydrogel was then degraded by sodium hydroxide to create a highly porous hydrogel scaffold that was used for seeding endothelial cells in vitro, and the authors reported efficient microvessel formation [1]. One of the biggest advantages of this technique is that the controllable pore size and hence controlling the size and geometry of the porogen yielding control of the mechanical properties of the scaffold [1]. However, the main disadvantage of the technique is scaffold needs to be repeatedly washed to ensure complete removal of the cytotoxic organic solvents and minimize cell death [1].

2.2.3. Freeze-drying

Freeze-drying, also known as lyophilization, is a process in which a polymer solution is cooled down below its freezing point, so the solvent molecules solidifies, and the polymer to aggregates in the cracks of the scaffold. The solvent is then evaporated via sublimation leaving behind a highly porous polymeric structure with interconnected pores that can be used for seeding the cells [1].

3. Comparion of 3D bio-printing technologies

In general, techniques that use optics can achieve the highest resolutions. Examples of accurate optical fabrication methods are stereolithography, laser direct writing and biolaser printing. Additionally, photo-initiated polymerization can be used for safe encapsulation of cells and exogenous growth factors into hydrogels. Thermal techniques such as selective laser sintering or fused deposition modeling are not compatible with temperature-sensitive cells, but they can be adapted for processing thermosensitive hydrogels [3]. “Mechanical processes often allow for including cells in the fabrication process, as long as shear stresses induced on cells such as by deposition through a needle or inkjet cartridge orifice are sufficiently low” [3].

Table 1 - Comparison of 3D bioprinting technologies [3],[2]

Technique	Accuracy (μm)	Materials	Cells incorp.	Advantages	Disadvantages	Refs
3D printing	50	Polymers,ceramics	No	Multiple compositions	Requires powder, cell-unfriendly environment	(M)
Binderjetting	200-300	Natural biopolymers (starch, dextran, and gelatin)				
Biolaserprinting	10	Liquids	Yes	High accuracy at high speed	Low viscosity prevents build-up in 3D	(M)
Direct writing	1	Polyelectrolytes, A concentrated colloidal gel (typically 50% HA particles suspended in an aqueous medium)	Not yet	High accuracy, two materials can be printed in a construct	Requires solvents, cell-unfriendly environment, scalability	(M)
Double nozzle extrusion		Natural polymer hydrogels, such as gelatin, gelatin/alginate, and gelatin/alginate/fibrinogen	Yes	A wide range of biomaterials; cells and bioactive agents can be incorporated	Weak mechanical properties, high concentration of hydrogels, biodegraded in vivo	(X)
Double nozzle low temperature extrusion		Natural and synthetic polymers	Yes	A wide range of biomaterials; growth factors, cytokines, chemicals, accurate, genes can be incorporated, stable, fast, controllable, scalable	High concentration of hydrogels, organic solvents are needed for synthetic polymer deposition, removal after printing	(X)
Extrusion based	100	Thermoplastics, composites, Natural or synthetic polymer solutions,	Yes	Technologically simple, wide range of materials, high accuracy, flexible, reproducible, scalable, growth factors, constructs with high mechanical properties	Requires strong filament and high temp, organic solvents are needed for synthetic polymer deposition, cells are difficult to be incorporated; Nozzle easily clogging; harms to cells	(M), (X)
Fused Deposition modeling		Synthetic polymers, hydroxyapatite incorporated polycaprolactone		Automated, controllable, fast, accurate, reproducible, scalable	Cells cannot be incorporated directly, limited materials	(X)
Indirect 3D bio-printing		Calcium phosphate modified PCL (PCL-CaP) and treated with fibrinogen	Yes	A wide range of biomaterials can be used; cells and bioactive agents can be incorporated	Low accuracy of the final structures; complex processing procedures	(X)

Technique	Accuracy (μm)	Materials	Cells incorp.	Advantages	Disadvantages	Refs
Inkjet printing	10–100	Liquids, Hyaluronic acid (HA) improved gelatin-methacrylamide (gelMA) hydrogels	Yes	High mechanical properties; use of existing cheap technology, multiple compositions	Low viscosity prevents build-up in 3D, low strength, limited biomaterials	(M), (X)
Laser direct writing	20	Cells in media	Yes	Single cell manipulation	No structural support, scalability	(M)
Microstereolithography		Poly-(L-Lactide-co-ε-caprolactone)/gelatin, heparin, transforming growth factor-β1, chondrocytes	No	A wide range of biomaterials can be used; bioactive agents can be incorporated	Low accuracy of the final structures; complex processing procedures; limited mechanical properties	(X)
Robotic assembly	5	Rigid solids	Not yet	No heat, light or reaction required	Expensive machinery	(M)
Robotic dispensing	100	Hydrogels, polymers, ceramic-composites	Yes	Multiple compositions	Relatively low accuracy	(M)
Selective laser sintering	50	Polymers, ceramics	No		Requires powder, cell-unfriendly environment	(M)
Stereolithography (incl. two-photon polymerization)	0,5–50	Hydrogels, polymers, ceramic-composites	Yes	High accuracy	Single composition, requires photo-curable material	(M), (X)
Thermal Inkjet Printing		Collagen solutions	No	The fabrication temperature can be reduced	Low accuracy; low mechanical properties; cells cannot be incorporated	

(M) [3], (X) [2]

4. Conclusion

Considering the limitations of material operation by devices and limitations of material supply, the 3-dimensional printing technology should be chosen upon the material selection. Adjustments can be made to printers; however materials are not in vast amount to be tested. In order to solve this dilemma, using bioinformatics data applied to 3D printing design software would be useful. Simulation of tissue bioproduction tests should be executed with laboratories and 3D printer production companies, not to just enable mass production as most of the 3D printing companies target, but to help the science to advance further.

References

- [1] Bajaj, P., et al., 3D Biofabrication Strategies for Tissue Engineering and Regenerative Medicine. Annual Review of Biomedical Engineering, 2014. 16(1): p. 247-276.
- [2] Xiaohong, W., et al., 3D Bioprinting Technologies for Hard Tissue and Organ Engineering. Materials (1996-1944), 2016. 9(10): p. 1-23.
- [3] Melchels, F.P.W., et al., Additive manufacturing of tissues and organs. Progress in Polymer Science, 2012. 37(8): p. 1079-1104.
- [4] O'Brien, F.J., Biomaterials and scaffolds for tissue engineering. Materials Today, 2011. 14(3): p. 88-95.
- [5] Hutmacher, D.W., Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage. Biomaterials, 2000. 21(24): p. 2529-2543.
- [6] Leckart, S. How 3-D Printing Body Parts Will Revolutionize Medicine. Popular Science, 2013.
- [7] Chen, A.A., et al., 3-D Fabrication Technology for Tissue Engineering. BioMEMS and Biomedical Nanotechnology, 2007: p. 23-38.
- [8] Gu, B.K., et al., 3-dimensional bioprinting for tissue engineering applications. Biomater Res, 2016. 20: p. 12.
- [9] Abdelaal, O.A. and S.M. Darwish, Fabrication of Tissue Engineering Scaffolds Using Rapid Prototyping Techniques. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 2011: p. 2317-2325.
- [10] Sun, W., et al., Computer Aided Tissue Engineering: Overview, Scope and Challenges. Biotechnology Applied Biochemistry, 2004: p. 29-47.
- [11] Sing, S.L., et al., Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. Journal of Orthopaedic Research, 2016. 34(3): p. 369 - 385.
- [12] Murphy, S.V. and A. Atala, 3D bioprinting of tissues and organs. Nat Biotechnol, 2014. 32(8): p. 773-85.
- [13] Tasoglu, S. and U. Demirci, Bioprinting for stem cell research. Trends Biotechnol, 2013. 31(1): p. 10-9.
- [14] Kim, J.D., et al., Piezoelectric inkjet printing of polymers: Stem cell patterning on polymer substrates. Polymer, 2010. 51(10): p. 2147-2154.
- [15] Fang, Y., et al., Rapid generation of multiplexed cell cocultures using acoustic droplet ejection followed by aqueous two-phase exclusion patterning. Tissue Eng Part C Methods, 2012. 18(9): p. 647-57.
- [16] Miranda, P., et al. Sintering and robocasting of beta-tricalcium phosphate scaffolds for orthopaedic applications. 2005 [cited 2016 October]; Available from: <http://escholarship.org/uc/item/7b08w22z>.
- [17] Selimis, A. and M. Farsari, Laser-Based 3D Printing and Surface Texturing. 2016: p. 111-136.

EŞİT MİKTARDA FİLAMENT KULLANIMI İLE 3 BOYUTLU BASKISI YAPILACAK ANKASTRE KİRİŞLERİN ÇEKME/BASMA MUKAVEMETİNE GÖRE KESİT GEOMETRİLERİNİN BELİRLENMESİ

Murat Tolga ÖZKAN^a Hüseyin Alp ÇETİNDAG^b, İhsan TOKTAŞ^c

a, Gazi University Faculty of Technology, Industrial Design Engineering Department, 06500 Ankara, Turkey

E-mail: mtozkan06@yahoo.com

b, Institute of Natural and Applied Sciences, Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey,

E-mail: h.a.cetindag@outlook.com

c, Yıldırım Beyazıt University, Mechanical Engineering Department 06020 Keçiören, Ankara, Turkey,

E-mail: itoktas@ybu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, aynı kesit alanlı ve uzunluktaki, eşit miktarlardaki filament kullanımı ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin çekme/basma mukavemeti yönünden en iyi mekaniksel özelliği sağlayan kesit geometrilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle, hızlı modelleme ve plastik parçaların üretiminde sıkça kullanılan filamentin miktarına göre, üretim zamanı ve harcanan enerjiden bağımsız olarak, tasarımlar arasında performansa göre bir sıralama yapılmıştır. Ankastre kirişlerin tasarımların uzunluğu ve uygulanan kuvvetler sabit tutulmuş, içi dolu temel kesit geometrisi biçimleri (Çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralel kenar, elips ve köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen) değiştirilmiştir. Ayrıca, dört farklı filament malzemesi, çekme/basma mukavemeti yönünden karşılaştırılmıştır. 6 kesit şekline, 101 kesit alanına ve 4 farklı malzemeye bağlı olarak toplam 2424 adet tasarım alternatifi oluşturulmuştur. Bu tasarım alternatifleri, önce matematiksel olarak modellenmiş, sonra sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi ile test edilmiştir. Tüm modellerin istatistiksel analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en düşükten büyüğe doğru gerilmelere ve deformasyonlara uğrayan kesit geometrisi biçimleri sıralanmıştır.

Anahtar Kelimeler: filament, ankastre kiriş, çekme/basma, optimizasyon

DETERMINATION OF CROSS SECTIONAL GEOMETRIES OF BEAMS ACCORDING TO TENSION AND COMPRESSION STRENGTH WHICH ARE 3D PRINTED WITH THE SAME AMOUNT OF FILAMENT

Abstract

Aim of this study is to specify the performance of cross sectional geometries of beams which were experienced the tension stress. These beams which were 3D printed with the same amount of filament have same cross sectional area, length and volume. . Thus, design points were sorted without the effect of the amount of filament, printing time and energy consumption. Geometry of cross section was changed. In contrary length of beams and applied forces were kept constant for all design points. These geometries were selected as, circle, rectangle, equilateral triangle, rhombus (diamond), ellipse and rounded rectangle. Moreover four different printing material were taken into consideration for comparison according to tension. Depending on 6 different cross sectional geometry, 101 cross sectional area and 4 different material, 2424 design alternative were created in total. At the beginning mathematical model of these designs were constructed, then they were tested by using finite element method (FEM) and regression analysis. All model branches were compared to each other with the statistical analysis. As a result of all analyses, design alternatives were sorted according to stress and deformation performance.

Keywords: filament, beam, bending, optimization

1. GİRİŞ

Kesit şekli ve malzeme cinsi, üretilecek ürünün gerilme ve gerinim değerlerini etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan kesit geometrisine göre bir dayanıklılık sıralamasının yapılması gerekmektedir. Literatürde farklı kesit tiplerine göre ayrı ayrı yapılmış çalışmalar mevcut olmakla birlikte, kesit geometrisi ve eşit miktarda malzeme kullanımına göre bir dayanıklılık sıralama yapılmamıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü eşit miktarda malzeme kullanarak, zorlanma şiddetine bağlı olarak çekme mukavemeti ve boyca uzama değerlerine dayalı malzeme cinsine göre kesit sıralaması yapılmasıdır.

Günümüzde 3B baskı ve yazıcılar, özellikle ağır sanayiler dışındaki ofislerimizde RP'ye (Rapid Prototype) kolay bir yol desteklemekte ve bize farklı malzeme türüne izin vermektedir. Mücevher, ayakkabı, endüstriyel tasarım, mimarlık, otomotiv, havacılık, dişçilik ve tıbbi endüstriler gibi birçok farklı alan bu tekniği kullanmaya başladı [1]. En önemli uygulamalardan bir tanesi, tasarım geliştirme ve tıbbi modellerin imalatıdır ve bunun sayesinde cerrahi planlamadan önce sanal ve fiziksel anatomik modellerin üretimi amaçlanmaktadır [2,3]. Katkı imalatı veya 3D baskı, şirketlerin şu ana kadar imkânsız olduğu düşünülen şekillerin üretimine izin vererek ürünler üretme biçiminde devrim meydana getirdi. Bu, malzemele- rin yük koşulları altında en iyi performans için gerekli olan kesin konumlara yerleştirilmiş parçaları tasar- lamanın avantajını sağlar. Bununla birlikte, bu teknoloji ağırlık-performans perspektifinden faydalanır- ken, sonlu elemanlar analizi ve performans öngörülerini için ayrıştırılması zor olan oldukça karmaşık şekil- lere neden olur. Bu zorluk, açık çözümlerin tipik olarak kullanıldığı bileşen arızaları gibi son derece doğ- rusal olmayan olayları tahmin ederken daha da belirginleşti. Geleneksel olarak, benzer elemanlar için tetrahedral elemanlara kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha düşük simülasyon maliyetlerinden ötürü açık altı çözümlerde altı yüzlü elemanlar kullanılır. Bununla birlikte, topoloji optimizasyonu ile üretilen oldukça karmaşık şekiller, altı yüzlü elemanlar kullanılarak örgü yapmak kesinlikle yasaktır. Dolayısıyla rijitlik ve daha özel olarak mukavemet sayısal tahmini, 3D baskılı parçalar için zorlu bir önerme haline gelir [4,5]. Farklı bir çalışmada, dolgu deseni seçiminin ve çeşitli mekanik özelliklerin maliyet ve üretim sürelerinin belirlenmesi için tasarım parametrelerini belirlenmesi hedeflemiştir. Bunun için farklı zorlan- malar için deneysel ve FEA analizleri yapılmıştır [7].

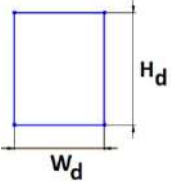
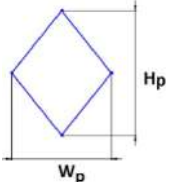
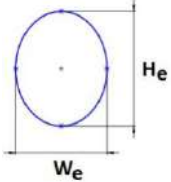
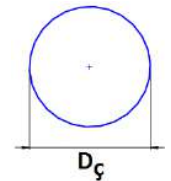
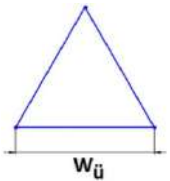
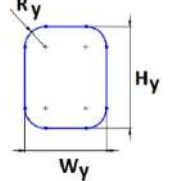
Bu çalışma, 3D yazıcı aracılığıyla üretilecek olan kirişlerdeki, çekme gerilmesiyle zorlanan elemanların sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çözüm aracılığıyla elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve reg- resyon analizinin yapılması ile özetlenebilir. Bu sayede kullanılan malzeme ve harcanan enerjiden ba- ğımsız olarak daha sağlam tasarımlar elde edilmiş olacaktır.

2. Yöntem

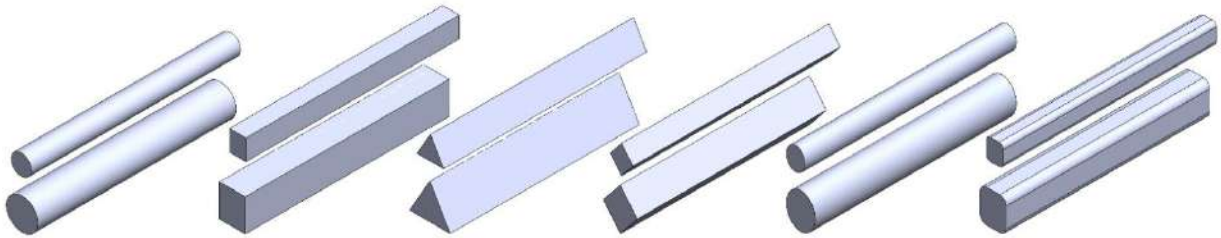
2.1. Tasarımların Hazırlanması

Kıyaslamalarda kullanılması için üç ana şekil (Çember, Dikdörtgen, Eşkenar Üçgen) seçilmiş, daha sonra bunlara ek olarak Paralelkenar, Elips ve Yuvarlatılmış Dikdörtgen de hesaplama ve analizlerde göz önünde bulundurulmuştur. Parametrik tasarım yapılabilmesi adına bu şekilleri oluşturan ölçüler arasında bağlantı kurulmuş ve çalışma boyunca bu ilişkiler bozulmamıştır. Elde edilen bu oranlar Çizelge 1 de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Seçilen kesit geometrileri ve bu şekillere ait ölçüler

Dikdörtgen			
	$H_d / W_d = 1,5$ H_d : min: 1,936 mm, max: 3,162 mm W_d : min: 1,549 mm, max: 2,530 mm	$H_p / W_p = 1,5$ H_p : min: 2,739 mm, max: 4,472 mm W_p : min: 2,191 mm, max: 3,578 mm	$H_e / W_e = 1,5$ H_e : min: 2,185 mm, max: 3,568 mm W_e : min: 1,748 mm, max: 2,855 mm
Çember			
	$D_ç$: min: 1,954 mm, max: 3,192 mm	$W_ü$: min: 2,632 mm, max: 4,210 mm	$H_y / W_y = 1,5$ $W_y / R_y = 4$ H_y : min: 1,979 mm, max: 3,232 mm W_y : min: 1,584 mm, max: 2,586 mm R_y : min: 0,396 mm, max: 0,646 mm

Seçilen bu kesitlerin kiriş uzunlukları 20 mm olarak sabit tutulmuş, kesit alanları ise 3 mm² den 8 mm² ye kadar arttırılmıştır. Bu sayede 101 adet kesit alanı elde edilmiştir. Çalışmada yer alan en büyük ve en küçük kesit alanına sahip tasarımlar Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1. Soldan sağa doğru sırasıyla; çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen şeklindeki kesitlere sahip tasarımlar. (Kesit alanı üstte 3 mm², altta ise 8 mm²dir)

Altı adet kesit geometrisi ve 101 adet kesit alanı kullanılarak elde edilen 606 tasarım, 3D yazım tekniğinde kullanılan ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ve PC (Polycarbonate) malzemeleri için de tekrar edilmiş, böy-

lelikle toplam 2424 adet çözüm noktası oluşturulmuştur. ABS ve PLA, 3D yazıcılarda sıkça kullanıldığı için tercih edilmiş. Malzeme çeşitliliğini arttırmak için ise PETG ve PC de analizlere dahil edilmiştir. Kullanılan bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2 de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

	Elastikiyet Modülü (Uzama)	Poisson's Oranı	Özkütle - ρ -
ABS	2250 MPa	0,35	1,05 g/cm ³
PLA	3500 MPa	0,36	1,24 g/cm ³
PETG	2100 MPa	0,4	1,27 g/cm ³
PC	2206 MPa	0,37	1,21 g/cm ³

2.2. Analizlerin Yürütülmesi

Elde edilen bütün tasarımlar aynı kuvvet altında analiz edilmiştir. 10 N büyüklüğündeki bu kuvvet bir uçtan kiriş eksenine paralel uygulanmıştır. Diğer uç ise sabit destek olarak seçilmiştir. Öncelikle genel mukavemet formülleri kullanılarak hesaplamalar yapılmış, sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışmalar istatistiksel olarak karşılaştırılarak, mukavemet yönünden güçlü tasarımların saptanması amaçlanmıştır.

2.2.1. Analitik Hesaplama

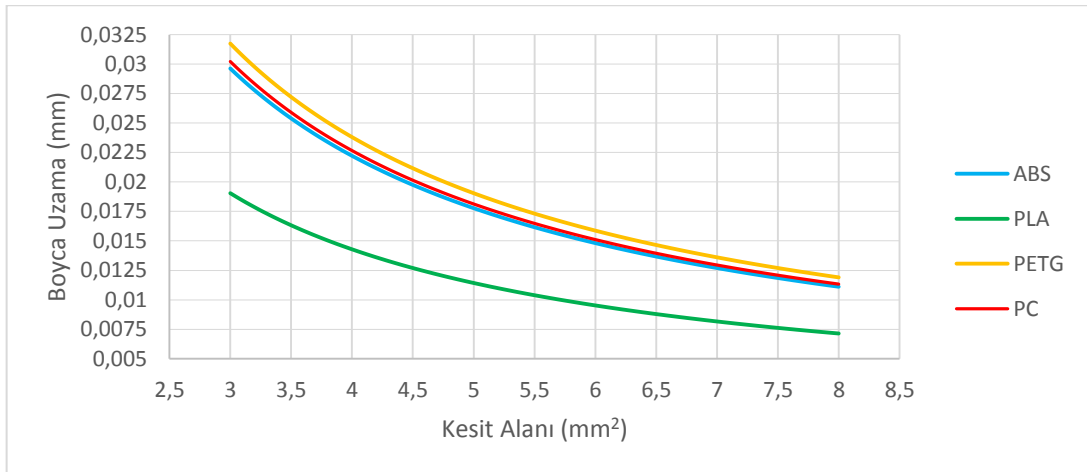
Çekme gerilmesi Denklem (1), gerinme ve uzama ise sırasıyla Denklem (2) ve Denklem (3) yardımıyla bulunabilir [8].

$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{L} = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{F}{E \cdot A} \quad (2)$$

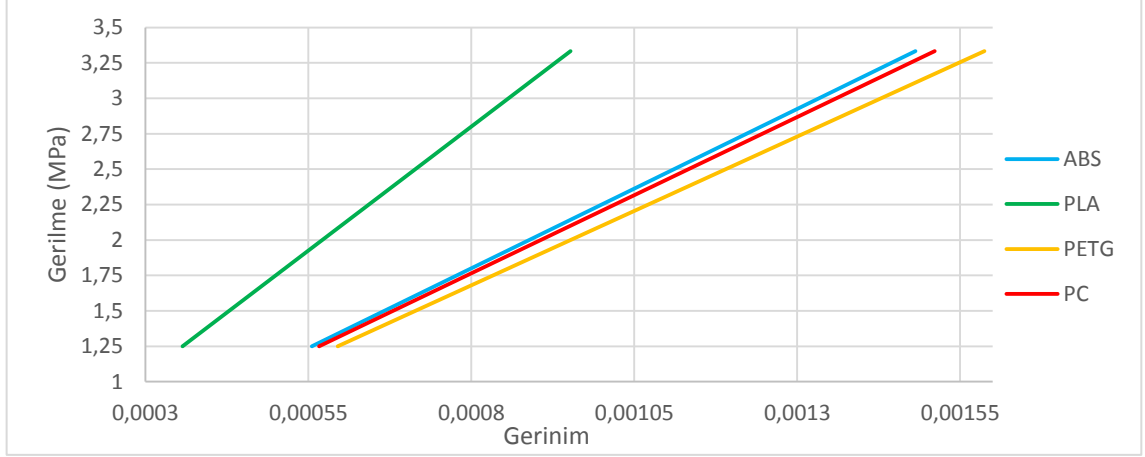
$$\Delta L_z = \frac{F \cdot L}{A \cdot E} \quad (3)$$

Burada σ_T ortaya çıkan çekme gerinmesini, F uygulanan kuvveti, A kesit alanını, ε_z z-ekseni boyunca gerinmeyi, L kirişin uzunluğunu, E ise elastikiyet modülünü ifade etmektedir. Bu hesaplamalarda şekilden ziyade kesit alanı ve malzeme cinsi önemlidir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen grafik aşağıda gösterilmiştir.



Grafik1. Seçilen malzemeler için kesit alanının boyca uzamaya etkisi

Dört farklı malzeme (ABS, PLA, PETG ve PC (Polycarbonate) için çekme yüklemesine karşı uzama değerleri elde edilmiştir. Kesit alanlarına göre uzama değerleri Grafik 1 de gösterilmiştir. En fazla uzamalar sırasıyla PETG, PC, ABS ve en az uzamayı ise PLA göstermiştir. Yüklemeler sonucunda elde edilen Gerilme-Gerinim grafiğine bakılacak olursa aynı gerilmeye karşın ABS, PLA, PETG nin daha çok şekil değiştirdiği, PLA nın ise uzama değerinin diğer malzemelere göre daha az olduğu ortaya çıkmıştır (Grafik 1).



Grafik 2. Seçilen malzemeler için gerilmenin gerinime üzerine etkisi

2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Katı modeli oluşturulan tasarımlar ANSYS “Static Structural” modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerin ilk adımını “mesh” optimizasyonu oluşturmaktadır. Mesh boyutu, mesh sayısı ve mesh oluşturma metotları değiştirilerek sonuçların analitik hesaplamalara uyması sağlanmıştır. Uygun mesh kalitesi elde edildikten sonra, parametrik tasarım yardımıyla bütün modeller sistematik bir şekilde analiz edilmiştir.

Analizlerde kirişin bir ucuna yüzeye yayılmış bir şekilde 10 N'luk kuvvet, öbür uca ise sabit destek (fixed support) uygulanmıştır. Sonuçlar iki kısımda değerlendirilmiştir. İlk olarak gerilme (σ_T) ve gerinimlerin (ϵ) doğrusal olduğu kirişin orta kısmı incelenmiş, daha sonra ise parça genelinde ortaya çıkan gerilme deformasyon ve gerinimler dikkate alınmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kirişlerdeki boyca uzamanın ve kirişlerin ortasındaki gerilmelerin analitik olarak elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu görülmektedir. Bu iki yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve aradaki sapmanın belirlenmesi için istatistiksel analizden yararlanılmıştır;

$$RMS = \left(\frac{1}{p} \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - t_j)^2}{\sum_j o_j^2} \right) \quad (5)$$

$$Ort. \% Hata = \frac{\sum_j \left(\frac{t_j - o_j}{t_j} * 100 \right)}{p} \quad (6)$$

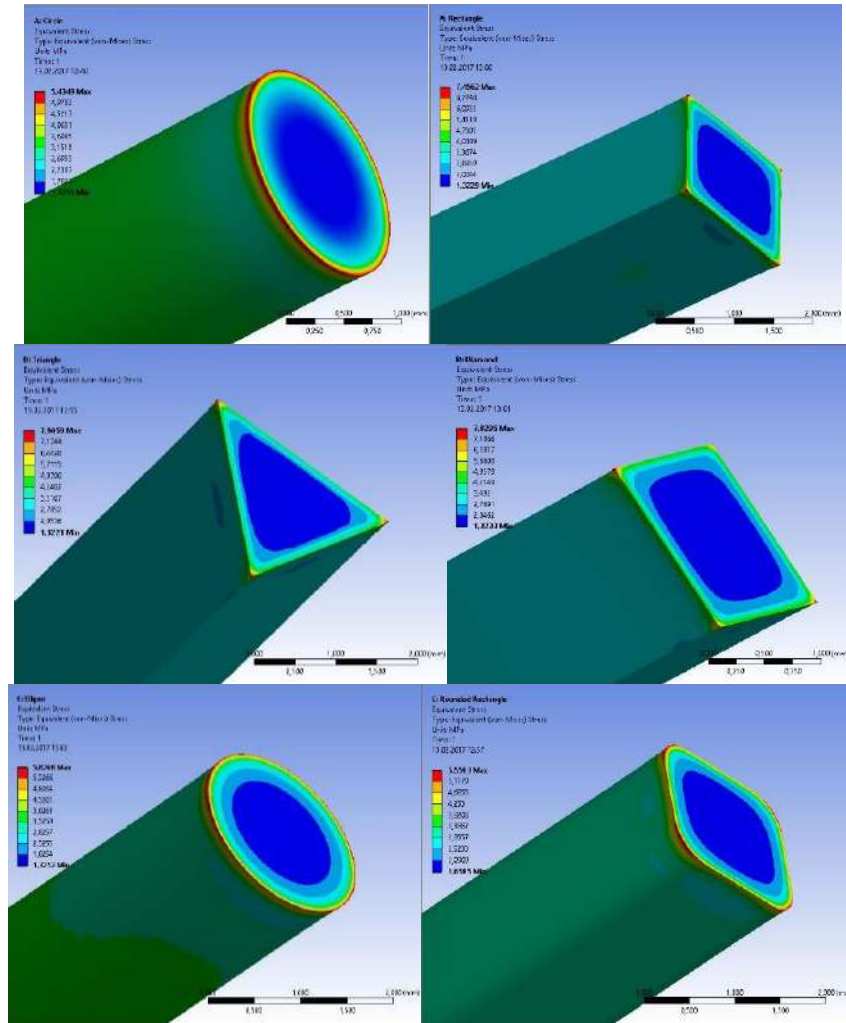
3 eşitlik (Denklem 4-6) kullanılarak deformasyon, gerilme ve gerinim sapmaları bulunmuştur. Kesit alanı, kesit geometrisi veya malzeme gözetmeksizin yapılan bu hesaplamalar sayesinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin doğruluğu belirlenmiştir. Bunun yanında herhangi bir tasarımda ortaya çıkan en büyük ve en küçük sapmalar da saptanmıştır. Elde edilen bu değerler Çizelge 3 te verilmiştir.

Çizelge 3. Boyca uzama, kirişlerin ortasındaki gerinme, gerilme hesaplamaları için analitik çözüm ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki sapma değerleri

	RMS	R^2	Ort. % Hata	Min. Sapma (%)	Maks. Sapma (%)
Boyca uzama	0,0000928600	0,9999994683	0,5571897631	0,361980544	0,841342285
Gerinim	0,0000000066	1,0000000000	0,0004394443	0,0000000918	0,009812653
Gerilme	0,0000172179	0,9999999998	0,0004400554	0,0000000023	0,009818793

“RMS” değerinin 0’a, “ R^2 ”değerinin 1’e yakın olması ve “Ort % Hata” değerinin ise düşük değerlerde olması gerekmektedir. Bu kıstaslar göz önünde bulundurulduğunda yapılan sonlu elemanlar analizinin çok yüksek bir doğruluğa sahip olduğu görülmektedir.

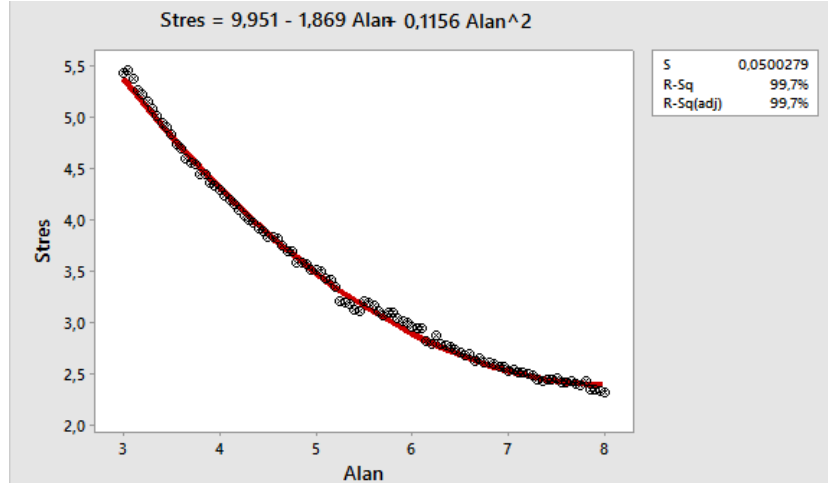
Kirişlerin bütünü ele alındığında, en yüksek gerilme değerlerinin kuvvet uygulanan yüzey veya kirişin orta noktasından ziyade kirişin sabitlendiği bölgede ortaya çıktığı görülmüştür. Bu yüksek gerilmeler Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kirişler üzerinde oluşan gerilme yığılmaları

2.2.3. Regresyon Analizi

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilenler incelendiğinde, sabit destek bölgesinde oluşan gerilmeler dışında bütün verilerin sonuca bağlandığı görülmektedir. Bu yüzden gerilmeleri analiz etmek için regresyon tekniği kullanılmıştır. Regresyon analizinde çıktılar gerilme, girdiler ise kesit alanı olarak belirlenmiştir. Model olarak İkinci derece regresyon seçilmiş, güvenilirlik seviyesi %95 olarak belirlenmiştir. Grafik 3 te dairesel şekle sahip kiriş için yapılan bu analiz her kesit şekli için tekrarlanmıştır.



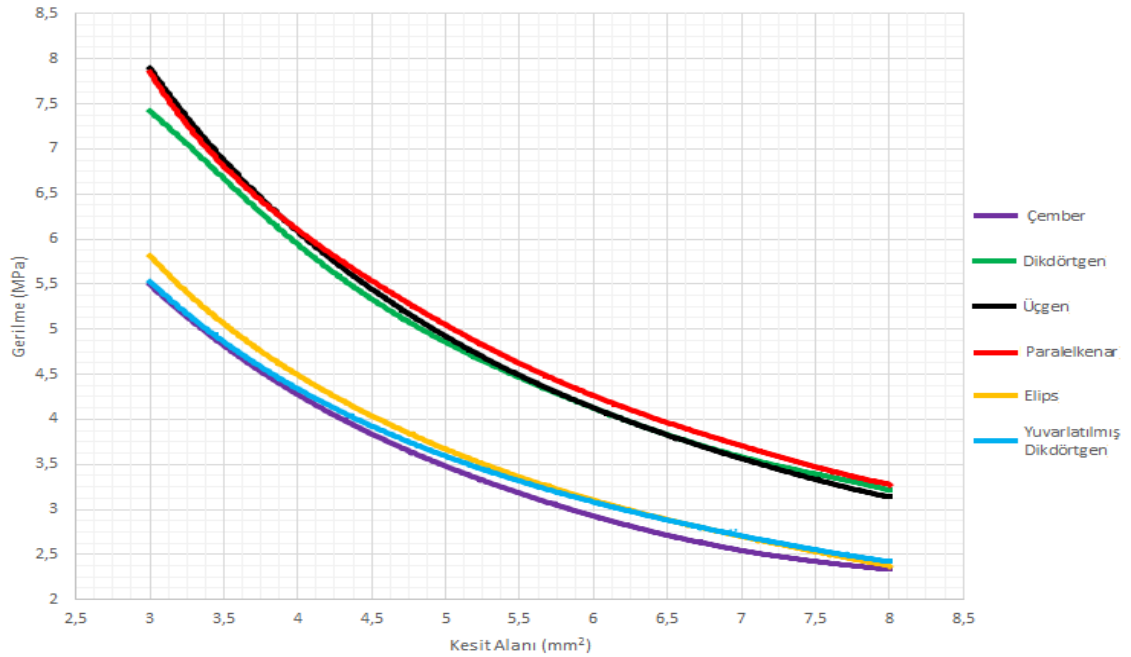
Grafik 3. Dairesel alana sahip kirişte, gerilme yığılması olan bölgeler için yapılan regresyon analizi sonucu

Altı farklı kesit alanı için yapılan regresyon analizi sonuçları Çizelge 4 te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Regresyon analizi sonucu elde edilen denklemler ve katsayılar (σ = gerilme, A = kesit alanı)

	Denklem	R^2	S
Çember	$\sigma = 9,951 - (1,869 A) + (0,1156 A^2)$	0,997	0,0500279
Dikdörtgen	$\sigma = 13,21 - (2,375 A) + (0,1423 A^2)$	0,998	0,0478153
Üçgen	$\sigma = 14,18 - (2,644 A) + (0,1601 A^2)$	0,997	0,0679506
Paralelkenar	$\sigma = 13,47 - (2,383 A) + (0,1403 A^2)$	0,997	0,0665050
Elips	$\sigma = 10,27 - (1,885 A) + (0,1139 A^2)$	0,997	0,0544872
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	$\sigma = 9,567 - (1,703 A) + (0,1026 A^2)$	0,997	0,0489894

Standart sapma (S) ve R^2 değerlerine bakıldığında, yapılan regresyon analizinin iyi sonuç verdiği görülmektedir. Sonuçta ortaya çıkan denklemler kullanılarak elde edilen, kesit şekline göre kesit alanı ve ortaya çıkan en yüksek gerilmeler arasındaki ilişki Grafik 4 te gösterilmiştir.



Grafik 4. Kesit şekline göre kesit alanı ve ortaya çıkan en yüksek gerilmeler arasındaki ilişki

Grafikte görüldüğü üzere sonuçlar iki bölgeye ayrılmıştır. Birinci grupta keskin köşeli şekiller (dikdörtgen, üçgen, paralelkenar) 3-8 MPa aralığında gerilmeye maruz kalırken, ikinci grup olan yumuşak hatlara sahip kesitler (çember, elips, yuvarlatılmış dikdörtgen) yalnızca 2,25-6 MPa aralığındaki gerilmelere uğramıştır. İkinci grubun daha az gerilmesinin en büyük sebebi Şekil 2 den de görülebileceği üzere, kuvvetin belirli noktalara yığılması yerine kesit üzerine yayılmasıdır. Çember, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgenin uygulanan kuvvete göre daha sağlam bir yapıda olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

3.Sonuç

Oluşturulan bütün tasarımlar için öncelikle analitik metot ve sonlu elemanlar yöntemi istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada RMS değerlerinin 0'a, R^2 değerlerinin 1 e çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca ortalama yüzde hata değerleri ise boyca uzama, gerilme ve gerilme değerleri için sırasıyla 0,5571897631, 0,0004394443 ve 0,0004400554 olarak bulunmuştur. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda iki yöntem arasındaki hatanın çok düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

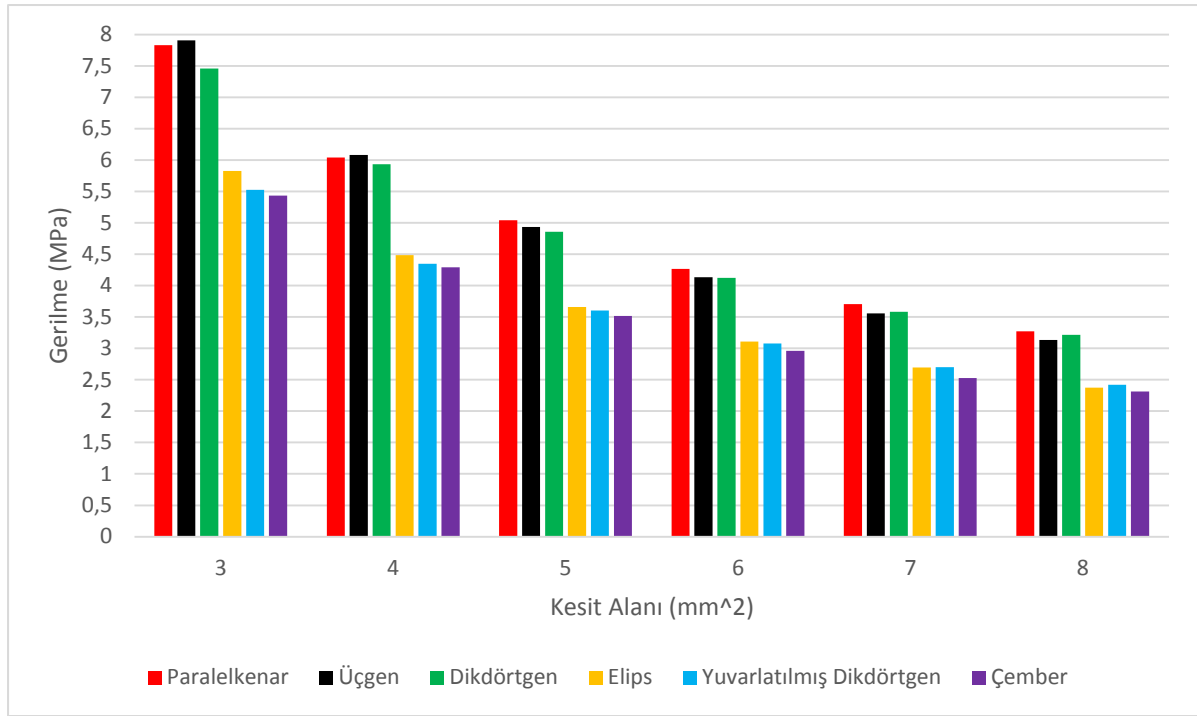
İstatistiksel analiz yardımıyla doğruluğu kesinleşen sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, bağlantı noktalarında oluşan gerilme yığılmaları incelenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen değerler regresyon analizi yardımıyla yorumlanarak grafiğe dönüştürülmüştür. Yapılan regresyon analizinde R^2 değeri 0,997'dir. Regresyon analizi sonunda ise kesit şekline bağlı olarak, kesit alanı ve oluşan maksimum gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlayan denklemler elde edilmiştir.

Kesitler arasında çembersel şeklin diğerlerinden daha etkili olduğu Grafik 4 te açıkça görülmektedir. Bu şeklin diğerlerine göre ne kadar etkili olduğunu belirlemek için regresyon analizinde de kullanılan sonlu elemanlar yönteminin sonuçları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen en yüksek gerilme ve boyca uzama değerlerinin ortalaması alınarak çembersel kesitle karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslama sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5 te gösterilmiştir.

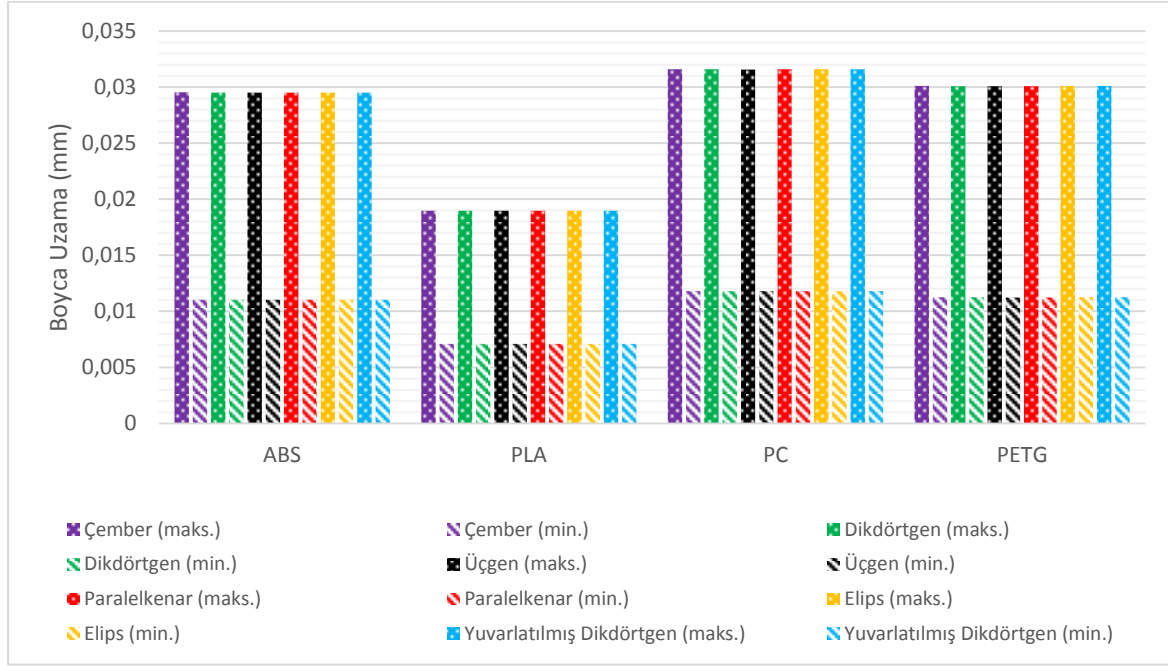
Çizelge 5. Çembersel kesitin, en yüksek gerilme ve boyca uzama değerleri için diğer kesitlere göre performansı

	Maks Gerilme Farkı (%)	Boyca Uzama Farkı (%)
Dikdörtgen	-39,34419527	+0,019003236
Eşkenar Üçgen	-41,22062292	+0,035586458
Paralelkenar	-43,83863799	+0,029140353
Elips	-5,336441278	+0,015808902
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	-3,267299548	+0,006244358

Çizelgeye bakıldığında çembersel kesitin diğer kesitlere göre kayda değer miktarda daha az gerilmeye maruz kaldığı görüldüyse de boyca uzama miktarında çok önemli bir değişim olmamıştır. Kesitler arasındaki gerilme farkları Grafik 5'te daha net olarak görülebilmektedir. Grafik 6'da ise malzeme cinsine göre kırışlarda meydana gelen en büyük ve en küçük uzamalar gösterilmiştir.



Grafik 5. 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 mm² kesit alanları için tasarımlar üzerinde oluşan gerilme yığılımları



Grafik 6. Malzeme cinsine göre kirişlerde meydana gelen en büyük ve en küçük uzamalar

Sonuç olarak yapılan tüm çalışma göz önünde bulundurulduğunda, en iyi performansı PLA malzemesinden üretilcek çembersel şeklin sergilediği görülmektedir. En kötü sonuçlar ise PC'den üretilen paralelkenar kesitine sahip tasarımda ortaya çıkmıştır. Böylelikle kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan oluşan gerilmelere bakılarak tasarımlar arasında mukavemet yönünden sıralama yapılabilmiştir. Bu sayede tasarımlar arasında %43,8 e varan performans kazanımları sağlanmıştır.

Referanslar

1. Biggins P, Hiltz J, Kusterbeck A. Bio-inspired Materials and Sensing Systems. Cambridge: RSC Pub; 2011.
2. Milovanović J, Trajanović M. Medical applications of rapid prototyping. Mechanical Engineering 2007; 5:79 – 85.
3. Gibson I. Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering. Software Conversion and Rapid Prototyping. West Sussex: John Wiley & Sons; 2005.
4. Subhransu Mohapatra, Prasad Dasappa Numerical Prediction of Stiffness and Strength of a Highly Complex Topology Optimized Thermoplastic Part designed for 3D Printing SPE ANTEC™ Indianapolis 2016.
5. Lars Krog, A. T. Application of Topology, Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components. Retrieved from Altair product design 2011.
6. Baich, Liseli, and Guha Manogharan. "Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts." International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX. 2015.
7. M. Iliescu E. Nuțu, B. Comănescu Applied Finite Element Method Simulation in 3D Printing, International Journal Of Mathematics And Computers In Simulation, Issue 4, Volume 2, 2008, 305-312.
8. Russell C. Hibbeler, Mechanics Of Materials, Pearson Education Canada 2011.
9. ANSYS Manual.

AÇIK VE KAPALI SİSTEM TASARIMININ 3 BOYUTLU YAZICILARDA PARÇA MU-KAVEMETİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gülçin EREL¹, Hatice EVLEN², Elif YILMAZ³

- 1.Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü Karabük/TÜRKİYE, gulcin.ere@gmail.com
- 2.Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü Karabük/TÜRKİYE, hakgul@karabuk.edu.tr
- 3.Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü Karabük/TÜRKİYE, elfylmz276@gmail.com

ÖZET

3 Boyutlu yazıcılar bilgisayar üzerinde modellenmiş veya 3 boyutlu olarak taranmış modelleri geleneksel üretim yöntemlerine nazaran oldukça hızlı bir şekilde üretebilen bir cihazdır. Günümüzde üç boyutlu yazıcı teknolojisi mücevher, aksesuar, ayakkabı tasarımında endüstriyel ve mimari tasarımlarda, otomotiv sanayisinde, hava-uzay, dişçilik ve tıp sektöründe, eğitimde, farklı alanlardaki bilimsel çalışmalarda birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 3 Boyutlu Yazıcılar da birçok materyal kullanılarak üretim yapılabilmektedir. En çok kullanılan iki materyal ise ABS (Akrilonitril bütadien stiren) ve PLA (Polilaktik asit) dir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada ABS (Akrilonitril bütadien stiren), PLA (Polilaktik asit) ve kompozit filamentler kullanarak ürün yazdırılabilen, genel boyutları 400x400x360 mm, mak. 160x170x120 mm ürün yazdırabilen, ısıtılabilen tablaya sahip, mekanik sisteminin etrafının kapalı olduğu kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı tasarımı ve prototipi yapılmıştır. Prototipi gerçekleştirilen yazıcıda ABS, PLA ve Power ABS filament kullanılarak mekanik sistemin etrafı açık ve mekanik sistemin etrafının kapalı olduğu iki ayrı durumda %10 , %30 ve %50 olmak üzere üç farklı doluluk oranı verilerek toplam elli dört adet numune yazdırılmıştır. Elde edilen numuneler çekme deneyine ve shore sertlik testine tabi tutulmuştur. Sonuçlar karşılaştırılarak doluluk oranının ve mekanik sistemin açık ya da kapalı oluşunun mukavemet üzerindeki etkisi ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: 3 boyutlu yazıcılar, kompozit filament, doluluk oranı

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF OPEN AND CLOSED SYSTEM DESIGN ON PRODUCT STRENGTH IN 3-DIMENSIONAL PRINTERS

ABSTRACT

3D printers are modeled on the computer or scanned as 3D is a device that can produce rather quickly as compared to traditional production methods. Today, 3d printers technology has been started to use widely to jewellery, accessories, footwear design in industrial and architectural design, automotive industry, aerospace, the dental and medical sector, education, scientific studies in various field in many countries. It can be produced using many materials in the 3D printers. ABS and PLA are that most widely used two materials.

3D printers design and prototype has been made that can be used composite filaments and ABS, PLA; the overall dimension of 400x400x360 mm, max 160x170x120 mm that can print with a heated table, rectangular type of mechanical system to be closed around. Printer that has been made to prototype to using ABS, PLA ve Power ABS filaments the surrounding of the mechanical system is closed around open and mechanical system on two separate occasions in %10, %30, %50 that has been printed a total of 54 samples given three different occupancy rate. The resulting samples were subjected to tensile test and the Shore hardness test. The results demonstrated the strength of its impact on the occupancy rate and comparing the mechanical system consisting of open or closed.

Keywords: 3-D printers, composite filament, the occupancy rate.

1-GİRİŞ

Günümüzün üretim dünyasında ürünün pazara sürüm süresinin kısaltılması firmaların rekabetçi kalabilmesi için önemlidir. Bu sürecin kısaltılmasının yanında, pazara sunumdan sonra gelececek sorun giderici tasarım gereksinimlerinin de minimize edilmesi hatta sıfırlanması bir diğer önemli, tamamlayıcı koşuldur. Küresel rekabetle birlikte ürünlerin pazardaki yaşam sürelerinin kısaltılması, ürün geliştirme süreçlerinin sıklaşmasını sağlamıştır. Her sektörde olduğu gibi üretim sektöründe artan teknolojik olanaklar ile ürün geliştirme sürecinin kısaltmaya devam ettiği gözlenmektedir. Günümüz tasarım ve üretim dünyasında müşteri odaklı ürün geliştirme artık kaçınılmaz bir gerçektir [1].

Bu noktada 1980'li yılların ortalarında başlayan hızlı prototipleme çalışmaları artık üretimin her aşamasında hızla yer alarak 1990'lı yıllarda seçici lazer sinterlemesi SLS ve seçici lazer ergitme sistemleri gelişerek metal tozlarından direkt parça imalatına geçilmiştir. Bu bağlam içindeki teknolojiler önce prototip, daha sonra parti üretiminde kullanıldıktan sonra; ürünü pazara daha da hızlı sokmak üzere, ağır üretim teçhizatının devreye alınmasına kadar seri üretimde de başarı ile kullanılmaktadır [2].

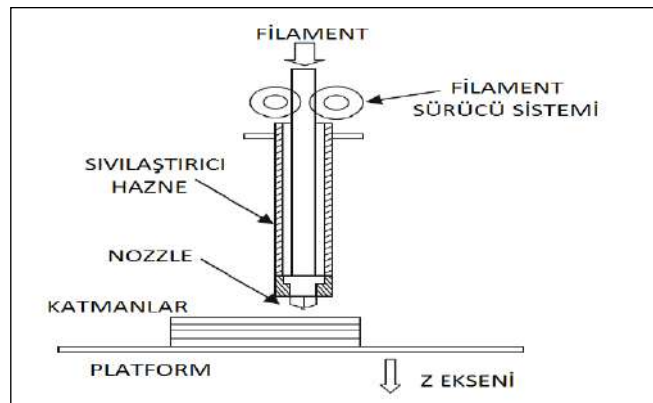
Hızlı prototipleme, parçaları veya montaj gibi birden fazla parçalar topluluğunu bilgisayar destekli tasarım ve üretim programları (CAD-CAM) kullanarak üretme tekniğidir [3].

Hızlı prototipleme sistemlerinde çok sayıda sınıflandırma yapılabilirken, bunlardan en iyisi, prototip üretiminde kullanılan malzemenin başlangıçtaki durumuna göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre hızlı prototipleme sistemleri (1) sıvı esaslı (2) katı esaslı ve (3) toz esaslı olmak üzere 3 gruba ayrılabilir. Aşağıda bu sistemlere örnekler verilmiştir.

Sıvı esaslı hızlı prototipleme sistemlerine örnek olarak Stereolitografi (SLA), Polyjet, Hızlı Dondurarak Prototipleme (RFP); Katı esaslı hızlı prototipleme sistemlerine örnek olarak Ergiyik Biriktirme Modelleme Tekniği(FDM), Tabakalı Parça imalatı(LOM), Çok Jetli Modelleme Sistemi(MJM), Plastik Levha Tabakalama(PSL), Kâğıt Tabakalama Teknolojisi(PLT), Şekil Biriktirme İmalat Prosesi(SDM);Toz esaslı hızlı prototipleme sistemlerine örnek olarak Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Lazerle Net Şekillendirme (LENS), Elektron Işınli Ergitme(EBM), Seçici Lazer Eritme(SLM) teknikleri verilebilir.[4].

Bu çalışmada kullanılan teknoloji FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisidir. Son yıllarda FDM teknolojisi, çeşitli uygulamalar için en yaygın kullanılan prototipleme yöntemlerinden biri haline geldi. Bu yöntem, kompozitler de dahil olmak üzere yeni materyalleri tasarlama ve tanıtmaya olanağı sağlayan açılır platformda erimiş fiber materyal biriktirme üzerine kuruludur. FDM'de en sık kullanılan malzeme ABS(Akrilonitril bütadien stiren), ardından PC(Polikarbonat), PLA(Poli laktik asit) dir [5].

FDM tekniğinde tel şeklindeki plastik veya mum malzeme bir nozul içerisinden ekstrüzyon edilir. Nozul içerisinde malzemeyi ergitme noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta tutacak bir ısıtıcı vardır. Bu ısıtıcı vasıtasıyla eriyen malzeme nozul içerisinden aktıktan sonra sertleşmekte ve altındaki katmana yapışmaktadır. Bu şekilde bütün katmanlar oluştuktan sonra işlem tamamlanmaktadır Şekil 1'de FDM tekniği gösterilmiştir [3].

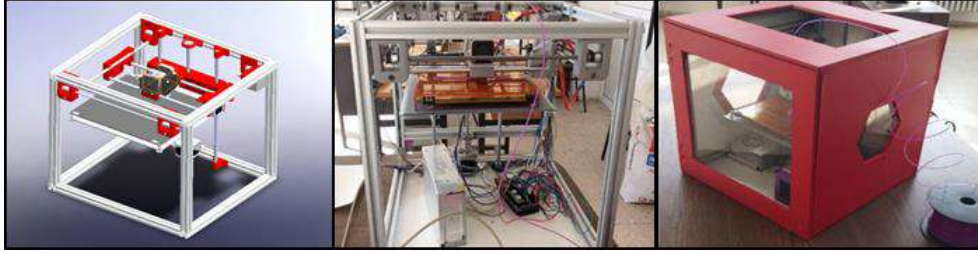


Şekil 1. Şematik FDM Tekniği

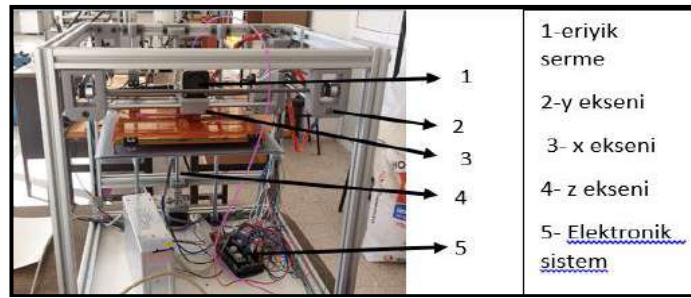
2-MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada 3 Boyutlu yazıcı tasarımı ve prototipi gerçekleştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretilmiş üç boyutlu yazıcı SolidWorks 2015 programında modellenmiştir. Prototipi yapılan 3 boyutlu yazıcı kartezyen tipi olup ısıtmalı tablaya sahiptir. İskelet sistemi (x,y,z eksenleri), elektronik sistem ve eriyik serme (ekstruder) sisteminden oluşmaktadır. Şekil 2’de tasarlanana model ve prototipi yapılan 3 boyutlu yazıcının etrafı açık ve kapalı haldeki görüntüleri bulunmaktadır.

Tasarlanan 3 boyutlu yazıcının etrafı açık durumda ve etrafı kapalı durumda, PLA,ABS ve Power ABS filament kullanılarak deney numuneleri yazdırılmıştır. Yazdırılan bu numunelerin sertlikleri ölçülmüş ve numunelere çekme testi uygulanmıştır.



Şekil 2.Prototipi yapılan 3 boyutlu yazıcının etrafı açık ve kapalı haldeki görüntüleri



Şekil 3. 3 boyutlu yazıcı kısımları

Yazıcı gövdesi sistemi motorların, millerin, vidaların, rulmanların, bağlantı elemanlarının ve diğer parçaların ağırlığını taşıyacak şekilde üretilmiştir. Bu sebeple yazıcı gövdesinde 12 adet 20x20x390 mm boyutunda sigma profiller kullanılmıştır (Şekil 3).

X eksen üzerinde eriyik serme kafasını taşımaktadır. Bu eksen Y eksen üzerine monte edilmiş olup x eksen ile senkronize hareket etmesi sağlanmıştır. Bu eksen motor ve motor miline bağlanan kasnak ve bu kasnak ile çalışan kayış yardımıyla eriyik serme kafasının x ekseninde hareketi sağlanmaktadır. Eriyik serme kafası 2 adet indüksiyonlu mil üzerinde lineer rulmanlar yardımıyla hareket etmektedir.

Y eksen hareketi motordan kayış kasnak ile aktarılır. Y ekseninde bulunan miller 3 boyutlu yazıcıda üretilmiş sabit yataklar ile sisteme yerleştirilmiştir.

Modelin yapıldığı tabla z ekseninde hareket etmektedir. Vidalı milin kaplin yardımıyla motora bağlanması ile hareket z eksenine aktarılır. Vidalı mil ile birlikte çalışan somun tabla taşıyıcı plakaya montaj edilmiştir. Sistemde ki vidalı milin haricinde 2 adet indüksiyonlu mil kullanılarak hareketin rijitliği sağlanmıştır. Bu miller tabla taşıyıcı plakaya lineer rulmanlar ile yataklanmıştır.

Eriyik serme kafasının görevi erimiş haldeki plastik malzemenin nozulun ucundan akışını sağlamaktır. Malzeme beslemesi için bir adet step motor kullanılmıştır. Eriyik serme kafasının gövdesine montajlanmış makara ve motor ucuna montajlanan dişli kasnak ile nozul ucuna 1.75 mm çapında ki plastik telin iletimi sağlanmıştır.

Üç boyutlu yazıcı için kontrol kartı, adım motoru, adım motoru sürücü devresi, ısıtıcı uç, ısıtıcı tabla gibi elektronik ekipmanlar kullanılmıştır.

Günümüzde kullanılan üç boyutlu yazıcıların kontrol kartları çoğunlukla Arduino 'ya dayanmaktadır. Bu kontrol kartlarının en temel görevleri step motorları, ısıtıcı nozul ve ısıtıcı tablayı kontrol etmektir. RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) elektronik kontrol kartı Arduino ek kartıdır. Üç boyutlu yazıcı için ihtiyaç duyulan tüm elektronik kontrol işlevini yerine getirmek için tasarlanmıştır [6].

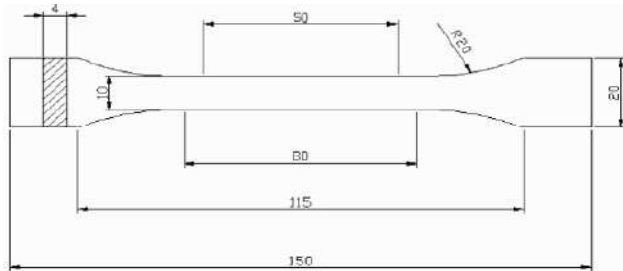
Üç eksenin kontrolü için birer adet, filament besleme kısmı için bir adet olmak üzere toplamda dört adet adım motoru kullanılmıştır. Adım motor sürücüsü üç boyutlu yazıcıda kullanılan adım motorlarının hareketini sağlamak üzere kullanılır [7].

Isıtıcı tabla baskı esnasında malzemenin yüzeye yapışmasını, çarpılmasını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. PLA malzeme için ısıtıcı zeminin kullanılması çok gerekmemekle birlikte ABS ve kompozit malzemenin baskısı esnasında mutlaka kullanılması gerekmektedir [6].

Çizelge 1.Kartezyrn tipi üç boyutlu yazıcının teknik özellikleri

Tip	Kartezyen
Genel Boyut(XYZ)	400x400x360mm
Tabla Boyut(XYZ)	160x170x120mm
Nozzle	0.3 mm
Tahrik	XY Kayış-kasnak, Z M8 vida
Tabla ısıtması	Var
Filament	1.75 mm PLA/ABS/KOMPOZİT

Deney numuneleri, yapılan 3 Boyutlu Yazıcıda üretilmiştir. Şekil 4'te belirtilen ölçülerde ki deney numunesi 3 boyutlu yazıcıda yazdırabilmesi için katı modeli Solidworks 2015 çizim programında oluşturulmuş ve Repetier Host programı kullanılarak yazdırma işlemi gerçekleştirildi. Çizelge 2 de gösterildiği gibi açık sistemde ABS, PLA, Power ABS olmak 3 farklı malzemeden %10, %30, %50 olmak üzere 3 farklı doluluk oranında 27 numune yazdırıldı ardından sistemin etrafı tamamıyla kapatılarak aynı oranlarda 27 numune daha yazıldı.



TS 1168-2, EN ISO 527

Çekme Numunesinin Geometrik Özellikleri

Toplam Uzunluk: 150 mm

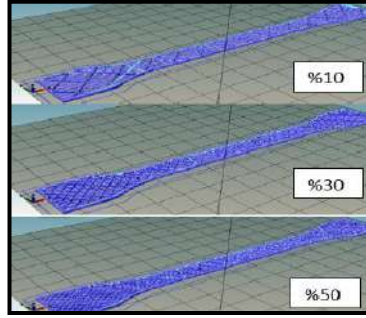
Dar Paralel Kenarlı Kısımın Uzunluğu: 80 mm

Yarıçap: 20 mm

Çizelge 2.

Kriterleri

	ABS	PLA	POWER ABS	Numune
%10	3 adet	3 adet	3 adet	
%30	3 adet	3 adet	3 adet	
%50	3 adet	3 adet	3 adet	
	9 adet ABS	9 adet PLA	9 adet Power ABS	
TOPLAM	27 adet açık ve 27 adet kapalı numune			



Şekil 5. %10, %30, %50 doluluk oranlarında CuraEngine ile dilimlenmiş numuneler

	PLA	ABS	POWER ABS
Tabla sıcaklığı	60°C	110°C	70°C
Ekstruder sıcaklığı	220 °C	240°C	230°C
Doluluk oranı	%10, %30, %50	%10, %30, %50	%10, %30, %50
Katman kalınlığı	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
Destek	Yok	Yok	Yok
Kullanılan filament	%10 için:553mm	%10 için:553mm	%10 için:553mm
(1 adet)	%30 için: 703mm	%30 için: 703mm	%30 için: 703mm
	%50 için: 853 mm	%50 için: 853 mm	%50 için: 853 mm

Çizelge 3. Yazdırma Özellikleri

Bu çalışmada ABS, PLA ve Power ABS içeren filamentlerin kullanılmasının sebebi katı eriyik biriktirme teknolojisi ile modeli oluşturan üç boyutlu yazıcılarda en yaygın olarak kullanımı tercih edilen filament türleri olmasıdır.

ABS plastik (Akrilonitril Butadin Stiren), sert bir termoplastik polimerdir. Bir petrol ürünü olan ABS aseton ile çözülebilmektedir. ABS malzemesi kullanarak yazdırılan ürünler, 20 ile 80°C arasında kullanıma uygundur. ABS malzemesinin 80°C üzerindeki bir sıcaklığa çıkılması durumunda yumuşama ve şekil bozulması yaşanabilir. ABS malzemesi yoğun güneş ışınlarına maruz bırakılırsa zarar görebilir. ABS yüksek dayanım ve darbe direnci nedeniyle üç boyutlu yazıcılarda sıkça tercih edilen bir malzeme türüdür [8].

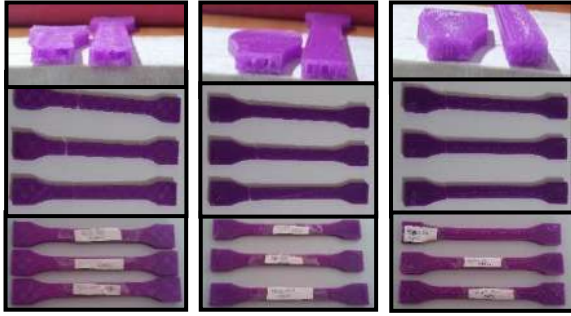
Polilaktik Asit ise şu anki istatistiklere göre en çok kullanılan üç boyutlu yazıcı malzemesidir. Bu malzemenin tercih edilmesinin başlıca sebebi düşük sıcaklıklarda eriyebilmesinden dolayı kullanımı kolaydır. Nozul erime sıcaklığı 180 °C'dir. Isıtıcı tabla kullanılmasına gerek yoktur. Polilaktik asit, ABS malzemesinden farklı olarak petrolden değil nişasta içeren ürünlerden elde edilmektedir [6].

Power ABS; ABS- PLA ve diğer baskı malzemelerinde, baskı sırasında yaşanan kalkma, yüksek yoğunlukta çatlama, zemine yapışmama, köşelerde kıvrılma gibi kronik problemlere karşı çözüm olarak geliştirilmiş kompozit bir filamenttir. Nozul erime sıcaklığı 235°C'dir. Tavsiye Edilen Kullanım ise yazdırma tablasının 80°C ye kadar ısıtılarak baskı işlemine başlanmasıdır [9].

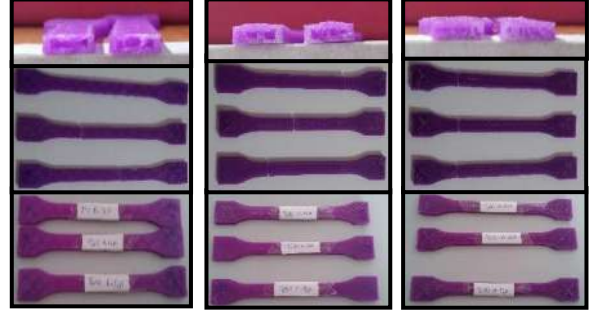
Üç boyutlu yazıcı ile üretilen deney numuneleri çekme deneyi ve shore sertlik ölçümleri yapıldı. Çekme deneyi zwick/roel z050 marka test makinası ile yapılmış olup çekme hızı 10 mm/dak alınmıştır. Sertlik ölçümü için Shahe A Shore Dijital Durometer kullanılmıştır.

3-BULGULAR VE TARTIŞMA

54 numuneye uygulanan çekme deneyi sonucu deney çubuklarında meydana gelen kopmalar ve yüzey gerilmeleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. Açık sistem PLA plastik %10, %30, %50 doluluk oranlarındaki numuneler



Şekil 7. Kapalı sistem PLA plastik %10, %30, %50 doluluk oranlarındaki numuneler

Çizelge 4. Açık ve kapalı sistemde yazdırılan numunelerin sertlik ölçümü sonucu elde edilen verileri

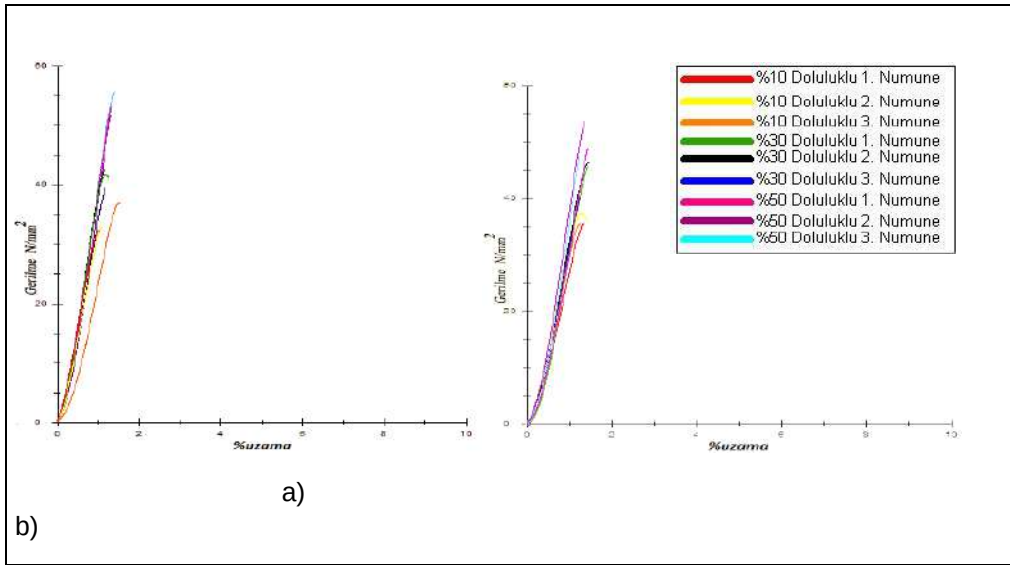
	PLA	
	Açık Sistem	Kapalı Sistem
	Ortalama Shore A	Ortalama Shore A
10%	80	73,5
30%	86,33	86,33
50%	83	89,5

PLA plastik malzemesinden yazdırılan numunelerin sertlik ölçüm sonuçlarına göre; %10 doluluk oranında ki numunelerin ortalama sertlik değeri açık sistemde 80 Shore A, kapalı sistemde 73,5 Shore A değerindedir. %30 doluluk oranında ortalama sertlik değeri açık sistemde 86,33 Shore A, kapalı sistemde 86,33 Shore A değerindedir. %50 doluluk oranındaki numuneler için sertlik sonuçları ise açık sistemde 83 Shore A, kapalı sistemde 89,5 Shore A değerindedir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça sertlik değerinde artış gözlenmiştir.

Açık ve kapalı sistemde, PLA plastikten basılmış deney numunelerinin çekme deneyi sonucu gösterdikleri gerilme ve uzama sonuçları Çizelge 5'te gösterilmektedir. %10, %30, %50 doluk oranlarının her birine ait 3 numune bulunmaktadır. Çizelgede bu değerlerin ortalamaları yer almaktadır.

Çizelge 5. Açık ve kapalı sistemde, PLA plastikten basılmış deney numunelerinin çekme sonuçları

Numune Adı	Açık Sistem		Numune Adı	Kapalı Sistem	
	Ortalama Çekme Gerilmesi	Ortalama Uzama		Ortalama Çekme Gerilmesi	Ortalama Uzama
%10	36,02	1,19	%10	38,21	1,25
%30	43,20	1,16	%30	46,02	1,34
%50	55,17	1,32	%50	51,92	1,31

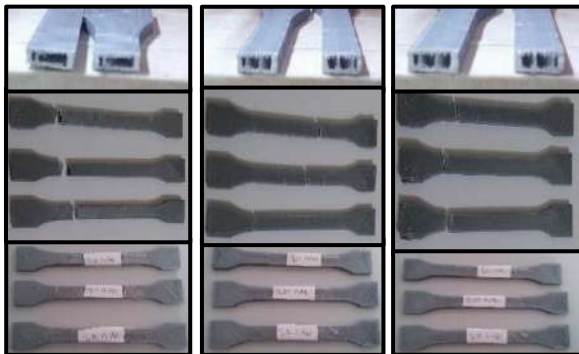


Şekil 8. a)açık ve b) kapalı sistemde yazılan PLA numuneleri çekme eğrileri

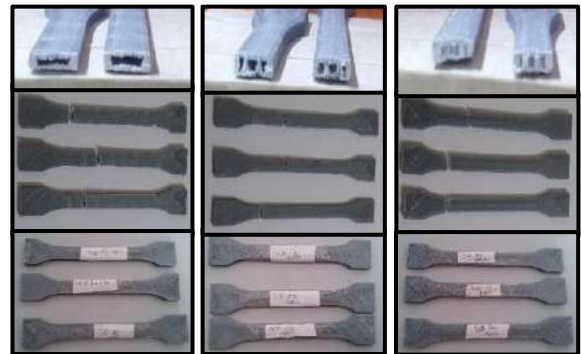
PLA plastik malzemesinden yazdırılan numunelerin çekme testi sonuçlarına göre; %10 doluluk oranında çekme gerilmeleri, açık sistemde 36,02 N/mm², kapalı sistemde 38,21 N/mm²'dir. Uzama miktarı ise açık sistemde %1,19, kapalı sistemde %1,25 oranındadır. %30 doluluk oranındaki numunelerin çekme gerilmeleri açık sistemde 43,20 N/mm², kapalı sistemde 46,02 N/mm². Uzama miktarları açık sistemde %1,16, kapalı sistemde %1,34 oranındadır. %50 doluluk oranındaki numunelerin çekme gerilmeleri açık sistemde 55,17 N/mm², kapalı sistemde 51,92 N/mm²'dir. Uzama miktarı açık sistemde %1,32, kapalı sistemde %1,31 oranındadır. Çekme testi sonuçlarına göre PLA plastik malzemesinin açık sistemden kapalı sisteme geçişte çekme gerilmelerinde ve uzama miktarlarında artış gözlenmiştir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça çekme gerilmesi ve uzama miktarında artış gözlenmiştir.

PLA, çevre dostu bir termoplastiktir, çekme gerilmesi 10-70 N/mm² arasındadır ve 1-350 arası uzama sahiptir. Yoğunlaşma polimeri olduğundan dolayı, erime sırasında çok küçük bir miktarda dahi nem ihtiva etmesi, polimer zincirlerinin bozulmasına ve moleküler ağırlığın kaybıyla birlikte mekanik özelliklerde bozulmaya sebebiyet vermektedir. PLA nem alma özelliğinden kaynaklı çekmesi yüksek olmasına rağmen kırılkan bir özellik gösterir. [10]

PLA ortamdaki nemi çok hızlı bir şekilde kapar ve PLA ile ilgili yaşanan problemlerin bir çoğunluğu da bu sebepten gerekli olan ön kurutma işleminin yeterli gerçekleştirilmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebepten dolayı PLA'nın işlenmesinden önce uygun bir şekilde kurutulması gerekmektedir. Yoğunlaşma polimeri olduğundan dolayı, erime sırasında çok küçük bir miktarda dahi nem ihtiva etmesi, polimer zincirlerinin bozulmasına ve moleküler ağırlığın kaybıyla birlikte mekanik özelliklerde bozulmaya sebebiyet vermektedir [11].



Şekil 9. Açık sistem ABS plastik %10, %30, %50 doluluk oranlarındaki numuneleri



Şekil 10. Kapalı sistem ABS plastik %10, %30, %50 doluluk oranlarındaki numuneleri

Çizelge 6. Açık ve kapalı sistemde yazdırılan numunelerin sertlik ölçümü sonucu elde edilen verileri

ABS		
	Açık Sistem	Kapalı Sistem
	Ortalama Shore A	Ortalama Shore A
10%	83	73,5
30%	93	77,33
50%	85,83	77,16

ABS plastik malzemesinden yazdırılan numunelerin sertlik ölçüm sonuçlarına göre; %10 doluluk oranında ki numunelerin ortalama sertlik değeri açık sistemde 83 Shore A, kapalı sistemde 73,5 Shore A değerindedir. %30 doluluk oranında ortalama sertlik değeri açık sistemde 93 Shore A, kapalı sistemde 77,33 Shore A değerindedir. %50 doluluk oranındaki numuneler için sertlik sonuçları ise açık sistemde 85,83 Shore A, kapalı sistemde 77,16 Shore A değerindedir. Sonuçlar doğrultusunda ABS numuneleri için Açık sistemden kapalı sisteme geçildiğinde sertlik değerinde bir azalma görülmektedir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça çekme sertlik değerinde artış gözlenmiştir.

ABS'in sertlik değerindeki azalmayı amorf bir termoplastik olması ile açıklanabileceği düşünülmektedir. Termoplastik malzemelerin sıcaklığı arttıkça yoğunluğu azalır, spesifik hacmi büyür yani molekül segmentleri birbirine uzaklaşmaya başlar. Belli bir sıcaklığa ulaştığında molekül segmentleri hareket etmeye başlar. İşte bu sıcaklığa Camı Geçiş Sıcaklığı (Tg) denir. Genelde Tg sıcaklığının altında termoplastik yapılar sert bir yapıya sahiptir. Bu nedenle kırılma özelliği taşırlar. Tg özellikle amorf malzemeler için önem taşır. Amorf malzemeler Tg sıcaklığının altında kullanılırlar. Sıcaklık daha da arttırıldığında malzeme iyice yumuşar ve akmaya başlar. ABS malzemesinin Tg sıcaklığı 100 °C'dir. Oda sıcaklığında Tg altındadır [12].

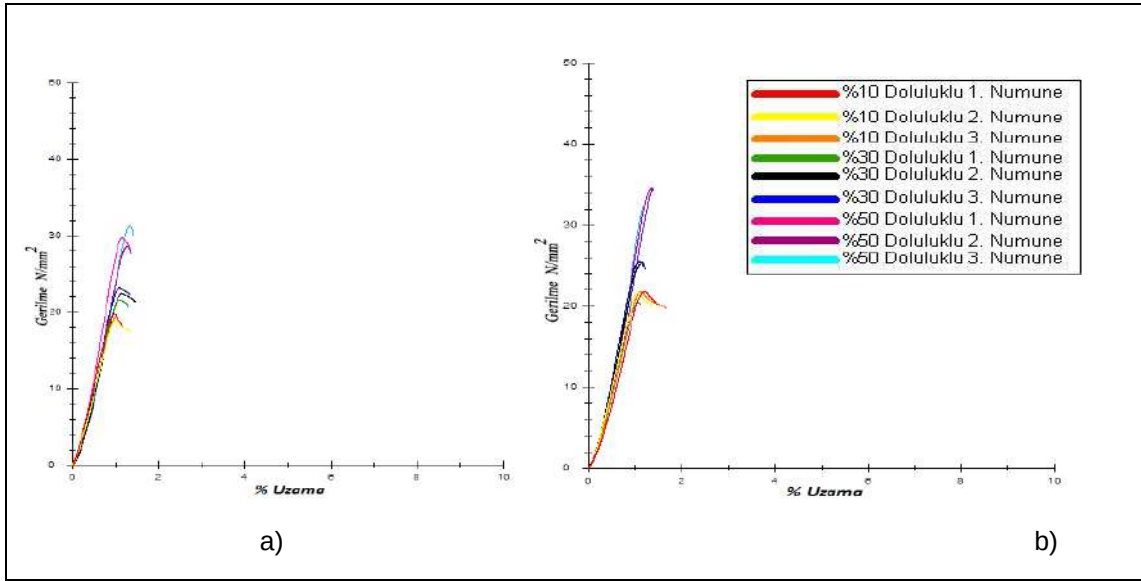
Baskı sırasında ABS malzemesi için 240 °C eritme sıcaklığı kullanılmıştır. Bu sıcaklıkta ABS, Tg sıcaklığını çoktan aşmış ve kolay şekil alabilir durumdadır. Kapalı sistemde nozuldan çıkan ergimiş ABS direk oda sıcaklığına çıkmamaktadır. Etrafı kapalı olduğu için elektronik sistemlerin ve nozuldan kaynaklanan ortam sıcaklığı oda sıcaklığının üzerindedir. Bu sebeple kapalı sistemde yazdırılan numunelerin sertlik değerlerinin daha düşük çıktığı düşünülmektedir.

ABS polimerin açık havada uzun süre kalması sonucunda fiziksel özelliklerinde azalma gözlemlenir. Bunun önüne geçmek için malzeme özel bir koruyucu filmle kaplanarak çevre koşullarına karşı direnci artırılabilir. Asit ve bazlara karşı kimyasal direnci genellikle iyidir. Ancak ketonlar, esterler ve aseton polimeri genelde çözme yönünde etkiler. Malzemenin yoğunluğu katkısız polimer için (1,02–1,07) g/cm³ arasındadır. ABS'nin elektriksel yalıtım özellikleri gayet iyidir ve bazı uygulamalarda yalıtım amaçlı da kullanılabilir. ABS malzemeler higroskopik (nem çekici) malzemeler olduğundan dolayı kullanımından önce yaklaşık 2 saat boyunca 70–80 °C'de kurutulmalıdır. PLA düşük Tg sıcaklığına (135-140C) ve yüksek çekme katsayısına sahiptir [13].

Açık ve kapalı sistemde, ABS plastikten basılmış deney numunelerinin çekme deneyi sonucu gösterdikleri gerilme ve uzama sonuçları Çizelge 7'de gösterilmektedir. %10, %30, %50 doluluk oranlarının her birine ait 3 numune bulunmaktadır. Çizelgede bu değerlerin ortalamaları yer almaktadır.

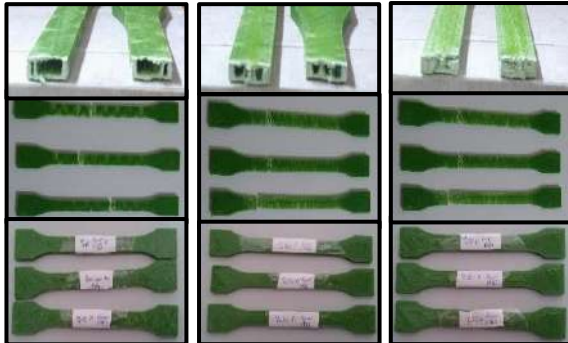
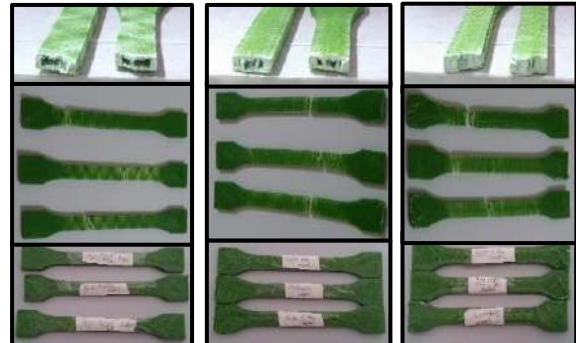
Çizelge 7. Açık ve kapalı sistemde, ABS plastikten basılmış deney numunelerinin çekme sonuçları

Açık Sistem			Kapalı Sistem		
Numune Adı	Ortalama Çekme Gerilmesi	Ortalama Uzama	Numune Adı	Ortalama Çekme Gerilmesi	Ortalama Uzama
10%	21,31	0,98	10%	23,66	1,11
30%	24,38	1,1	30%	25,51	1,08
50%	31,80	1,23	50%	35,61	1,28

**Şekil 11.** a) açık ve b) kapalı sistemde yazılan ABS numuneleri çekme eğrileri

ABS plastik malzemesinden yazdırılan numunelerin çekme testi sonuçlarına göre; %10 doluluk oranında çekme gerilmeleri, açık sistemde 21,31 N/mm², kapalı sistemde 23,66 N/mm²'dir. Uzama miktarı ise açık sistemde %0,98, kapalı sistemde %1,11 oranındadır. %30 doluluk oranındaki numunelerin çekme gerilmeleri açık sistemde 24,38 N/mm², kapalı sistemde 25,51 N/mm². Uzama miktarları açık sistemde %1,1 kapalı sistemde %1,08 oranındadır. %50 doluluk oranındaki numunelerin çekme gerilmeleri açık sistemde 31,80 N/mm², kapalı sistemde 35,61 N/mm²'dir. Uzama miktarı açık sistemde %1,23, kapalı sistemde %1,28 oranındadır. Çekme testi sonuçlarına göre ABS plastik malzemesinin açık sistemden kapalı sisteme geçişte çekme gerilmelerinde ve uzama miktarlarında artış gözlenmiştir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça çekme gerilmesi ve uzama miktarında artış gözlenmiştir.

Yapılan araştırma neticesinde Ekstrüze edilmiş ABS'nin çekme dayanımı, 175-560 kgf/cm² değerleri arasında değişebileceği ve uzama katsayısının düşük olduğu bilgisi edinilmiştir. Bu bilgi doğrultusunda bulunan sonuçların bu aralıkta olduğu görülmektedir. [14]

**Şekil 12.** Açık sistem power ABS plastik kompozit malzeme %10, %30, %50 doluluk oranlarındaki numuneler**Şekil 13.** Kapalı sistem Power ABS plastik kompozit malzeme %10, %30, %50 doluluk oranlarındaki numuneleri

Çizelge 8. Açık ve kapalı sistemde yazdırılan numunelerin sertlik ölçümü sonucu elde edilen verileri

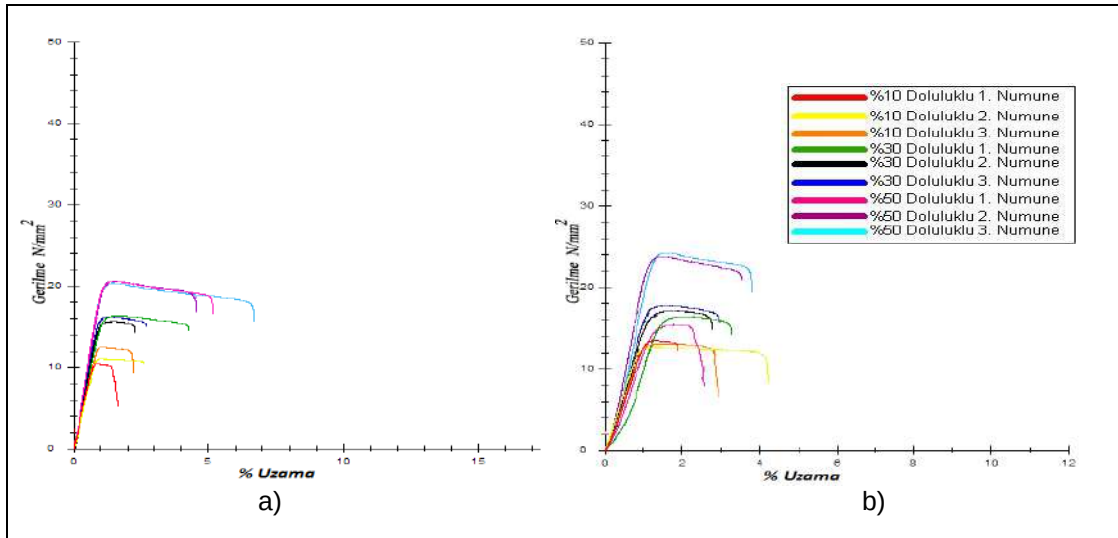
	Power ABS	
	Açık Sistem	Kapalı Sistem
	Ortalama Shore A	Ortalama Shore A
10%	89,66	74
30%	92,5	81,33
50%	92,33	89,66

Power ABS plastik malzemesinden yazdırılan numunelerin sertlik ölçüm sonuçlarına göre; %10 doluluk oranında ki numunelerin ortalama sertlik değeri açık sistemde 89 Shore A, kapalı sistemde 74 Shore A değerindedir. %30 doluluk oranında ortalama sertlik değeri açık sistemde 92,5 Shore A, kapalı sistemde 81,33 Shore A değerindedir. %50 doluluk oranındaki numuneler için sertlik sonuçları ise açık sistemde 92,33 Shore A, kapalı sistemde 89,66 Shore A değerindedir. Sonuçlar doğrultusunda Power ABS numuneleri için Açık sistemden kapalı sisteme geçildiğinde sertlik değerinde bir azalma görülmektedir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça çekme sertlik değerinde artış gözlenmiştir.

Açık ve kapalı sistemde, Power ABS plastikten basılmış deney numunelerinin çekme deneyi sonucu gösterdikleri gerilme ve uzama sonuçları Çizelge 9'da gösterilmektedir. %10, %30, %50 doluk oranlarının her birine ait 3 numune bulunmaktadır. Çizelgede bu değerlerin ortalamaları yer almaktadır.

Çizelge 9. Açık ve kapalı sistemde, Power ABS plastikten basılmış deney numunelerinin çekme deneyi sonuçları

	Açık Sistem			Kapalı Sistem	
Numune Adı	Ortalama Çekme Gerilmesi	Ortalama Uzama	Numune Adı	Ortalama Çekme Gerilmesi	Ortalama Uzama
10%	13,40	0,97	10%	14,95	1,38
30%	17,90	1,45	30%	18,95	1,80
50%	22,37	1,47	50%	22,96	1,57

**Şekil 14.** a) açık ve b) kapalı sistemde yazılan Power ABS numuneleri çekme eğrileri

Power ABS plastik malzemesinden yazdırılan numunelerin çekme testi sonuçlarına göre; %10 doluluk oranında çekme gerilmeleri, açık sistemde 13,40 N/mm², kapalı sistemde 14,97 N/mm²'dir. Uzama miktarı ise açık sistemde %0,97, kapalı sistemde %1,38 oranındadır. %30 doluluk oranındaki numunelerin çekme gerilmeleri açık sistemde 17,9 N/mm², kapalı sistemde 18,95 N/mm². Uzama miktarları açık sistemde %1,45 kapalı sistemde %1,80 oranındadır. %50 doluluk oranındaki numunelerin çekme gerilmeleri açık sistemde 22,37 N/mm², kapalı sistemde 22,96 N/mm²'dir. Uzama miktarı açık sistemde %1,47, kapalı sistemde %1,57 oranındadır. Çekme testi sonuçlarına göre Power ABS plastik malzemesinin açık sistemden kapalı sisteme geçişte çekme gerilmelerinde ve uzama miktarlarında artış gözlenmiştir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça çekme gerilmesi ve uzama miktarında artış gözlenmiştir. Power ABS malzemesi endüstriyel bir plastiktir. ABS malzemesinin özelliklerinin geliştirilmesi ile elde edilmiştir. Molekül yapısı hakkında bilgiye ulaşılmamıştır. Power ABS'i 3d yazıcıda tecrübe etmiş ve esnekliğinin ABS' göre daha fazla olduğu görülmüştür.

4-SONUÇ

Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcılarda doluluk oranlarının mekanik özelliklere etkisi, yazıcı sisteminin açık ve kapalı olma durumlarında elde edilen numunelere çekme deneyi ve sertlik ölçümü yapılarak incelenmiştir. Kapalı sistemde yazılan numunelerin açık sistemde yazılan numunelere nazaran sertlik değerinin daha düşük olduğu, çekme dirençlerinin ve % uzamalarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Farklı doluluk oranlarında elde edilen verilerde doluluk oranının arttıkça sertlik değerinin arttığı gözlenmiştir. Açık ve kapalı sistemde, 3 farklı doluluk oranında üretilen numunelerin çekme gerilmesinde ortalama %6 artış olduğu görülmüştür.

Farklı doluluk oranlarında açık ve kapalı sistemde yazdırılan numuneler genel olarak değerlendirildiğinde en yüksek çekme gerilmesi ve en düşük sertlik değerleri PLA malzemede elde edilirken, en düşük çekme gerilmesi ile en yüksek sertlik ve en yüksek yüzde uzama değeri power ABS malzemede elde edilmiştir.

5-KAYNAKLAR

- 1- Delikanlı K., Sofu M.M., Bekci U., Üretim Sektöründe Hızlı Direkt İmalat Sistemlerinin Yeri Ve Önemi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, vol. 4, sf. 33-39, 2005
- 2- Burghilde M.W., Toutaoui and Hans W.G., Rapid prototyping technology-new potentials for off shore and abyssal engeneering, 2003-jsc-314
- 3- Baş H., Yapıcı F., Ergonomik Tasarım ve Üretimde Hızlı Prototipleme teknolojisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi,21.Ulusal Ergonomi Dergisi Özel Sayısı, sf. 199-204, 2015
- 4- Çelik İ., Karakoç F., Çakır M., Duysak A., Hızlı Prototipleme teknolojisi ve uygulama alanları,Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,Sayı 31, Ağustos 2013
- 5- Dudek P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements, Archives of Metallurgy and Materials. Volume 58, Issue 4, Pages 1415–1418, December 2013
- 6-Çelik D., Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, Prototipi Ve Tersine Mühendislik Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük** (2015)
- 7 Çavdar F., Filiz H., Dogan C., Bir Hızlı Prototipleme MakiNesi Tasarımı; **Timak-Tasarım _Malat Analiz Kongresi**, - Balıkesir,317-325
- 8- Turner, B. N., Strong, R. and Gold, S. A. ,“A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling”, **Rapid Prototyping Journal**, 20 (3): 192-204 (2014). 9-
- 9-internet: Sigma 3d Printer, “Power ABS filament”,<http://www.sigma3dprinter.com/ar-ge.html?productid=62>,(2016)
- 10-Akkurt S., Abs Plastiklerinin Çekme Kopma Mukavemeti Üzerine Tavlama Sıcaklığının Etkisi, Erciyes Üniversitesi Bilim Dergisi, Sayı 3, 516-525(1987)
- 11-<http://www.biyoplastik.net/2014/01/polilaktik-asit-pla-islenirken-dikkat.html>
- 12-Ekşi O., Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Edirne (2007)
- 13-<http://teknikbil.blogspot.com.tr/2013/11/akrilonitril-butadien-stiren-abs.html>
- 14-Can C., Plastik Enjeksiyon Kalıplamada Termoplastik Malzemelerin Modelleme Ve Analizleri, Yüksek Lisans Tezi,**Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Edirne(2008)

3D BİYOBASKI İLE ANATOMİK ŞEKLİ KEMİK DOKUSU ÜRETİMİ

Pınar YILGÖR HURİ

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü

Ankara, TÜRKİYE

phuri@ankara.edu.tr

Özet

Kraniyofasiyel kemik yapıları insana kimlik hissini vermelerinin yanı sıra, beyin ve göz gibi hayati öneme sahip organları koruma görevini de üstlenirler. Kraniyofasiyel kemik hasarlarının kişiye özel üretilmiş greftlerle tedavisi yüz fonksiyon ve yapısının tedavisinde büyük önem taşımaktadır. Günümüz klinik uygulamasında kritik boyutlu kraniyofasiyel defektlerin tedavisi otolog kemik parçaları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu strateji ile idealden uzak sonuçlar elde edilebilmektedir. Otolog greftlerin yanı sıra, titanyum ağlar ve PMMA ve UHMWPE gibi biyobozunur olmayan polimerik malzemelerin de kraniyofasiyel rekonstrüksiyonda kullanımı mevcuttur. Ancak, bu gibi malzemeler kemiğin dinamik yapısı ise uyum göstermemekte, "rejenerasyon"dan ziyade yalnızca "tamir" sağlayabilmektedir. Dolayısıyla, defekt bölgesine birebir uyum sağlayacak, yapısal ve mekanik olarak doğal dokuyla uyumlu, implante edildikten sonra bozunarak ve kemik dokusunun implant içerisine büyümesine izin vererek doğal dokuyla entegre olabilecek greftlerin üretilmesi hastaların kraniyal görünüm ve fonksiyonlarının onarılmasında büyük önem taşımaktadır. Son zamanların gelişmekte olan bir araştırma alanı olan doku mühendisliği, biyomalzemeler ve otolog hücreler kullanılarak yeni tedavi seçenekleri üretilmesi konusunda ümit verici bir yöntemdir. Doku mühendisliği prensiplerinin 3D biyoyazıcı teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte ele alınmasının kemik greftlerinin hastaya özel biçimde anatomik şekilli olarak üretilmesine olanak sağlama potansiyeli vardır.

Anahtar Kelimeler: 3D biyobaskı, biyomalzeme, doku mühendisliği, greft, kraniyofasiyel

3D BIOPRINTING OF ANATOMICALLY-SHAPED BONE

Abstract:

Craniofacial bone structures gives the sense of identity and protect vital organs such as the brain and the eyes. Remediation of craniofacial bone loss with the use of personalized grafts designed to match the defect site has special importance to recapitulate structure and function. In current clinical practice, critical volume craniofacial defects are being treated using autologous bone pieces; however, the outcomes of this strategy are generally non-ideal. Besides autologous grafts, metallic materials such as titanium meshes or non-biodegradable polymeric materials including PMMA and UHMWPE are being used in the reconstruction. Such materials are not compatible with the dynamic nature of bone, and they only can provide "repair" instead of "regeneration". Therefore, it is of great importance to produce grafts that can match the defect site and the natural bone characteristics structurally and mechanically, which can degrade after implantation to allow bone ingrowth and tissue integration in order to remediate craniofacial structure and function ideally. Tissue engineering is an emerging research field creating therapy options using biomaterials and autologous cells. The joint use of tissue engineering principles with the developments in 3D bioprinting technology possess the potential to produce anatomically-shaped craniofacial bone grafts.

Keywords: 3D bioprinting, biomaterials, tissue engineering, graft, craniofacial

1. Giriş

Kemik dokusu bir kırık veya hasar sonrası kendini tamir edebilme yeteneğine sahip bir dokudur. Ancak rejenerasyon her zaman tam olarak gerçekleşmemektedir. Örneğin, çok parçalı kırıklar ve kemik tümörü çıkarılması sonucu oluşan büyük defekler tamir edilemeden kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda defektlerin yapısal ve mekanik destek sağlanması amacıyla bir dolgu malzemesi ile doldurulması gerekmektedir [1-3]. İdeal bir kemik dolgu malzemesi kemiğin gelişimine izin verecek osteokondüktif bir matris, kemik yapımını uyaracak osteoindüktif ajanlar ve kemik oluşum merkezleri yaratacak canlı osteojenik hücreler içermelidir [4]. Klinikte kullanılmakta olan dolgu malzemeleri arasında (otogreft, allogreft, ksenogreft, kadavra kemiği, demineralize kemik matrisi ve çeşitli sentetik greftler) bu üç özelliği de içeren tek greft materyali otojen grefttir ve altın standart olarak kullanılmaktadır. Ancak otojen greftlerin temininde donör saha morbiditesi ve kısıtlı kaynak gibi çeşitli problemler kullanımı sınırlandırmaktadır [5]. Klinikte kullanılan diğer malzemelerin osteoindüktif ve/ya osteojenik özellik içermemelerinin yanı sıra kendilerine özgü problemleri olması, araştırmacıları kemik dokusu oluşturulmasında yeni arayışlara itmiştir. Doku mühendisliği yöntemi günümüzde laboratuvar ortamında kemik dokusu oluşturulmasında doku nakline alternatif olarak umut veren ve gelişmekte olan bir araştırma alanı olarak görülmektedir [6]. Yöntemin prensibi hedef dokudan izole edilen sağlıklı hücrelerin hedefe uygun yapısal ve mekanik özelliklere sahip bir taşıyıcı üzerine ekilmesi ve laboratuvar ortamında mineralize doku elde edilmesinin ardından hedef bölgeye implante edilmesidir.

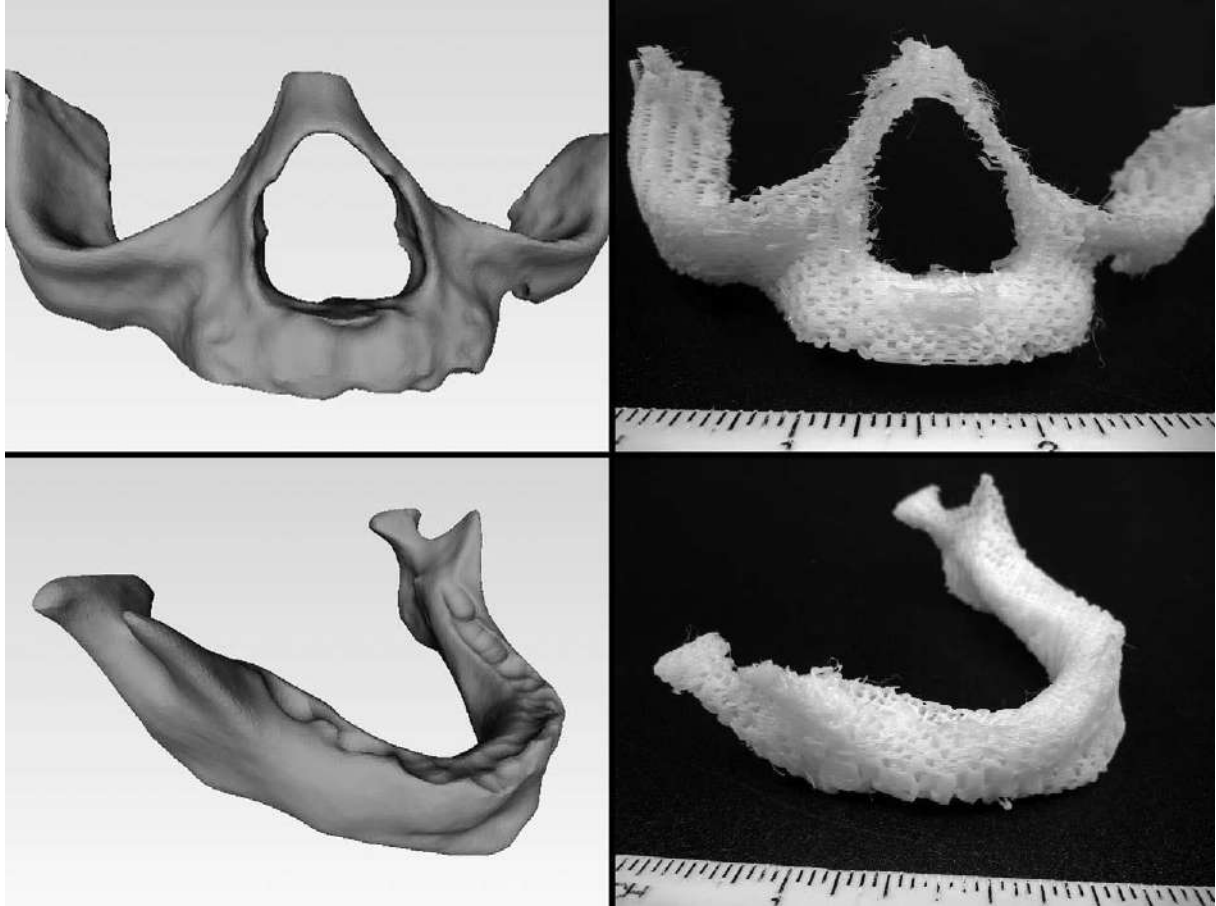
Çalışmalarımızda doku mühendisliği prensibiyle kemik grefti oluşturulmasına yönelik hibrit anatomik şekilli greft üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu 3D hibrit greft iki başlıklı biyoyazıcı kullanılarak birbiri içerisinde dağılmış iki bölümden oluşmaktadır. (1) yapısal ve mekanik bütünlüğü sağlayan sert polimerik kısım, ve (2) hücre içeren hidrojel kısım. Çalışmalarımız sonucu elde edilecek ürün klinik uygulama açısından yüksek önem arz etmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmamızda liposuction operasyonları sırasında normalde atılan atık yağ dokusu toplanmakta ve yağ kaynaklı kök hücreler (adipose-derived stem cell, ASC) enzimatik yöntem ile izole edilmektedir. Elde edilen kök hücreler aljinat temelli hidrojel malzeme içine enkapsüle edilmekte ve 3D biyoyazıcı cihazına yüklenmektedir. Aynı zamanda, grefte anatomik şekli veren kısmın 3D baskısı için poli(ε-kaprolakton) (PCL) pellet formda metal şırınga içine yüklenmekte ve şırınga içinde erimesi sağlanmaktadır. Erimiş PCL basınç yardımıyla sıkıştırılarak bir filament halinde çıkartılmakta ve aljinat ile birlikte yan yana şekilde konumlandırılarak çok katmanlı greftler tabaka tabaka şekilde üretilmektedir. Anatomik şekilli tasarım MIMICS programı kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

PCL kullanılarak ve anatomik tasarım ile 3D biyoyazıcı cihazına yüklenen g-kod ile biyozunur ve biyoyumlu, anatomik şekilli kraniyofasiyel greftlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de sol sütunda görülen anatomik modelden üretilen maksilla (üst sıra) ve mandibula (alt sıra) greftleri sunulmaktadır.



Şekil 1. Doku mühendisliği prensibi ve 3D biyobaskı yöntemi ile biyouyumlu ve biyozunur polimerik malzemeden gözenekli şekilde üretilen maksilla ve mandibula greftleri [7].

Referanslar:

1. Forrestal DP, Klein TJ, Woodruff MA. Challenges in engineering large customized bone constructs. *Biotechnol Bioeng*. 2016. doi: 10.1002/bit.26222. [Epub ahead of print]
2. Yilgor P, Yilmaz G, Onal MB, Solmaz I, Gundogdu S, Keskil S, Sousa RA, Reis RL, Hasirci N, Hasirci V. An In Vivo Study on Effect of Scaffold Geometry and Growth Factor Release on the Healing of Bone Defects. *J Tissue Eng Regen Med* 2013; 7: 687-696.
3. Welman T, Michel S, Segaren N, Shanmugarajah K. Bioengineering for Organ Transplantation: Progress and Challenges. *Bioengineered* 2015; 6(5): 257-261.
4. Demirbag B, Yilgor Huri P, Kose GT, Buyuksungur A, Hasirci V. Advanced Cell Therapies with and without Scaffolds. *Biotech J* 2011; 6(12): 1437-1453.
5. Bonda DJ, Manjila S, Selman WR, Dean D. The Recent Revolution in the Design and Manufacture of Cranial Implants: Modern Advancements and Future Directions. *Neurosurgery* 2015; 77(5): 814-824.
6. Orlando G, Soker S, Stratta RJ, Atala A. Will regenerative medicine replace transplantation? *Cold Spring Harb Perspect Med*. 2013; 3: a015693
7. Temple JP, Hutton DL, Hung BP, Yilgor Huri P, Cook CA, Kondragunta R, Jia X, Grayson WL. Engineering Anatomically-Shaped Vascularized Bone Grafts with hASCs and 3D-Printed PCL Scaffolds. *J Biomed Mater Res A* 2014; 102A: 4317-4325

3 BOYUTLU BASKISI YAPILACAK ANKASTRE KİRİŞLERİN EŞİT MİKTARDA FİLAMENT KULLANIMI İLE EĞİLME MUKAVEMETİNE GÖRE KESİT GEOMETRİSİ OPTİMİZASYONU

Hüseyin Alp ÇETİNDAG^a, İhsan TOKTAŞ^b, Murat Tolga ÖZKAN^c

a, Institute of Natural and Applied Sciences, Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey,

E-mail: h.a.cetindag@outlook.com

b, Yıldırım Beyazıt University, Mechanical Engineering Department 06020 Keçiören, Ankara, Turkey,

E-mail: itoktas@ybu.edu.tr

c, Gazi University Faculty of Technology, Industrial Design Engineering Department, 06500 Ankara, Turkey

E-mail: mtozkan06@yahoo.com

Özet

Bu çalışmada, aynı kesit alanı ve uzunluğundaki, eşit miktarlarda filament kullanımı ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin eğilme mukavemeti yönünden en iyi mekaniksel özelliği sağlayan kesit geometrilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle, hızlı modellemede ve plastik parçaların üretiminde sıkça kullanılan filament miktarı, üretim zamanı ve harcanan enerjiden bağımsız olarak, tasarımlar arasında performansa göre bir sıralama yapılmıştır. Ankastre kirişlerin tasarımların uzunluğu ve uygulanan kuvvetler sabit tutulmuş, içi dolu temel kesit geometri biçimleri (çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralel kenar, elips ve köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen) değiştirilmiştir. Ayrıca, dört farklı filament malzemesi, eğilme mukavemeti yönünden karşılaştırılmıştır. 6 kesit şekline, 101 kesit alanına ve 4 farklı malzemeye bağlı olarak toplam 2424 adet tasarım alternatifi oluşturulmuştur. Bu tasarım alternatifleri, önce matematiksel olarak modellenmiş, sonra sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi ile test edilmiştir. Tüm modellerin istatistiksel analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en düşükten büyüğe doğru gerilmelere ve deformasyonlara uğrayan kesit geometrisi biçimleri sıralanmıştır.

Anahtar Kelimeler: filament, ankastre kiriş, eğilme, optimizasyon

OPTIMIZATION OF CROSS SECTIONAL GEOMETRY OF 3D PRINTED BEAMS ACCORDING TO PURE BENDING STRENGTH WITH THE SAME AMOUNT OF FILAMENT

Abstract

In this study, it was intended to specify the cross sectional geometries of beams which offer the best mechanical performance according to pure bending stress. These beams which were 3D printed with the same amount of filament have same cross sectional area, length and volume. Thus, the ranking between designs can be performed independently from the amount of filament, printing time and energy consumption. Geometry of cross section was changed but length of beams and applied forces were kept constant for all design points. These geometries were selected as, circle, rectangle, equilateral triangle, rhombus (diamond), ellipse and rounded rectangle. Additionally, four different printing material were applied to these design points for comparison. Depending on 6 different cross sectional geometry, 101 cross sectional area and 4 different material, 2424 design alternative created in total. First of all, mathematical model of these designs were constructed, then they were tested by using finite element method (FEM) and regression analysis. All model branches were compared to each other with the statistical analysis. As a result of all analyses, design alternatives were sorted according to stress and deformation performance.

Keywords: filament, beam, bending, optimization

1. Giriş

Kesit şekli ve malzeme cinsi, üretilen ürünün gerilme ve gerinim değerlerini etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan kesit geometrisine göre bir dayanıklılık sıralamasının yapılması gerekmektedir. Literatürde farklı kesit tiplerine göre ayrı ayrı yapılmış çalışmalar mevcut olmakla birlikte, kesit geometrisi ve eşit miktarda malzeme kullanımına göre bir dayanıklılık sıralama yapılmamıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü eşit miktarda malzeme kullanarak, zorlanma şiddetine bağlı olarak eğilme değerlerine dayalı malzeme cinsine göre kesit sıralaması yapılmasıdır.

Günümüzde 3B baskı ve yazıcılar, özellikle ağır sanayiler dışındaki ofislerimizde RP'ye (Rapid Prototype) kolay bir yol desteklemekte ve bize farklı malzeme türüne izin vermektedir. Mücevher, ayakkabı, endüstriyel tasarım, mimarlık, otomotiv, havacılık, dişçilik ve tıbbi endüstriler gibi birçok farklı alan bu tekniği kullanmaya başladı [1]. En önemli uygulamalardan bir tanesi, tasarım geliştirme ve tıbbi modellerin imalatıdır ve bunun sayesinde cerrahi planlamadan önce sanal ve fiziksel anatomik modellerin üretimi amaçlanmaktadır [2,3]. Katkı imalatı veya 3B baskı, şirketlerin şu ana kadar imkânsız olduğu düşünülen şekillerin üretimine izin vererek ürünler üretme biçiminde devrim meydana getirdi. Bu, malzemelerin yük koşulları altında en iyi performans için gerekli olan kesin konumlara yerleştirilmiş parçaları tasarlamamanın avantajını sağlar. Bununla birlikte, bu teknoloji ağırlık-performans perspektifinden faydalanırken, sonlu elemanlar analizi ve performans öngörülerini için ayrıştırılması zor olan oldukça karmaşık şekillere neden olur. Bu zorluk, açık çözümlerin tipik olarak kullanıldığı bileşen arızaları gibi son derece doğrusal olmayan olayları tahmin ederken daha da belirginleşti. Geleneksel olarak, benzer elemanlar için tetrahedral elemanlara kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha düşük simülasyon maliyetlerinden ötürü açık altı çözümlerde altı yüzlü elemanlar kullanılır. Bununla birlikte, topoloji optimizasyonu ile üretilen oldukça karmaşık şekiller, altı yüzlü elemanlar kullanılarak örgü yapmak kesinlikle yasaktır. Dolayısıyla rijitlik ve daha özel olarak mukavemet sayısal tahmini, 3B baskılı parçalar için zorlu bir önerme haline gelir [4,5]. Farklı bir çalışmada, dolgu deseni seçiminin ve çeşitli mekanik özelliklerin maliyet ve üretim sürelerinin belirlenmesi için tasarım parametrelerini belirlenmesi hedeflemiştir. Bunun için farklı zorlanmalar için deneysel ve FEA analizleri yapılmıştır [7].

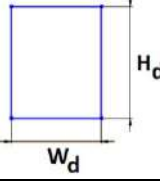
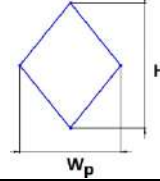
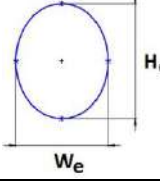
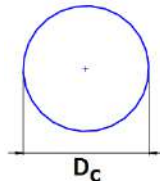
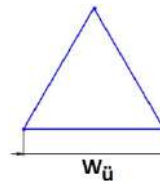
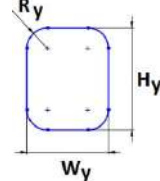
Bu çalışma, 3B baskı aracılığıyla üretilen ürünlerdeki eğilme mukavemeti ve gerinimi regresyon analizi, sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çözüm aracılığıyla elde edip karşılaştırmayı hedeflemektedir. Bu sayede kullanılan malzeme ve harcanan enerjiden bağımsız olarak daha sağlam tasarımlar elde edilmiş olacaktır.

2. Yöntem

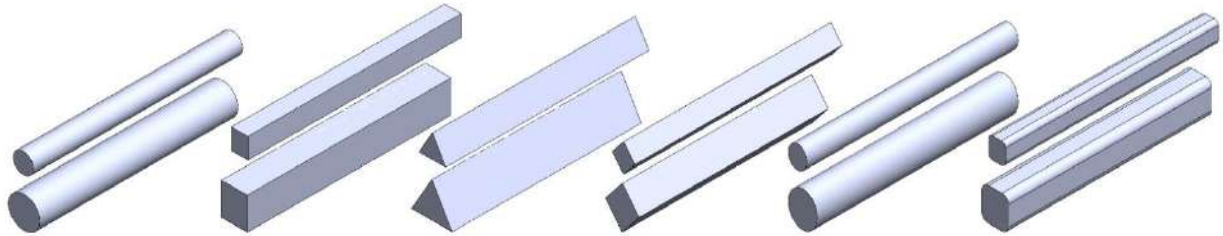
2.1. Tasarımların Hazırlanması

Analiz ve hesaplamalarda kullanılması için üç temel ana şekil (çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen) kullanılmış, daha sonra bunlara paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen de eklenmiştir. Bu şekilleri oluşturan ölçüler arasındaki en, boy ve çap oranları sabit tutulmuştur. Elde edilen bu oranlar Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Seçilen kesit geometrileri ve bu şekillere ait ölçüler.

Dikdörtgen		Paralelkenar		Elips	
	$H_d / W_d = 1,5$		$H_p / W_p = 1,5$		$H_e / W_e = 1,5$
	H_d : min: 1,936 mm, max: 3,162 mm W_d : min: 1,549 mm, max: 2,530 mm		H_p : min: 2,739 mm, max: 4,472 mm W_p : min: 2,191 mm, max: 3,578 mm		H_e : min: 2,185 mm, max: 3,568 mm W_e : min: 1,748 mm, max: 2,855 mm
Çember		Üçgen (eşkenar)		Yuvarlatılmış Dikdörtgen	
	$D_ç$: min: 1,954 mm, max: 3,192 mm		$W_ü$: min: 2,632 mm, max: 4,210 mm		$H_y / W_y = 1,5$
					$W_y / R_y = 4$ H_y : min: 1,97 mm, max: 3,232 mm W_y : min: 1,584 mm, max: 2,586 mm R_y : min: 0,396 mm, max: 0,646 mm

Seçilen bu kesitlerin kiriş uzunlukları 20 mm, kesit alanları ise 3 mm² den 8 mm² ye kadar 0,05 mm² aralıklarla arttırılmıştır. Bu sayede 101 adet kesit alanı elde edilmiştir. Çalışmada yer alan en büyük ve en küçük kesit alanına sahip tasarımlar Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1. Soldan sağa doğru sırasıyla; çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen şeklindeki kesitlere sahip tasarımlar. (Kesit alanı üstte 3 mm², altta ise 8 mm² dir)

Altı adet kesit geometrisi ve 101 adet kesit alanı kullanılarak elde edilen 606 tasarıma 3B baskı tekniğinde sıkça kullanılan; ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ve PC (Polycarbonate) malzemeleri uygulanmıştır.. Bu sayede toplam 2424 adet birbirinden farklı tasarım oluşturulmuştur. Kullanılan bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2 de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

	Elastikite Modülü (Eğilme)	Poisson's Oranı	Özkütle - ρ -
ABS	2250 MPa	0,35	1,05 g/cm ³
PLA	3500 MPa	0,36	1,24 g/cm ³
PETG	2100 MPa	0,4	1,27 g/cm ³
PC	2344 MPa	0,37	1,21 g/cm ³

2.2. Analizlerin Yürütülmesi

Elde edilen bütün tasarımlar aynı moment çifti altında analiz edilmiştir. 200 N büyüklüğündeki bu moment çifti kirişin iki ucuna uygulanmıştır. Öncelikle bilindik mukavemet formülleri kullanılarak hesaplamalar yapılmış, sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (F.E.M.) ve regresyon analizi kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışmalar istatistiksel olarak karşılaştırılarak, mukavemet yönünden güçlü tasarımların saptanması amaçlanmıştır.

2.2.1. Analitik Hesaplama

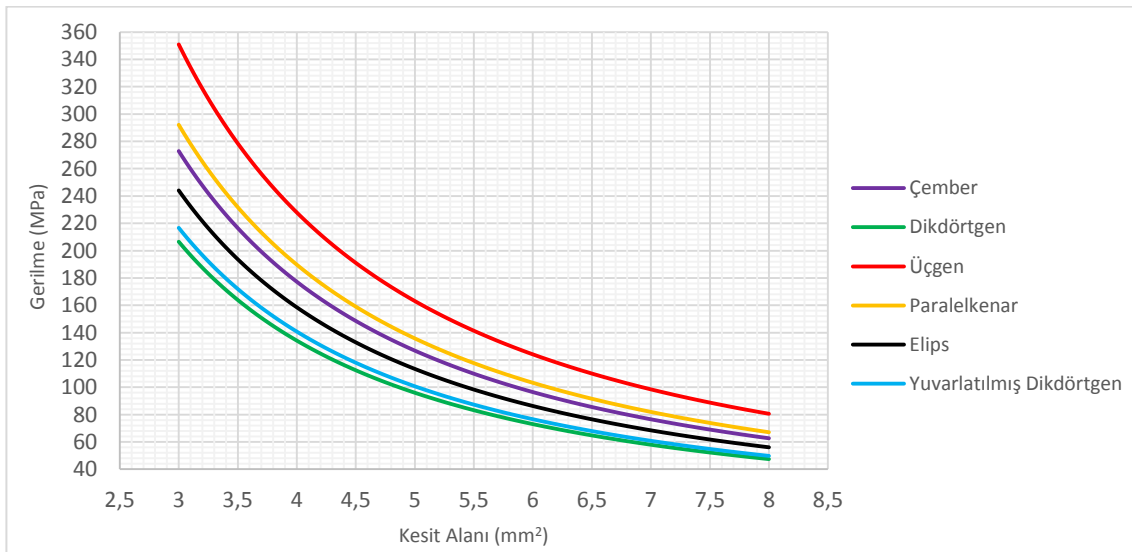
Maksimum eğilme gerilmesi Denklem (1), gerinme ve radyal yer değiştirme ise sırasıyla Denklem (2) ve Denklem (3) ile hesaplanmıştır [8].

$$\sigma_n = \frac{M * c_{maks.}}{I_{maks.}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_n}{E} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

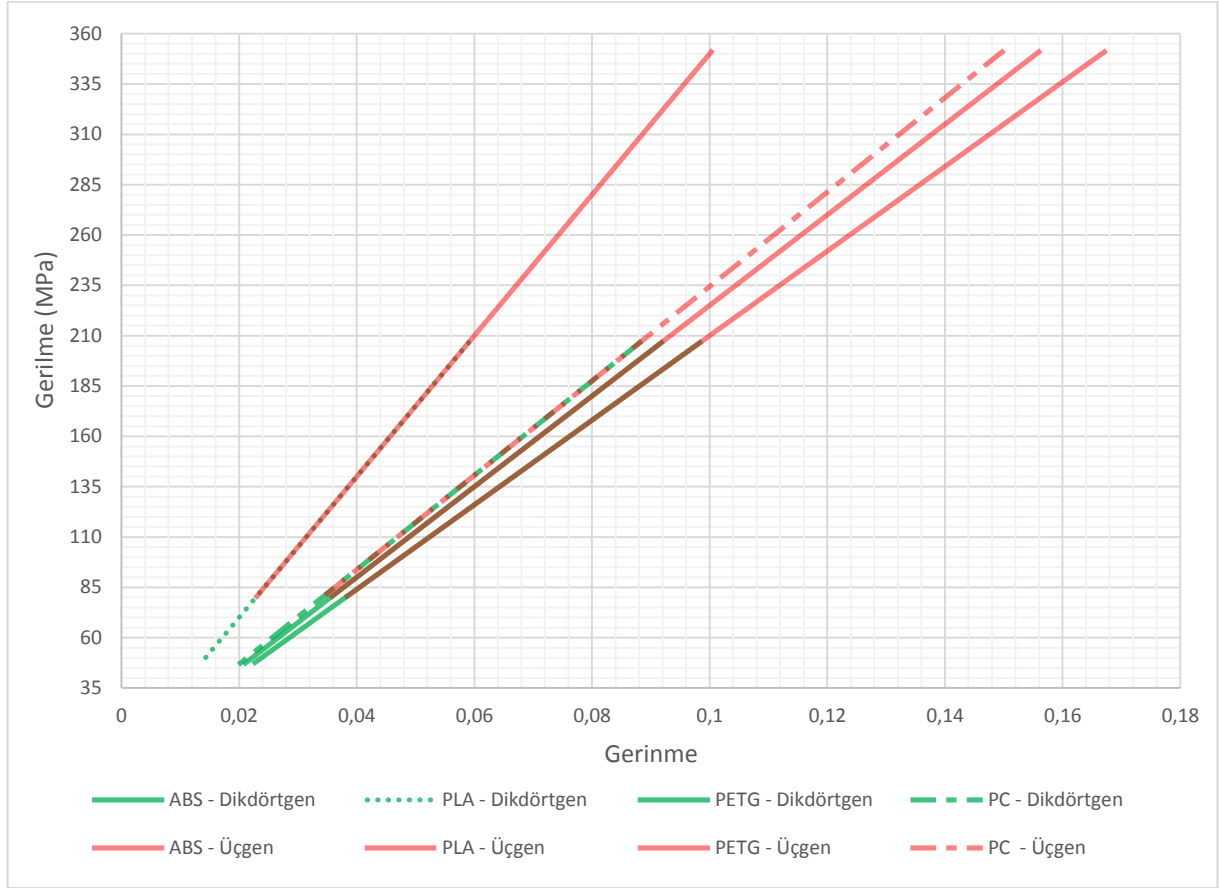
$$\delta_{maks.} = \frac{M * L^2}{2 * E * I_{maks.}} \quad (3)$$

Burada σ_n ortaya çıkan maksimum gerilmeyi, M uygulanan momenti, c kütle merkezine olan uzaklığı, I , c doğrultusundaki eylemsizlik momentini, ε gerinmeyi, L kirişin uzunluğunu, E ise elastikiyet modülünü ifade etmektedir. Bu hesaplamalarda c ve I değerlerini etkilediği için kesit şekli son derece önemlidir. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



Grafik1. Seçilen malzemeler için kesit alanının oluşan gerilmeye etkisi

Elde edilen grafiğe bakıldığında üçgen kesite sahip şeklin en yüksek gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir. Stres yoğunluğunun en düşük olduğu kesit ise dikdörtgen olmuştur. Bu iki kesit alanına dört farklı malzemenin uygulanması sonucunda Grafik 2 elde edilmiştir.



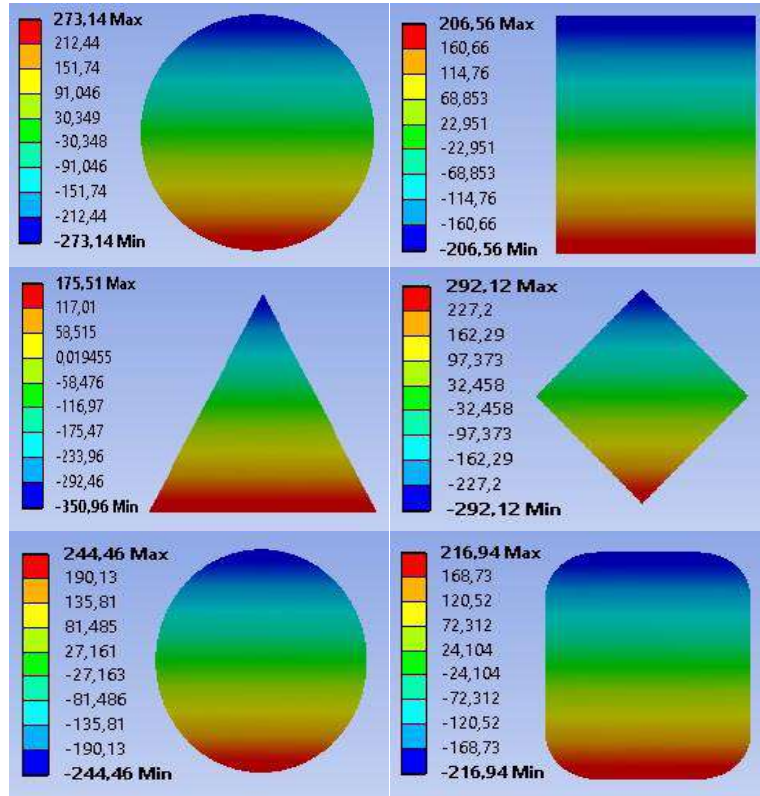
Grafik 2. Seçilen malzemeler için gerilmenin gerinme üzerine etkisi

Kesit şeklinin yanı sıra malzemenin de büyük bir etkiye sahip olduğu Grafik 2 de görülebilmektedir. En yüksek mukavemeti gösteren PLA malzemesi ve dikdörtgen kesit ile elde edilen kiriş en güçlü tasarım olmuştur. Bunun dışında arzu edilen gerilme değerine göre kesit şekli, kesit alanı ve malzeme cinsine göre seçim yapmak Grafik 2 sayesinde mümkün olmuştur.

2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Oluşturulan katı modeller ANSYS'te sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmüştür. Çözümlemelerden önce yapılan "mesh" uygulamasında parçaları oluşturan "element" ve "node" sayılarına dikkat edilerek, tasarımları en iyi şekilde analiz edecek "mesh" yapılarının kurulmasına özen gösterilmiştir. Daha sonra parametrik tasarım aracılığıyla bütün modeller sistematik bir şekilde çözümlenmiştir.

Analiz kurulumlarında modeller hiçbir şekilde sabitlenmemiştir. Bunun yerine iki uçtaki yüzeylerden zıt yönlü 200 Nmm büyüklüğünde momentler uygulanarak denge sağlanmıştır. Analizler sonucunda bükülmeden kaynaklanan maksimum yer değiştirme, parçanın genelinde ve parçanın orta kesitindeki gerilme ve gerinmeler elde edilmiştir. Parçaların orta kesitinde meydana gelen gerilmeler Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. 3mm² kesit alanına sahip tasarımların ortasında oluşan gerilmeler

Yukarıda görüldüğü üzere parçalar ağırlık merkezinin üstünde “basma”, altında ise eşit büyüklükte “çekme” gerilmesine maruz kalmıştır. Bu duruma uymayan tek tasarım eşkenar üçgen kesite sahip olanıdır. Eşkenar üçgen dikey doğrultuda simetrik değildir ve ağırlık merkezi aşağıdan yukarıya doğru ölçüldüğünde toplam yüksekliğin üçte biri kadardır. Bu yüzden üçgen kesitli parçaların üst kısmında oluşan gerilme alt kısımda oluşan gerilmenin iki katı kadardır. Elde edilen sonuçlar analitik hesaplamalarla karşılaştırıldığında aradaki farkın çok düşük olduğu görülmüştür. Bu fark istatistiksel analiz yapılarak incelenmiştir. Bu incelemede aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır;

$$RMS = \left(\frac{1}{p} * \sum_j |t_j - c_j|^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - t_j)^2}{\sum_j c_j^2} \right) \quad (5)$$

$$Ort. \% Hata = \frac{\sum_j \left(\frac{t_j - c_j}{t_j} * 100 \right)}{p} \quad (6)$$

Denklem 4, denklem 5 ve denklem 6 kullanılarak deformasyon, gerilme ve gerinim sapmaları bulunmuştur. Kesit alanı, kesit geometrisi veya malzeme gözetmeksizin yapılan bu hesaplamalar sayesinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin doğruluğu belirlenmiştir. Bunun yanında herhangi bir tasarımda ortaya çıkan en büyük ve en küçük sapmalar da saptanmıştır. Elde edilen bu değerler Çizelge 3 te verilmiştir.

Çizelge 3. Deformasyon, kirişlerin ortasındaki gerinme, gerilme hesaplamaları için analitik çözüm ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki sapma değerleri

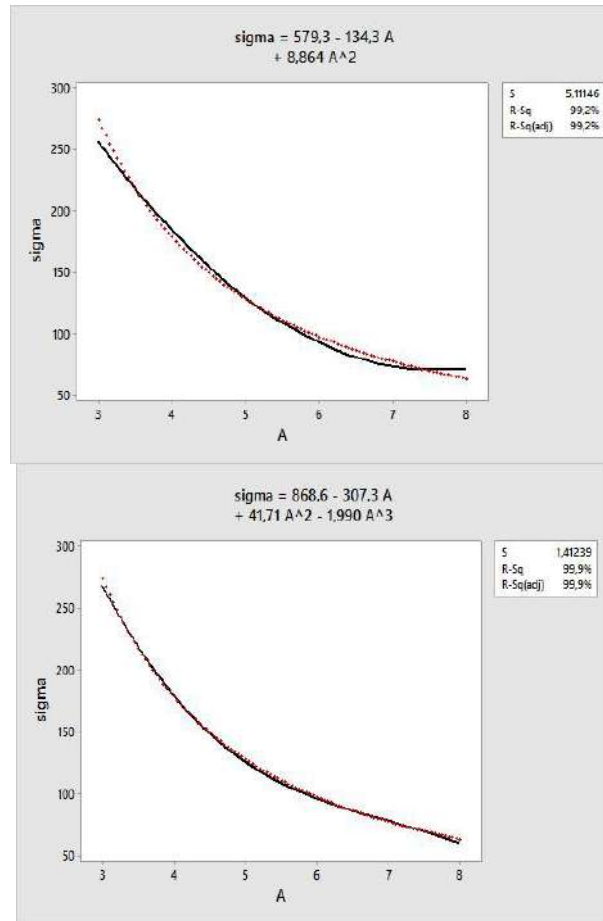
	RMS	R ²	Ort. % Hata	Maks. Sapma (%)
Deformasyon	0,0122010625	0,9999158350	0,7320639983	0,0341989350
Gerinme	0,0000645068	0,9999999172	0,0813308379	0,0004857430
Gerilme	0,2541693643	0,9994749253	0,1028730135	1,8780593900

Düşük sapma gösteren bir karşılaştırmada “RMS” ve “ R^2 ” değerlerinin sırasıyla 0 ve 1’e yakın, “Ort % Hata” değerinin ise 7 den düşük olması gerekmektedir. Gerilme analizlerindeki sapma değerleri deformasyon ve gerilme değerlerine göre biraz daha yüksek olsa da bütün değerler yapılan sonlu elemanlar yönteminin yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

2.2.3. Regresyon Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi ve analitik hesaplamalarda normal gerilme ve normal gerilmeler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu ortaya çıkarsa da kirişler üzerinde oluşan gerçek gerilme ve gerilmeler tam olarak belirlenememiştir. Bu gerçek (von-Mises) gerilme ve gerilme değerleri sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplandıktan sonra regresyon analizi ile elden geçirilmiştir.

Regresyon analizinde çıktılar gerilme, girdiler ise kesit alanı olarak belirlenmiştir. Model olarak İkinci derece regresyon seçilmiş, güvenilirlik seviyesi %95 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan istenen verim alınamadığı için ikinci derece yerine üçüncü dereceden regresyon analizi yapılmıştır. Çembersel kesit için hem ikinci dereceden hem de üçüncü dereceden oluşturulan regresyon modelleri Grafik 3 te birlikte gösterilmiştir.



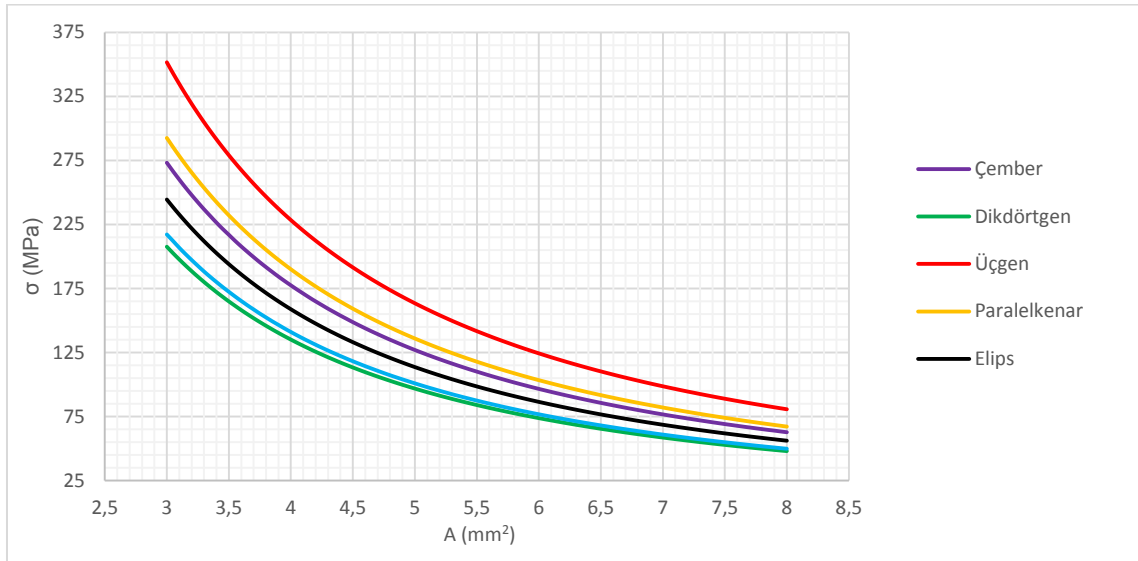
Grafik 3. Dairesel alana sahip kiriş için yapılan ikinci (solda) ve üçüncü (sağda) dereceden regresyon analizleri

Grafikte kırmızı noktalar girilen değerleri, siyah çizgi ise oluşturulan eğriyi göstermektedir. Yukarıda gösterilen eğrilere bakıldığında sağdakinin soldakine göre daha iyi bir uyum sağladığı açıkça görülmektedir. Aynı yöntemle diğer kesit alanları için elde edilen “gerilme-kesit” alanı denklemleri Çizelge 4 te verilmiştir.

Çizelge 4. Regresyon analizi sonucu elde edilen denklemler ve katsayılar (σ = gerilme, A = kesit alanı)

	Denklem	R^2	S
Çember	$\sigma = 868,6 - (307,3 A) + (41,47 A^2) - (1,990 A^3)$	0,999	1,41239
Dikdörtgen	$\sigma = 658,2 - (22,5 A) + (31,54 A^2) - (1,505 A^3)$	0,999	1,06725
Üçgen	$\sigma = 1117 - (395,2 A) + (53,62 A^2) - (2,559 A^3)$	0,999	1,81542
Paralelkenar	$\sigma = 930,3 - (329,2 A) + (44,67 A^2) - (2,132 A^3)$	0,999	1,51196
Elips	$\sigma = 777,2 - (275,0 A) + (37,32 A^2) - (1,781 A^3)$	0,999	1,26565
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	$\sigma = 691,6 - (244,9 A) + (33,25 A^2) - (1,587 A^3)$	0,999	1,12523

R^2 değerlerine bakıldığında hepsinin de “1” e çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sayede yapılan regresyon analizlerinin iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır. Çizelge 4’ teki denklemler kullanılarak Grafik 4 oluşturulmuştur.

**Grafik 4.** Regresyon analiziyle elde edilen maksimum gerilme değerlerinin kesit alanına göre değişimi

Yukardaki grafiğe bakıldığında, kesit şekli performansı bakımından Grafik 1’e benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Kirişin orta kesitinde olduğu gibi, parça genelinde de en büyük ve en küçük gerilmeler sırasıyla üçgen ve dikdörtgen kesitlerde ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan gerilmelerin büyüklüğü ise Grafik 1 den oldukça farklı olup gerçeğe daha yakındır.

3.Sonuç

Bütün kiriş çeşitleri önce analitik olarak çözümlenmiş daha sonra sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu iki yöntem kıyaslandığında Ort%Hata değerleri deformasyon, gerinme ve gerilme değerlerinin için sırasıyla 0,7320639983, 0,0813308379 ve 0,1028730135 olduğu görülmektedir. Elde edilen bu düşük sapma değerleri sayesinde yapılan sonlu elemanlar analizinin doğruluğu kanıtlanmıştır.

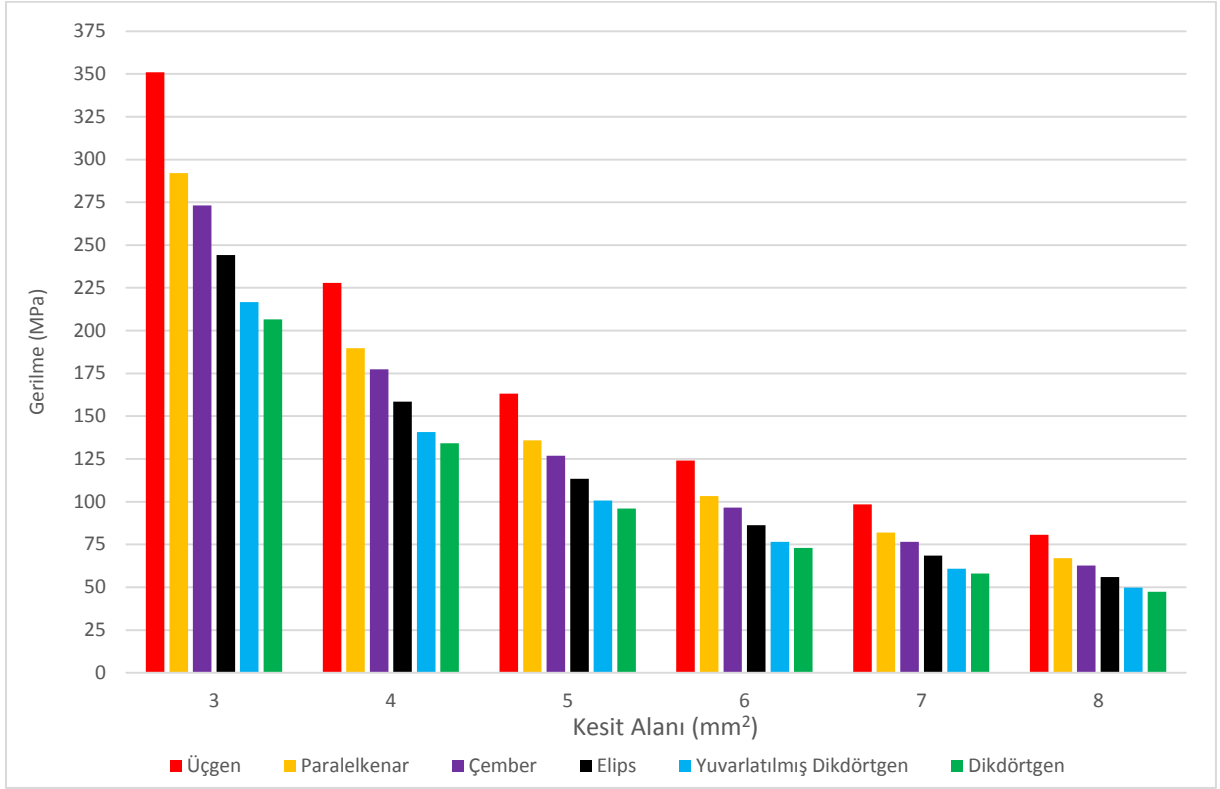
Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen gerçek stres değerleri regresyon analizi ile incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda kesit şekline bağlı olarak, kiriş üzerinde oluşan en büyük gerilmenin kesit alanına bağlı denklemleri elde edilmiştir. Regresyon analizinin R^2 değeri 0,999’dur ve bu değerin 1’e yakınlığı kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermektedir.

Ortaya çıkan gerilme yönünden dikdörtgenin en iyi performansı sergilediği Grafik 1 ve Grafik 4 te açıkça görülmektedir. Bu kesit şeklinin diğer kesit geometrilerine göre performansı Çizelge 5 te verilmiştir. Çizelgede yer alan değerlerin başındaki “-” işareti performansın ideale göre daha düşük olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5 Kesit geometrilerinin gerilme yönünden Dikdörtgen kesite göre performansı

Performans (%)	Yuvarlatılmış Dikdörtgen	Elips	Çember	Paralelkenar	Üçgen
	-4,910	-18,164	-32,232	-41,421	-69,904

Çizelge 5'te de görüldüğü üzere kesitler arasında %69,7 lere varan gerilme farkları oluşmuştur. En düşük fark ise dikdörtgen ve yuvarlatılmış dikdörtgen arasındaki %4,9 luk farktır. Dikdörtgenin köşelerindeki yuvarlatma işlemi bu farkın oluşmasının temel etkenidir. Bunun dışında elips, çember ve paralelkenar sırasıyla %18, %32 ve %41 daha düşük performans sergilemiştir. Oluşan gerilmeler sadece kesit şekli ve kesit alanına bağlı olduğundan malzemeler dikkate alınmamıştır. Kesitler arasındaki gerilmeye dayalı ilişkiyi daha iyi göstermek amacıyla Grafik 5 oluşturulmuştur.



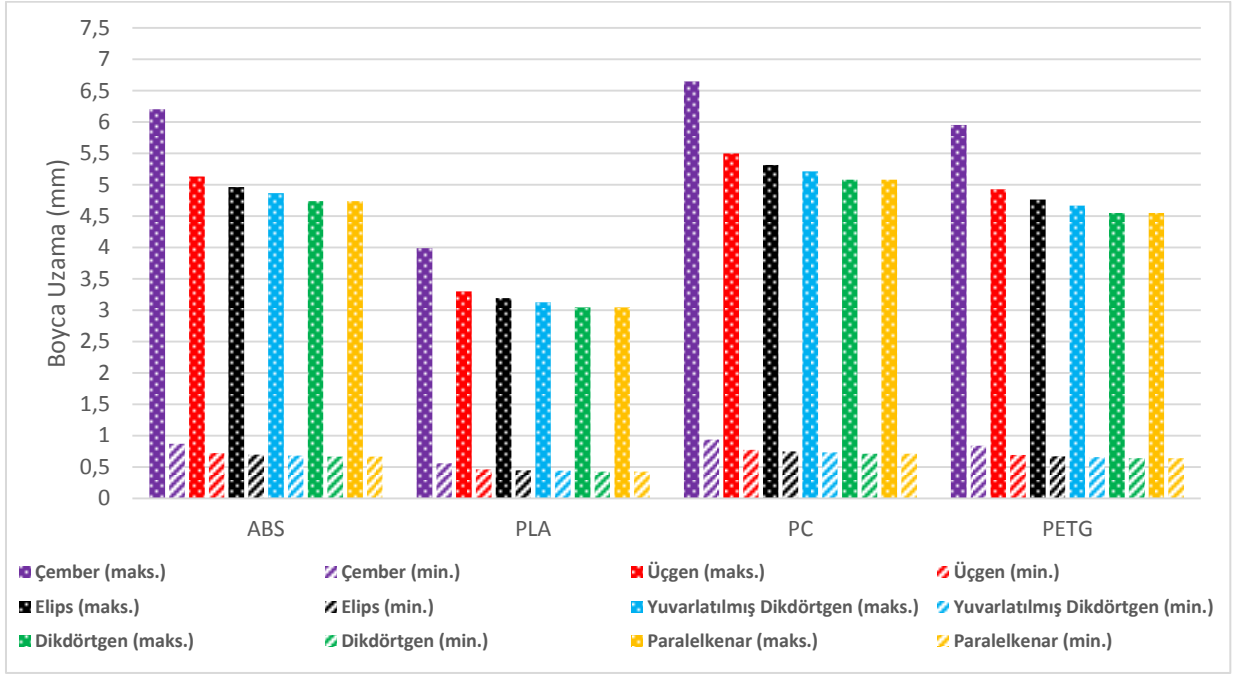
Grafik 5. 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 mm² kesit alanları için tasarımlar üzerinde oluşan gerilme yığılmaları

Oluşan deformasyon açısından yapılan kıyaslamada ise en düşük yer değiştirme PLA malzemesinden üretilen Dikdörtgen kesitli kirişte görülmüştür. Paralelkenar kesite sahip kiriş te Dikdörtgen kirişle aynı davranışı sergilemiştir. Oluşturulan kirişlerin, PLA'dan üretilen bu iki kesite göre performansları ise Çizelge 6 da verilmiştir.

	Dikdörtgen / Paralelkenar	Yuvarlatılmış Dikdörtgen	Elips	Üçgen	Çember
PLA	0	-2,63372336	-4,71976	-8,25318	-30,8997
PC	-49,31740614	-53,2500136	-56,3648	-61,6408	-95,456
ABS	-55,55555556	-59,6524586	-62,8974	-68,3938	-103,622
PETG	-66,66666667	-71,0562056	-74,5329	-80,422	-118,166

Çizelge 6. Kirişlerin deformasyon yönünden PLA'dan üretilen Dikdörtgen kesitli kirişe göre performansı

Çizelge 6 dan da görülebildiği üzere farklı malzeme ve kesit şekli kombinasyonları ile aynı performansı yakalamak mümkündür. Örneğin PC den üretilen Üçgen kiriş ve ABS den üretilen elips kiriş aşağı yukarı aynı davranışı sergilemiştir. Bütün tasarımlar arasında ise PLA'dan üretilen dikdörtgen veya paralelkenar kirişlere en yakın performansı %2,6 lık farkla PLA'dan üretilen yuvarlatılmış dikdörtgen göstermiştir. En kötü sonuç ise %118 daha kötü performans gösteren çembersel kirişte gözlenmiştir. Bu performans farkı Grafik 6'da açıkça görülebilmektedir. Burada maksimum deformasyon 3 mm², en düşük deformasyon ise 8 mm² kesit alanına sahip kirişlerde meydana gelmiştir.



Grafik 6. Malzeme cinsine göre kirişlerde meydana gelen en büyük ve en küçük deformasyonlar

Sonuç olarak çalışmanın bütünü göz önüne alındığında dikdörtgensel kesite sahip PLA'dan üretilen kirişin hem deformasyon hem de maruz kalınan gerilme yönünden diğer kiriş modellerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde, bu dikdörtgensel kirişin oluşan maksimum gerilme yönünden %5 ve %69 oranları arasında diğerlerine kıyasla daha avantajlı olduğu görülmüştür. Deformasyon yönünden incelendiğinde PLA'dan üretilen malzemeler arasında dikdörtgen kesit geometrisi, diğerlerine göre %2,6'dan %30'a varan miktarlarda iyi sonuç vermiştir. Diğer malzemeler de hesaba katıldığında bu oran %118'e kadar çıkmaktadır.

Referanslar

- Biggins P, Hiltz J, Kusterbeck A. Bio-inspired Materials and Sensing Systems. Cambridge: RSC Pub; 2011.
- Milovanović J, Trajanović M. Medical applications of rapid prototyping. Mechanical Engineering 2007; 5:79 – 85.
- Gibson I. Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering. Software Conversion and Rapid Prototyping. West Sussex: John Wiley & Sons; 2005.
- Subhransu Mohapatra, Prasad Dasappa Numerical Prediction of Stiffness and Strength of a Highly Complex Topology Optimized Thermoplastic Part designed for 3D Printing SPE ANTEC™ Indianapolis 2016.
- Lars Krog, A. T. Application of Topology, Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components. Retrieved from Altair product design 2011.
- Baich, Liseli, and Guha Manogharan. "Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts." International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX. 2015.
- M. Iliescu E. Nuțu, B. Comănescu Applied Finite Element Method Simulation in 3D Printing, International Journal Of Mathematics And Computers In Simulation, Issue 4, Volume 2, 2008, 305-312.
- Russell C. Hibbeler, Mechanics Of Materials, Pearson Education Canada 2011.
- ANSYS Manual.
-

2 FARKLI ÜÇ BOYUTLU BİYO YAZICISI TASARIMI, PROTOTİP İMALATI VE PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

H. Evlen*, M. Rakanoğlu, C. Ünal, E. Eğin, S. Özkaya, , S. M. Yavuz

*Karabük Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Karabük/TÜRKİYE

hakgul@karabuk.edu.tr

Üç boyutlu yazıcılar, önceden tasarlanmış CAD verilerini katmanlara ayırıp bir ya da birden çok malzeme kullanarak gerçek bir ürün ortaya çıkaran sistemlerdir. Eklemeli imalat (additive manufacturing) teknolojisi olarak da anılan bu teknoloji plastik, metal, seramik ve gıda sektörü gibi pek çok alanda kendine yer edinmiştir. İnsan eli değmeden sıfırdan son ürüne varabilecek kalitede parça imalatına olanak sağlayabilmesi, teknolojinin tıp ve doku mühendisliği alanlarında kullanıma uygun olabileceği fikrini doğurmuştur. Özellikle son yıllarda yapılan yapay organ ve doku nakli çalışmaları teknolojinin biyo üretim alanında da başarıyla kullanılabildiğini kanıtlamaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada 2 farklı biyo yazıcı tasarımı ve prototip imalatı yapılmıştır. Yazıcılardan birisi sabit tablalı delta tipi yazıcı iken diğeri ters delta tabla sabit yazıcı uç tipi bir yazıcıdır. Her iki yazıcı ile de farklı hızlarda ve geometrilerde parça basımı gerçekleştirilmiş, yazıcılar performans açısından karşılaştırılmıştır. Parça yazdırma işleminde jelatin kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilen performans verileri bundan sonraki yapılacak biyo yazıcıların tasarımlarının geliştirilmesine ışık tutar nitelikte olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Biyo yazıcı, prototip, jelatin, delta, kartezyen

Sorumlu Yazar: Hatice EVLEN, hakgul@karabuk.edu.tr

2 DIFFERENT THREE DIMENSIONAL BIO PRINTER DESIGN, PROTOTYPE MANUFACTURING AND PERFORMANCE COMPARISON

H. Evlen*, M. Rakanoğlu, C. Ünal, E. Eğin, S. Özkaya, , S. M. Yavuz

*Karabuk University, Industrial Design Engineering, Karabuk/TURKEY

hakgul@karabuk.edu.tr

Three-dimensional printers are systems that divide pre-designed CAD data into layers and produce a real product using one or more materials. Also known as additive manufacturing technology, this technology has taken its place in many areas such as plastic, metal, ceramics and food sector. The ability to manufacture parts from scratch to the final product without touching human hands has given rise to the idea that technology may be suitable for use in medical and tissue engineering fields. Artificial organ and tissue transplantation studies especially made in recent years proves that technology can be successfully used in the field of bioproduction.

Two different bio printer designs and prototypes were produced. One of the printers is a fixed-plate delta type printer while the other is an inverted delta type stationary printer type printer. With both printers, parts were printed at different speeds and geometries, and the printers were compared for performance. Gelatin is used in the print process. The performance data obtained as a result of the work has been able to shed light on the development of the design of future biomes.

Key Words: Bio printer, prototype, gelatin, delta, cartesien

Corresponding Author: Hatice EVLEN, hakgul@karabuk.edu.tr

1. Giriş

Üç boyutlu yazıcı, 3 boyutlu bilgisayar verisini katı, elinizle tutabileceğiniz gerçek nesnelere dönüştüren bir makinedir. Bu teknoloji geleneksel imalat yöntemleri gerçekleştirilmesi mümkün olmayan geometrileri üretebilmektedir [1]. Hızlı prototipleme olarak bilinen bu teknoloji birçok farklı yöntem kullanabilmektedirler. Teknolojiler arasındaki farklılıklar genellikle katmanların nasıl oluşturulduğu ile alakalıdır. 3B yazıcıların kullandığı bazı teknolojileri sıralamak gerekirse, Seçici Lazer Sinterleme - SLS (Selective Laser Sintering), FDM (Fused Deposition Modelin), Stereolithography en çok kullanılan 3B yazıcı teknolojileri arasındadır [2]. Günümüzde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahip olan üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi, bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu nesnenin yine bilgisayar ortamında katmanlara bölünmesi (STL formatına dönüştürülmesi) ve sonra katman katman inşa edilerek gerçek objeyi oluşturmasıdır. [3,4]

Birçok uygulama alanında kendine yer edinmiş olan 3 boyutlu yazıcı teknolojileri, otomotiv ve havacılık sektörü, savunma sanayi, uzay teknolojileri, mimari yapılarda, ürün ve makine tasarımında, medikal cihazlar ve tıbbi uygulamalarda oldukça yoğun bir ilgi odağı haline gelmiştir. Özellikle tıp ve sağlık alanında bu kadar rağbet görmesinin sebebi kişiye ve ihtiyaca özel organ, doku ve implant uygulamalarına ihtiyacın giderek artmasıdır. İlk olarak 1982 yılında diş hekimliği alanında ticari olarak piyasaya sunulan implantlar günümüzde tıp, biyomedikal ve sağlık alanlarında da kullanılmaya başlamıştır [5,6]. Başarılı bir implant tedavisi için implantın yerleştirilme bölgesi büyük önem taşımaktadır. Yumuşak dokunun kalitesi, miktarı ve morfolojisi, kemiğin kalitesi, miktarı ve morfolojisi, çekilen diş ve destek yapıların durumu, patolojinin varlığı ve estetik düşünceler tedavideki belirleyici faktörlerdir. Bu aşamada iki anatomik yapı önem taşımaktadır; implantın mezyal ve distalindeki papilin yüksekliğinde rol oynayan interproksimal alandaki alveol kretinin kemik yüksekliği-vestibüler kemik duvarının yüksekliği ve kalınlığı [7-9]. Sert ve yumuşak dokunun davranışı implant omzunun yerleşimine bağlı olduğundan doğru restorasyon bu noktada oldukça büyük önem taşımaktadır [8]. Bu sebepten implantın yerleşimi planlanırken, rahat ve tehlikeli bölgeler 3 boyutta tanımlanmalı ve implant boyunun tehlikeli bölgeye girmesi engellenmelidir [8,9] Bu aşamada çene kemiğinin 3 boyutlu ve anatomik olarak tasarımı ve 3B baskı teknolojileri gibi imalat teknolojileri medikal alanda büyük önem kazanmıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinde meydana gelen gelişmelerle birlikte kişiye özel tasarlanan implantların imalatı kolaylaşmıştır. Özellikle 3B yazıcıların imalat sektörüne girmesiyle beraber kişiye özel implant tasarımlarının üretimi hızlanmış, üretim maliyeti düşmüştür [5].

Tıp alanında kullanılan yazıcılarda ilk 3 boyutlu yazıcı ile canlı doku üretimi 2009'da Novagen 3d Printing Technology ile başladı [4]. İlk zamanlarda sadece doku baskısı alınabilirken bugünlerde organ baskısı alınabiliyor.

Bu baskı teknolojisi en çok kemik ve kıkırdak dokusu baskısı alınırken kullanılıyor. Hangzhou Elektronik Bilimler ve Teknoloji Üniversitesi araştırmacılar 3 boyutlu yazıcı sayesinde kulak ve burun baskısı alabiliyor (Şekil 1) [10].



Şekil 1. Kulak basımı [10]

3 boyutlu yazıcıyla kemik ve kıkırdak dokusu üretmekte en büyük gelişme ise kafatası protezi baskısı almak denilebilir. Kafatası protezi basım prosesi ilk olarak hastanın kafatasının taranmasıyla başlamaktadır. Dijital ortamdaki tarama tamamlandıktan sonra yazıcı kafatası modelini en ufak ayrıntısına uyacak şekilde kalıba dökülür. Bu şekilde üretilen kafatası proteziyle hastanın kafatasının yüzde 75'i onarılmış olur (Şekil 2) [10].



Şekil 2. Kafatası Protezi [10]

2. MATERYAL VE METOT

Bio yazdırma adımı, seçilen malzeme ve hücre kaynakları, hedef dokuya özgü geliştirilen inkjet, mikroekstrüzyon ve lazer destekli yazdırma teknolojileri ile birlikte kullanılarak canlı yapıların oluşması sağlanır. Uygulama adımı, bazı dokular için transplantasyon öncesi biyoreaktörde olgunlaşma periyodu gerekebilir [11]. Temel olarak kullanılan biyo yazdırma teknolojileri; mürekkep püskürtmeli, mikroekstrüzyon ve lazer destekli yazdırma sistemleridir.

Gerçekleştirilen çalışmada tasarlanan her iki yazıcı sisteminde de mikroekstrüzyon yazdırma teknolojisi kullanılmıştır. Bu yazdırma teknolojisi genellikle X,Y ve Z eksenleri boyunca 3 boyutta kontrollü hareket edebilen, sıcaklık kontrollü malzeme iletimi ve ekstrüzyonu ile gerçekleşir. Mikroekstrüzyon teknolojisinde ekstrüzyon, pnömatik ya da mekanik (piston ya da mil) sistemler ile gerçekleştirilir. Mekanik sistemler, pnömatik sistemlere göre daha sağlıklı bir ekstrüzyon gerçekleştirir. Bunun sebebi pnömatik sistemlerde bu olayın gaz basıncı, mekanik sistemlerde ise bir piston ya da mil ile gerçekleştirilmesidir.

2.1. İKİ FARKLI BİYO YAZICI TASARIMI

2.1.1. Kartezyen Biyo Yazıcı Tasarımı Ve Prototip İmalatı

Kartezyen tipi 3 Boyutlu Hidrojel ve Biyomürekkep yazıcı tasarımı solidworks programı aracılığıyla yapılmıştır. Malzeme basımı için şırıngaya baskı uygulayacak bir itici sistem tasarlanmıştır. Baskı denemeleri için toz jelatin, aljinat ve seramik tozu kullanılmıştır. Tasarlanan yazıcı sisteminin boyutları 500x500x600mm dir. Tabla baskı alanı 220x220x70mm'dir. Arduino kontrol kartı kullanılmıştır ve yazıcı kontrolü bu şekilde sağlanmaktadır. X ekseninde 1 adet, Y ekseninde 1 adet, Z ekseninde 2 adet, ekstruder da 1 olmak üzere toplam 5 adet 0.5 Nm'lik Nema 17 step motor kullanılmıştır. Tasarlanan ve prototip imalatı yapılan üç boyutlu Kartezyen yazıcı tasarımı Şekil 3.'te verilmiştir.



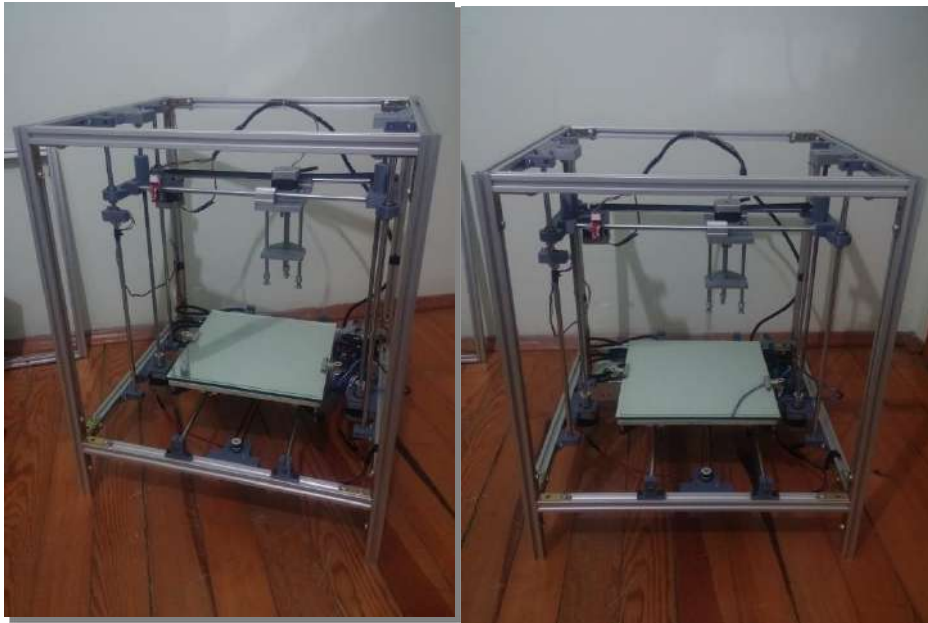
Şekil 3. Kartezyen biyo yazıcı tasarımı

Kartezyen biyo yazıcının teknik özellikleri Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kartezyen biyoyazıcı teknik özellikleri

Basım Alanı	220 x 220 x 70
Baskı malzemesi	Toz jelatin, Toz jelatin ve kil karışımı
Step motor	Nema 17 (5 Adet)
Nozzle çapı	Ø2 mm

Kartezyen biyo yazıcı parçaları demonte olarak alınmış, montaj ve kurulumu yapılmıştır. Hazne eklenmiştir.



Şekil 4. Kartezyen biyo yazıcı prototip imalatı

Dış kaplamada cam malzeme kullanılmıştır. Tabla hareketi (Y eksen) 1 adet step motor kullanılarak ve kayış kasnak mekanizması yardımıyla sağlanmıştır. Tabla iki adet mil ile yataklanmış ve yataklar gövdeye sabitlenmiştir. X eksen için 1 adet step motor ve kayış kasnak bağlantısı kullanılmış olup, ekstruder kafası eksen üzerinde bağlı bulunan parçaya montajlanmıştır. Z eksen hareketini sağlamak için 2 adet step motor ve 2 adet vidalı mil ile hareket sağlanmıştır, 4 adet mil ve yatak yardımıyla gövdeye sabitlenmiştir. Yazılım olarak Arduino yüklenmiştir.

Baskı için 50 ml'lik şırınga kullanılmıştır. Şırıngaya itme kuvvetini sağlamak için step motor ve vidalı mil kullanılarak baskı alınan ekstruder tasarlanmıştır. X eksen üzerinde bağlanmış olan 0.5 Nm'lik step motorun ucuna monte edilmiş kaplin, M5 ölçüsünde olan 110 mm boyunda mil ve somun yardımıyla ve hareketli olan şırınga baskı plakası yardımıyla şırıngaya baskı uygulanmaktadır. Plakanın hareketi, içerisinde sabitlenmiş M5 ölçüsünde somun aracılığıyla artı(baskı yönü) ve eksi yönde sağlanabilmektedir. Ekstruder başlık 3 adet plakadan oluşmaktadır. Birinci plaka step motor tutucu, ikinci plaka şırınga tutucu ve üçüncü plakada hareketli olan baskı plakasıdır. Baskı plakası bir ve ikinci plakanın arasına 3 adet mil ile klavuzlanmıştır.

2.1.2. Ters Delta Biyo Yazıcı Tasarımı Ve Prototip İmalatı

Ters delta Biyo yazıcı tasarımı için trigonometrik hesaplamaların ardından hareket serbestliği ve mafsallı düzeneğinin kinematik hesapları yapılmıştır. Ansys programında yapılan Statik analizlerinden sonra hareket kabiliyetinin optimum düzeyde olması için kullanılacak malzemeler ve kalınlıkları tayin edilmiştir. Kollarda 4mm çapında karbon fiber çubuklar kullanılmıştır. Araştırmalara göre küre kabuk mafsallı bu kullanım için en ideal olan mafsallı olduğu belirlenmiş, ses ve sürtünme bakımından en uygun malzeme olarak ABS plastik mafsallı tercih edilmiştir. Steril bir koşulda baskı alımını sağlamak için esnek kullan-at kumaş ile tüm hareket mekanizmasını baskı alanından yalıtacak bir tasarım fikri oluşturulmuştur. Baskı sırasında baskının gözlemlenebilmesi için tüm yüzeyler Plexiglass (Şeffaf) levhalar ile kapatılarak gövde oluşturulmuştur. Hareket mekanizmasının yataklanması için 8mm İndüksiyonlu krom miller ve Lm8uu lineer rulmanlar tercih edilmiştir. Tahrik sistemi TR8 trapez vida-somun çiftine dönme hareketi veren Nema17 flanş boyutunda 32N/cm torklu adım motorları ile sağlanmıştır. Extruder sisteminde Steril şırıngalar ile uyumlu çalışabilen ve vidalı 0.1 µm hassasiyetli bir tasarım yapılmıştır. Ardından Solidworks CAD programında dış gövde, ekstruder, hareket mekanizması ve elektronik yerleşimin katı modellemesi tamamlanmıştır.



Şekil 5. Ters delta biyo yazıcı prototipi

Ters delta biyo yazıcının Gövdesi çeşitli kalınlıklarda plexiglass levhaları Co₂ lazer kesim tezgahında kesilmesiyle üretilmiştir. Daha sonra bu levhalar özel bir yapıştırıcı olan kloroform (CHCl₃) ile birleştirilmiştir. Hareket sistemindeki lineer rulmanların ve trapez vida somunlarının bir arada çalışmasını sağlayacak parçalar FDM tipi 3B yazıcı ile PLA malzeme kullanılarak üretilmiştir.

Ters delta biyo yazıcının teknik özellikleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2. Kartezyen biyoyazıcı teknik özellikleri

Basım Alanı	Ø100 x 100
Baskı malzemesi	Toz jelatin, Toz jelatin ve kil karışımı
Step motor	Nema 17 (5 Adet)
Nozzle çapı	Ø2 mm

Makine dış ölçüleri 400x350x600mm dir. Elektronik kontrol kartı olarak Arduino Mega ile beraber Ramps shield kullanıldı. Motorlar DRV 8825 32microstep motor sürücüleri ile sürüldü. Tüm sistem 30A 12V Spms güç kaynağı ile beslenmektedir. Toplam güç sarfiyatı 90w civarındadır. Baskı alanın aydınlatması ve ortamın steril kalmasını sağlamak için Uv floresan lamba Led aydınlatmalar ile takviye edilmiştir.

2.2. DENEYSEL UYGULAMALAR

Üç boyutlu yazıcılardan ürün çıkarabilmek için ilk aşamada bu ürünün dijital ortamda üç boyutlu olarak tasarlanmıştır. Dijital ortamda tasarlanan ürün STL formatında kaydedilip, ardından yazdırma parametrelerinin ayarlanacağı arayüz programına yüklenmiştir. Tasarımı yapılan biyo yazıcı kontrolü için Cura-15.04.3 yazılımı kullanılmıştır. Arayüz programında yazdırma işleminin yapılacağı parçaya ait yazdırma parametreleri belirlenip üç boyutlu parça yazdırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilen üç boyutlu biyo yazıcıların performansının karşılaştırılması için toz jelatin-su ve toz jelatin, kil ve su karışımından oluşan 2 farklı malzeme kullanılmıştır. Çizelge 3.'de ise deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin karışım oranları verilmiştir. Her iki malzeme karışımı da 100°C deki kaynar suya koyularak hazırlanmıştır.

Jelatin domuz, sığır, balık ve kümes hayvanlarının deri ve kemiklerine, asit ve kireç ile muamele edilerek elde edilen renksiz bir proteindir. Jelatin kullanım amacı, eklendiği malzemeyi jelleştirmek, koyulaştırmak, sırlamak ve kapsüllemektir [12]. Jelatin sıcaklık ile şekil alabilen ve akıcı bir kıvama gelebilen bir malzeme iken, oda sıcaklığı seviyesine gelindiğinde katılaşarak kısa sürede donan bir malzemedir.

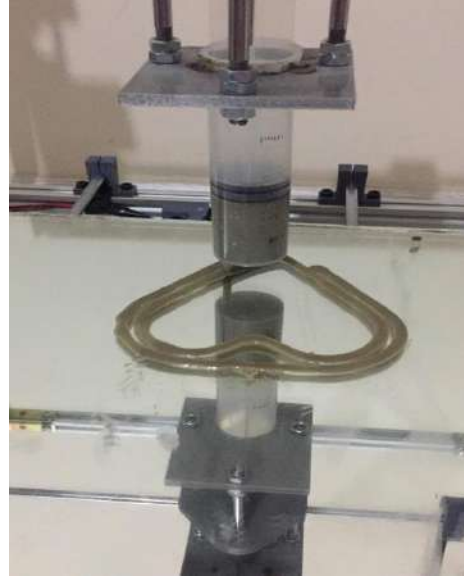
Şekil 6.'da Kartezyen yazıcıda Şekil 7.'de ise ters delta yazıcıda üretilen numuneler görülmektedir.

Çizelge 3. Malzeme karışım oranları

1. Karışım	17gr toz jelatin 40 ml su
2. Karışım	15 gr toz jelatin 1,5 gr kil 40 ml su



a)



b)

Şekil 6. Kartezyen yazıcıda üretilen numuneler, a) Jelatin-su karışıklı numune, b) Jelatin-%10 Kil karışıklı numune



a)



b)

Şekil 7. Ters delta yazıcıda üretilen numuneler, a) Jelatin-su karışıklı malzemeden elde edilen numuneler, b) Jelatin-%10 Kil karışıklı numuneler

3. Sonuç ve Öneriler

Gerçekleştirilen çalışmada bilgisayar ortamında 2 farklı biyo yazıcı tasarımı yapılmış ve prototip imalatı tamamlanmıştır. Her iki üç boyutlu biyo yazıcıda da jelatin esaslı 2 farklı malzeme ile parça yazdırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Jelatin, yapısal özelliğinden kaynaklanan bazı kullanım zorlukları barındıran bir malzemedir. Örneğin jelatini uygulama işlemi için harcanan süre oldukça iyi ayarlanmalı, olabildiğince çabuk malzemeyi tatbik

etmek gerekmektedir. Aksi taktirde malzeme kısa sürede donup katı kıvama gelebilmektedir. Bu da malzemenin kullanım imkanını ortadan kaldırmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda da bu olumsuz durumla karşılaşmış, malzeme parça yazdırma işlemi esnasında enjektör içinde katılaşmış, deneysel çalışma olumsuz etkilenmiştir. Bu olumsuz durumun önüne geçmek için enjektöre alınan malzemenin donmasını engellemek amacıyla enjektör yerine seramik yada metal gibi sıcaklığa dayanıklı bir malzeme yeni bir hazne tasarımı yapılmalıdır.

Gerçekleştirilen 2 farklı yazıcı tasarımı performans açısından kıyaslandığında ise, her iki cihazda da hassasiyet ve parça yüzey kalitesi aynı görünmektedir. Ancak jelatin malzemeye pürüzlülük testi uygulanamadığından kesin bir ifade ile bunu belirtmek mümkün olamamıştır. Bazı durumlarda biyo yazıcıya ikinci hatta bazen üçüncü başlığın takılması gerekebilmektedir. Bu tarz 2 yada daha çok malzemeyle yapılacak uygulamalar için kartezyen yazıcılar, ters delta yazıcılardan daha elverişlidir. Bunun nedeni kartezyen yazıcıların konumlama ve kalibrasyon ayarlarının delta tipli yazıcılara nazaran daha rahat yapılabilir olmasıdır.

Bunun yanı sıra biyo yazdırma uygulamalarında canlı dokunun yaşamını devam ettirebilmesi için yazdırma ortamının belirli nem ve beslenme koşullarını sağlaması gerekmektedir. Bu durumda ise ters delta yazıcıların tabla hareketinin bu sorunu tamamen ortadan kaldırabileceği düşünülmektedir.

4. KAYNAKLAR

- [1] <http://3dprintertr.com/3d-printer-nedir/>
- [2] D.V. Mahindru, P. Mahendru. Review Of Rapid Prototyping-Technology For The Future, Global Journal Of Computer Science And Technology Graphics & Vision, Volume 13, Issue 4, 2013.
- [3] M. Subaşı, A. Özcan, Ş. Aykut. Yaş Pasta Süslemeleri İçin 3d Yazıcı Tasarımı Ve Prototipi, 3b Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (International Symposium On 3d Printing Technologies), 2016
- [4] G.N. Levy, R. Schindel, J.-P. Kruth. Rapid Manufacturing And Rapid Tooling With Layer Manufacturing (Lm) Technologies, State Of The Art And Future Perspectives. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 52, 2: 589-609, 2003.
- [5] M. Karagöz, A.A. Cerit. Kişiyi Özel İmplant Tasarımlarının 3 Boyutlu Yazıcılarla Üretilmesi, 3b Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (International Symposium On 3d Printing Technologies), 311, 2016.
- [6] T. Topkaya. Dental İmplant Destekli Protezlerde İmplant Sayısının Ve Yerleşim Şeklinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Analizi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [7] S. Çelen. Çene Kemiği Onarımında 3b Yazıcıya Yönelik Olarak Stl Dosyalarının İyileştirilmesi, 3b Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (International Symposium On 3d Printing Technologies), 306, 2016.
- [8] H. Bilhan, T. Sülün. İmplantlarda Erken Krestal Kemik Rezorpsiyonu Ve Oklüzyonun Önemi Diş Hekimliğinde Klinik, 17, Pp.58-66, 2004.
- [9] H. Bilhan, E. Mumcu, H. Bilgin. Diş Çekimi Sonrası Hemen İmplantasyon Ve Hemen Yükleme Protokolü: Derleme Ve 2 Vaka Bildirisi Diş Hekimliğinde Klinik, 20, Pp. 87-97, 2006.
- [10] <http://www.elektrikport.com/haber-roportaj/3d-yazicilar-artik-organ-baskisi-yapiyor/12121#ad-image-0>
- [11] L. Aydın, S. Küçük, H. Kenar. Doku Ve Organ Biyo Yazdırma Amaçlı 3b Biyo Yazıcı Tasarımı Ve Geliştirilmesi, Tıptekno15-Tıp Teknolojileri Ulusal Kongresi 2015, Tıbbi Cihaz Tasarımı 3, 15-18 Ekim 2015, Sf 153-157
- [12] <https://gidabilinci.com>

BURKULMA MUKAVEMETİNE GÖRE EŞİT MİKTARDA FİLAMENT KULLANIMI İLE 3 BOYUTLU BASKISI YAPILACAK ANKASTRE KİRİŞLERİN KESİT GEOMETRİ BİÇİMLERİNİN PERFORMANSI

İhsan TOKTAŞ^a, Murat Tolga ÖZKAN^b Hüseyin Alp ÇETİNDAG^c

a, Yıldırım Beyazıt University, Mechanical Engineering Department 06020 Keçiören, Ankara, Turkey,

E-mail: itoktas@ybu.edu.tr

b, Gazi University Faculty of Technology, Industrial Design Engineering Department, 06500 Ankara, Turkey

E-mail: mtozkan06@yahoo.com

c, Institute of Natural and Applied Sciences, Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey, E-mail: h.a.cetindag@outlook.com

Özet

Bu çalışmada, aynı kesit alan ve uzunluktaki, eşit miktarlarda filament kullanımı ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişler için burkulma mukavemeti yönünden en iyi mekaniksel özelliği sağlayan kesit geometrilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle, hızlı modellemede ve plastik parçaların üretiminde sıkça kullanılan filamentin miktarından, üretim zamanından ve harcanan enerjiden bağımsız bir şekilde tasarımlar arasında performansa göre bir sıralama yapılmıştır. Ankastre kirişlerin tasarımların uzunluğu ve uygulanan kuvvetler sabit tutulmuş, içi dolu temel kesit geometri biçimleri (Çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralel kenar, elips ve köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen) değiştirilmiştir. Ayrıca, dört farklı filament malzemesi de burkulma mukavemeti yönünden karşılaştırılmıştır. 6 kesit şekline, 101 kesit alanına ve 4 farklı malzemeye bağlı olarak toplam 2424 adet tasarım alternatifi oluşturulmuştur. Bu tasarım alternatifleri, önce matematiksel olarak modellenmiş, daha sonra sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi ile test edilmiştir. Tüm modellerin istatistiksel analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en düşükten büyüğe doğru, gerilme ve deformasyona uğrayan kesit geometrileri sıralanmıştır.

Anahtar Kelimeler: filament, ankastre kiriş, burkulma, optimizasyon

PERFORMANCE OF CROSS SECTIONAL GEOMETRIES OF BEAMS ACCORDING TO BUCKLING STRENGTH WHICH ARE 3D PRINTED WITH THE SAME AMOUNT OF FILAMENT

Abstract

Aim of this study is to determine the cross sectional geometries of beams which have better response to buckling with the usage of same amount of filament. These beams have the same cross sectional area and length. Thus, design points were sorted freely without the consideration of the amount of filament, printing time and energy consumption. Length of beams and applied forces were kept constant for each design point, besides that basic cross sectional geometries were changed for each design series. These geometries were selected as, circle, rectangle, equilateral triangle, rhombus (diamond), ellipse and rounded rectangle. Moreover four different printing material were taken into consideration for comparison according to buckling. Depending on 6 different cross sectional shape, 101 cross sectional area and 4 material, totally 2424 design alternatives were built. Firstly, mathematical model of these designs were constructed, then they were tested by using finite element method (FEM) and regression analysis. All model branches were compared to each other with the statistical analysis. As a result of all analyses, design alternatives were sorted according to mechanical strength.

Keywords: filament, beam, buckling, optimization

1. Giriş

Kesit şekli ve malzeme cinsi, üretilecek ürünün gerilme ve gerinim değerlerini etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan kesit geometrisine göre bir dayanıklılık sıralamasının yapılması gerekmektedir. Literatürde farklı kesit tiplerine göre ayrı ayrı yapılmış çalışmalar mevcut olmakla birlikte, kesit geometrisi ve eşit miktarda malzeme kullanımına göre bir dayanıklılık sıralama yapılmamıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü eşit miktarda malzeme kullanarak, zorlanma şiddetine bağlı olarak burkulma değerlerine dayalı malzeme cinsine göre kesit sıralaması yapılmasıdır.

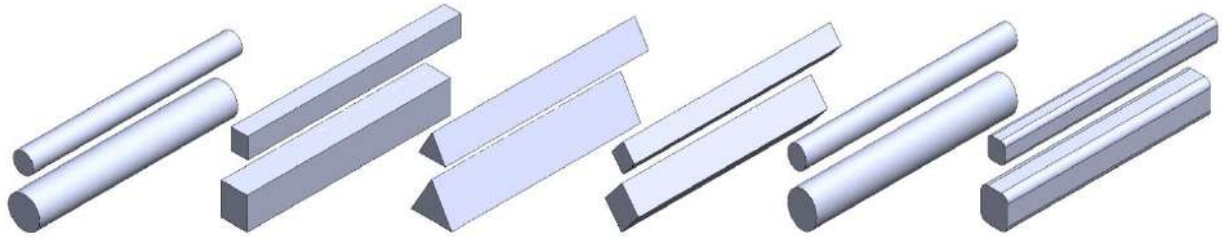
Günümüzde 3B baskı ve yazıcılar, özellikle ağır sanayiler dışındaki ofislerimizde RP'ye (Rapid Prototype) kolay bir yol desteklemekte ve bize farklı malzeme türüne izin vermektedir. Mücevher, ayakkabı, endüstriyel tasarım, mimarlık, otomotiv, havacılık, dişçilik ve tıbbi endüstriler gibi birçok farklı alan bu tekniği kullanmaya başladı [1]. En önemli uygulamalardan bir tanesi, tasarım geliştirme ve tıbbi modellerin imalatıdır ve bunun sayesinde cerrahi planlamadan önce sanal ve fiziksel anatomik modellerin üretimi amaçlanmaktadır [2,3]. Katkı imalatı veya 3D baskı, şirketlerin şu ana kadar imkânsız olduğu düşünülen şekillerin üretimine izin vererek ürünler üretme biçiminde devrim meydana getirdi. Bu, malzemelerin yük koşulları altında en iyi performans için gerekli olan kesin konumlara yerleştirilmiş parçaları tasarlayanın avantajını sağlar. Bununla birlikte, bu teknoloji ağırlık-performans perspektifinden faydalanırken, sonlu elemanlar analizi ve performans öngörülerini için ayrıştırılması zor olan oldukça karmaşık şekillere neden olur. Bu zorluk, açık çözümlerin tipik olarak kullanıldığı bileşen arızaları gibi son derece doğrusal olmayan olayları tahmin ederken daha da belirginleşti. Geleneksel olarak, benzer elemanlar için tetrahedral elemanlara kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha düşük simülasyon maliyetlerinden ötürü açık altı çözümlerde altı yüzlü elemanlar kullanılır. Bununla birlikte, topoloji optimizasyonu ile üretilen oldukça karmaşık şekiller, altı yüzlü elemanlar kullanılarak örgü yapmak kesinlikle yasaktır. Dolayısıyla rijitlik ve daha özel olarak mukavemet sayısal tahmini, 3D baskılı parçalar için zorlu bir önerme haline gelir [4,5]. Farklı bir çalışmada, dolgu deseni seçiminin ve çeşitli mekanik özelliklerin maliyet ve üretim sürelerinin belirlenmesi için tasarım parametrelerini belirlenmesi hedeflemiştir. Bunun için farklı zorlanmalar için deneysel ve FEA analizleri yapılmıştır [7].

Bu çalışma, 3D yazıcı aracılığıyla üretilecek olan kirişlerdeki burkulma regresyon analizi, sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çözüm aracılığıyla incelenmiştir. Bu sayede kullanılan malzeme ve harcanan enerjiden bağımsız olarak daha sağlam tasarımlar elde edilmiş olacaktır.

2. Yöntem

2.1. Tasarımların Hazırlanması

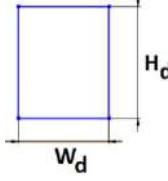
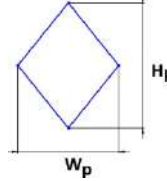
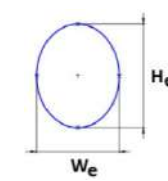
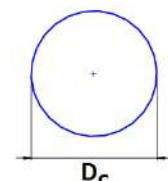
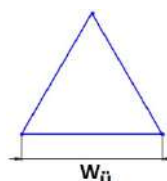
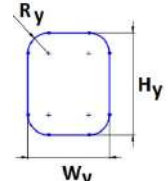
Tasarlanan bütün kirişlerin boyu 20 mm dir ve kesit alanları 3 mm^2 den 8 mm^2 ye kadar artmaktadır. Kesit alanlarının $0,05 \text{ mm}^2$ aralıklarla değişmesiyle toplam 101 kesit alanı elde edilmiştir. Çalışmada yer alan en büyük ve en küçük kesit alanına sahip tasarımlar Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1. Soldan sağa doğru sırasıyla; çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen şeklindeki kesitlere sahip tasarımlar. (Kesit alanı üstte 3 mm^2 , altta ise 8 mm^2 dir)

Analiz ve hesaplamalarda kıyaslanmanın yapılabilmesi için bu şekilleri oluşturan ölçü oranları sabit tutulmuştur. Elde edilen bu oranlar Çizelge 1 de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Seçilen kesit geometrileri ve bu şekillere ait ölçüler.

Dikdörtgen		Paralelkenar		Elips	
	$H_d / W_d = 1,5$		$H_p / W_p = 1,5$		$H_e / W_e = 1,5$
	H_d : min: 1,936 mm, max: 3,162 mm		H_p : min: 2,739 mm, max: 4,472 mm		H_e : min: 2,185 mm, max: 3,568 mm
	W_d : min: 1,549 mm, max: 2,530 mm		W_p : min: 2,191 mm, max: 3,578 mm		W_e : min: 1,748 mm, max: 2,855 mm
Çember		Üçgen (eşkenar)		Yuvarlatılmış Dikdörtgen	
	$D_ç$: min: 1,954 mm, max: 3,192 mm		$W_ü$: min: 2,632 mm, max: 4,210 mm		$H_y / W_y = 1,5$
					$W_y / R_y = 4$
					H_e : min: 1,97 mm, max: 3,232 mm
					W_e : min: 1,584 mm, max: 2,586 mm
					R_y : min: 0,396 mm, max: 0,646 mm

Altı adet kesit geometrisi ve 101 adet kesit alanı kullanılarak elde edilen 606 tasarıma 3D baskı tekniğinde sıkça kullanılan; ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ve PC (Polycarbonate) malzemeleri uygulanmıştır.. Bu sayede toplam 2424 adet birbirinden farklı tasarım oluşturulmuştur. Kullanılan bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2 de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

	Elastikiyet Modülü	Poisson's Oranı	Maksimum Basma Mukavemeti	Özkütle
ABS	2250 MPa	0,35	49 MPa	1,05 g/cm ³
PLA	3500 MPa	0,36	93,8 MPa	1,24 g/cm ³
PETG	2100 MPa	0,4	55 MPa	1,27 g/cm ³
PC	2344 MPa	0,37	65 MPa	1,21 g/cm ³

2.2. Analizlerin Yürütülmesi

Oluşturulan bütün tasarımlar aynı koşullar altında incelenmiştir. Kirişler bir uçtan sabit destekle tutturulmuş, öbür uç ise serbest bırakılmıştır. Serbest uçtan eksenal doğrultuda 10 N büyüklüğünde basma kuvveti uygulanmıştır. Çözümleme için öncelikle analitik yöntem kullanılmış, daha

sonra elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (F.E.M.) ile karşılaştırılmıştır. Bu iki yöntem arasında yapılan istatistiksel analiz yardımıyla en iyi tasarıma ulaşılmıştır.

2.2.1. Analitik Hesaplama

Kritik kuvvetler kirişlerin narinlik oranlarına (slenderness ratio) bakılarak Johnson formülü veya Euler kiriş formülü kullanılarak hesaplanmalıdır. Bu yüzden bütün tasarımlar için narinlik oranları hesaplanmış, sonuç olarak da bütün kirişlerin Euler kiriş formülü kullanılarak hesaplanması gerektiği görülmüştür. Kritik yük için Euler kiriş formülü Denklem (1)'de, ve Güvenlik Katsayısı Denklem (2)'de verilmiştir [8]

$$F_{Kritik} = \frac{C * \pi^2 * E * I}{L^2} \quad (1)$$

$$G.K. = \frac{F}{F_{Kritik}} \quad (2)$$

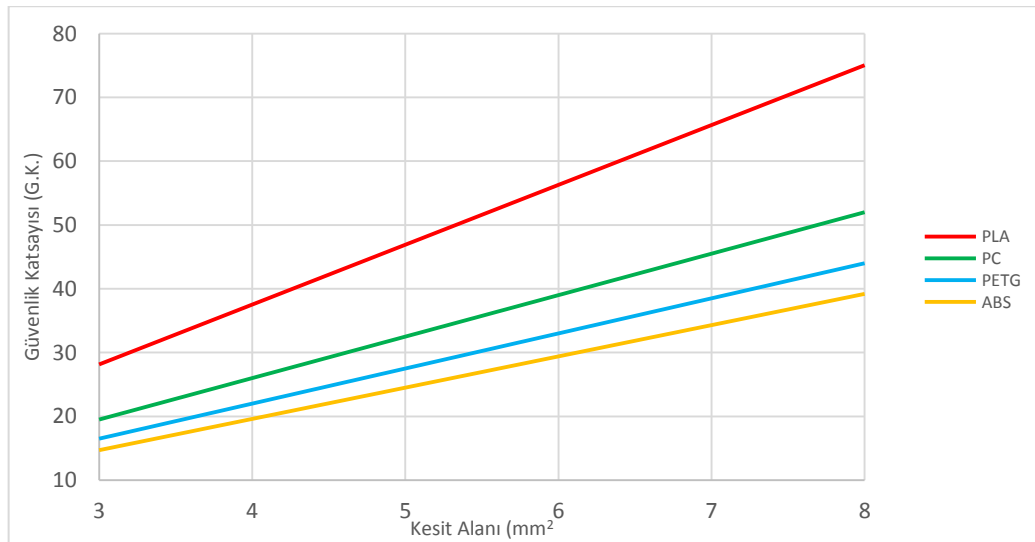
Burada F kuvveti, E elastikiyet modülünü, I eylemsizlik momentini, L ise kiriş uzunluğunu ifade etmektedir. Bağlama şekline göre değişen “ C ” sabiti ise 0,25'tir.

Kirişler burkulmanın yanı sıra basma şeklinde de zorlanmaktadır. Kirişlerin hangi zorlanmadan daha çok etkilendiğini görmek için basma gerilmesi de incelenmiştir. Bu incelemede Basma gerilmesini veren Denklem (3)'ten yararlanılmıştır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

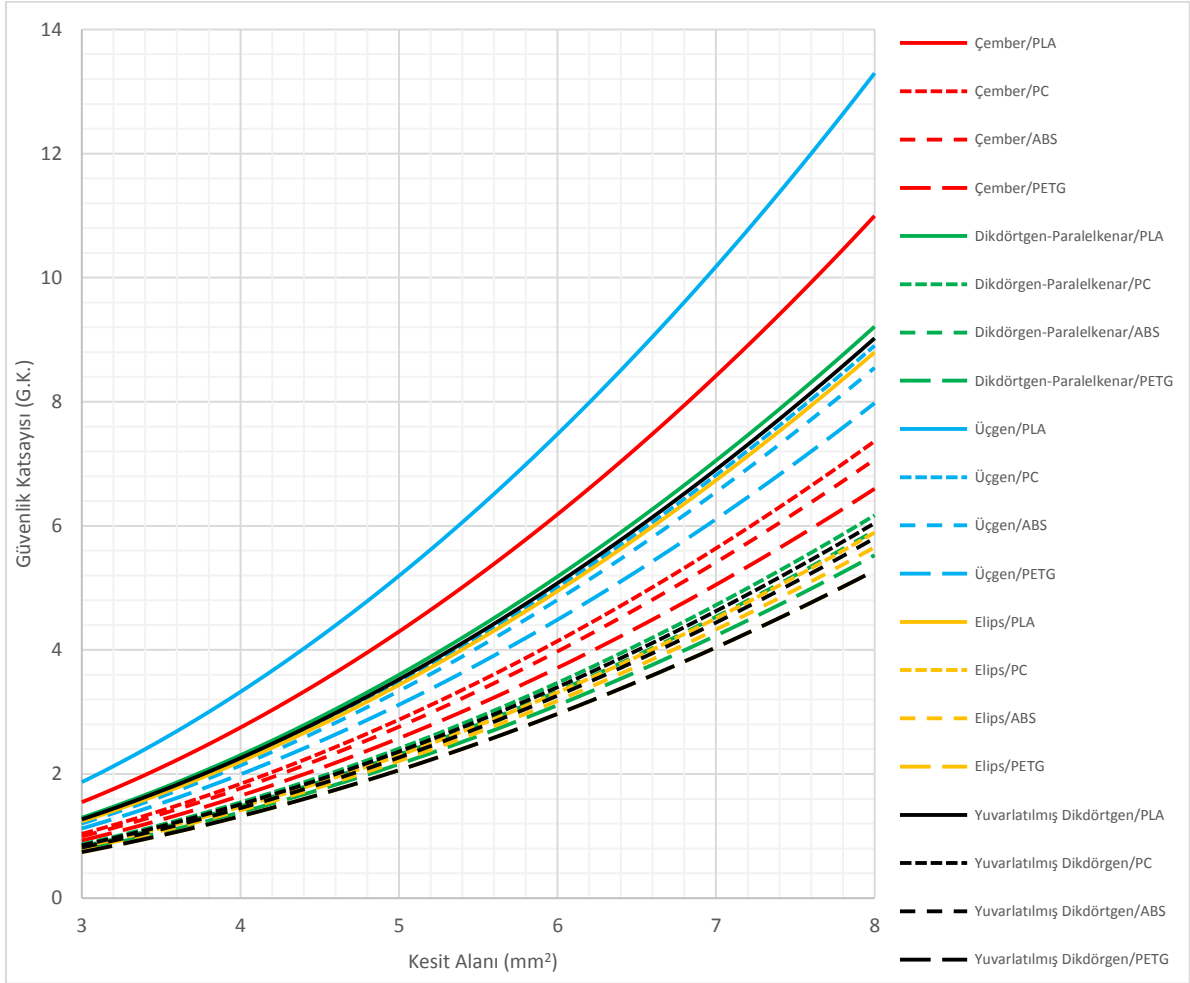
Burada A kesit alanını ifade etmektedir. Basma gerilmesi yüzünden ortaya çıkan güvenlik katsayısı da Denklem (2)'den elde edilmiştir.

Basma gerilmesi ve burkulma zorlanması için hesaplanan güvenlik katsayıları sırasıyla Grafik 1 ve Grafik 2'de verilmiştir.



Grafik 1. Analitik olarak hesaplanan tasarımlar için Kesit Alanı ve Basma Mukavemeti Güvenlik Katsayısı grafiği

Beklendiği üzere güvenlik katsayıları kesit alanıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Sadece basma mukavemeti ele alındığında aynı kesit alanı için en iyi sonuçlar PLA'dan üretilen tasarımlarda görülmüştür.



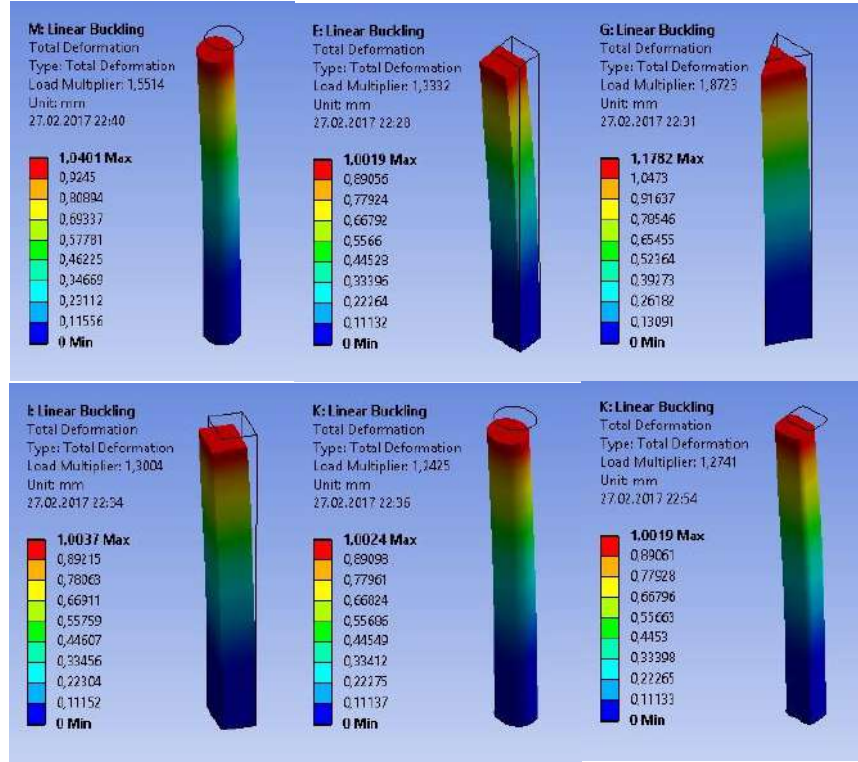
Grafik 2. Analitik olarak hesaplanan tasarımlar için Kesit Alanı ve Burkulma Güvenlik Katsayısı grafiği

Paralelkenar ve Dikdörtgen kesite sahip tasarımlarda aynı değerler elde edilmiş, bu yüzden iki tasarım aynı eğriler kullanılarak ifade edilmiştir. Oluşturulan grafiğe bakıldığında üçgensel kesite sahip kirişlerin diğer kirişlere göre burkulmaya daha mukavemetli olduğu görülmektedir. En düşük mukavemet değerleri ise Elips kesite sahip kirişlerde ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu grafik sayesinde istenilen güvenlik katsayısı değerine kesit alanı, kesit geometrisi ve kullanılan malzeme üzerinde değişiklik yapılarak ulaşmak mümkün olmuştur. Düşük kesit alanı değerlerinde tasarımlar arasındaki fark çok net olmasa da kesit alanının büyümesiyle tasarımların birbirlerine göre durumları daha da belirginleşmiştir. En iyi güvenlik katsayısı değerleri bu grafikte de Grafik 1'in doğruladığı üzere PLA'dan üretilen malzemelerde ortaya çıkmıştır. Bunun yanında iki grafik beraber değerlendirildiğinde basma kuvvetine bağlı güvenlik katsayısı değerleri, burkulmaya bağlı güvenlik katsayısı değerlerinin çok üstündedir. Bu yüzden kirişler üzerinde burkulmanın etkisi basma gerilmesine göre daha fazla ve belirgindir.

2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Modellenen 2424 adet kiriş ANSYS programının "Linear Buckling" modülü yardımıyla çözülmüştür. Çözümleme yapılırken oluşturulan "mesh" ve "node" yapılarına dikkat edilmiştir. Analitik hesaplamalar ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki farkı azaltmak için bu yapılarda optimizasyona gidilmiş, tasarımlar arasında aynı teknikler ve aynı büyüklükte "mesh" yapıları kullanılmaya çalışılmıştır.

Tasarımlar bir uçtan "Fixed Support" yardımı ile sabitlenmiş. Öbür uçtan ise 10 N'luk basma kuvveti verilmiştir. Analizler sonucunda kritik kuvvet değerleri ve maksimum yer değiştirmeler elde edilmiştir. En iyi sonuç veren PLA malzemesi kullanılarak tasarlanan kirişler Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. PLA malzemesine sahip tasarımların burkulma analizleri

Şekil 2 de görüldüğü üzere bütün şekiller eylemsizlik momentinin zayıf olduğu yöne doğru burkulmuştur. Aynı zamanda ortaya çıkan deformasyon da bu şekilde açıkça görülmektedir. Elde edilen sonlu elemanlar analizi beklenen yönde sonuç verse de analitik yöntemle arasındaki fark yüzünden doğruluğunun kontrol edilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için istatistiksel analizden ve aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır.

$$RMS = \left(\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p |t_j - c_j|^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - c_j)^2}{\sum_j t_j^2} \right) \quad (5)$$

$$Ort. \% Hata = \frac{\sum_j \left(\frac{t_j - c_j}{t_j} * 100 \right)}{p} \quad (6)$$

Bu denklemler kullanılarak deformasyon ve kritik yük değerleri için analitik hesaplama ve sonlu elemanlar yöntemi karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada üç adet önemli parametre vardır. RMS değeri "0" a, R^2 değeri "1" e yakın olmalı ve "Ort % Hata" değeri ise mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Hesaplanan bu parametrelerle birlikte ortaya çıkan maksimum ve minimum sapma değerleri Çizelge 3 te verilmiştir.

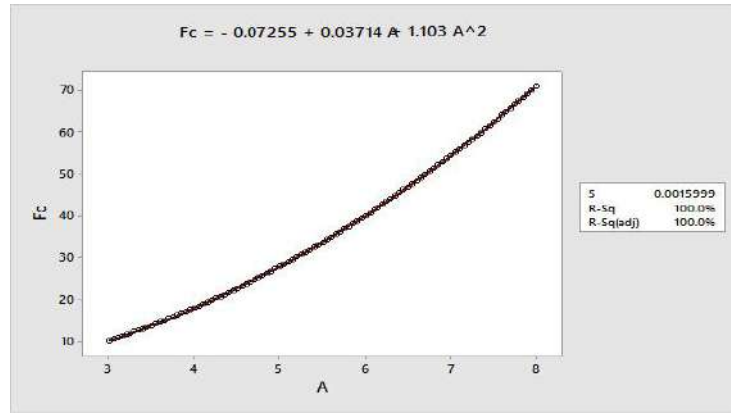
Çizelge 3. Kritik yük hesaplamaları için analitik çözüm ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki sapma değerleri

RMS	R ²	Ortalama % Hata	Maksimum % Sapma	Minimum % Sapma
0,154212652	0,999359526	0,376595524	0,708597018	0,000135358

Çizelge 3 te görüldüğü üzere iki yöntem arasındaki sapma değerleri çok düşüktür. Özellikle de Ortalama % Hata ve R² değerleri yapılan sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu göstermektedir.

2.2.3. Regresyon Analizi

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler regresyon analizi ile tekrar işlenmiştir. Bu sayede analitik hesaplaması zor, sonlu elemanlar yöntemiyle analizi ise uzun süren burkulma fenomeninde her kesit şekli için kritik kuvvetin kesit alanına bağlı denklemleri elde edilmiştir. Yapılan ikinci dereceden regresyon analizlerinde güvenilirlik seviyesi %95 olarak seçilmiştir. Her malzeme ve kesit şekli için olacak şekilde toplam 24 analiz yapılmıştır. Çembersel kesite sahip kiriş için yapılan regresyon analizi örnek olarak Grafik 3'te verilmiştir.

**Grafik 3. Dairesel alana sahip kiriş için yapılan regresyon analizi**

Elde edilen bu grafikte kırmızı çizgi elde edilen ikinci dereceden regresyon eğrisini, siyah daireler ise analize sokulan değerleri göstermektedir. Burada yapılan analizin yüksek kesinliğe sahip olduğu görülmektedir. Yapılan regresyon analiziyle elde edilen denklemler ise Çizelge 4 te verilmiştir.

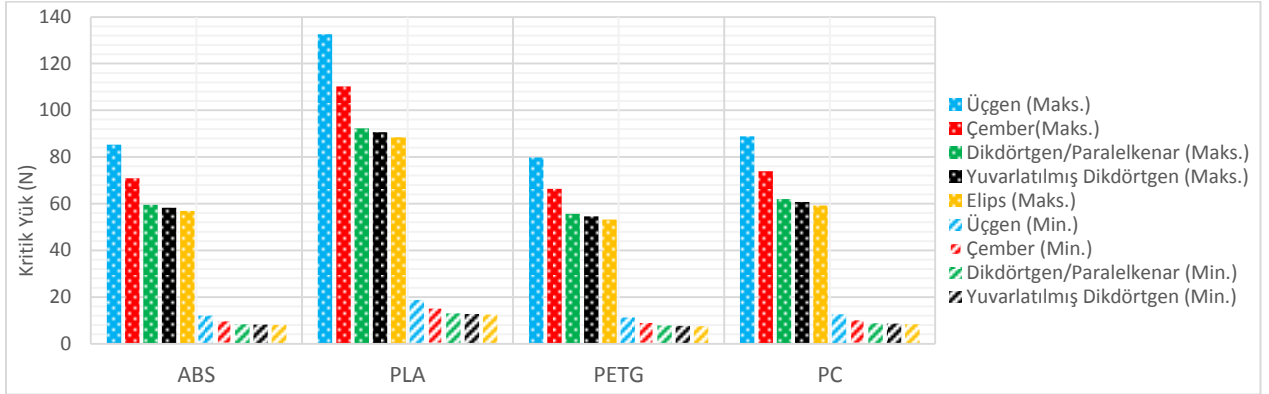
Çizelge 4. Regresyon analizinden elde edilen Kesit Alanı-Kritik Kuvvet denklemleri (Fc = kritik kuvvet, A = kesit alanı)

	ABS	PLA	PETG	PC
Çember	$F_c = 0,07255 + 0,03714A + 1,103A^2$	$F_c = -0,1090 + 0,05605A + 1,716A^2$	$F_c = -0,05746 + 0,02651A + 1,033A^2$	$F_c = -0,06737 + 0,03295A + 1,151A^2$
Dikdörtgen	$F_c = -0,04335 + 0,02093A + 0,9261A^2$	$F_c = -0,01370 + 0,02499A + 1,444A^2$	$F_c = -0,02498 + 0,009395A + 0,8682A^2$	$F_c = -0,03530 + 0,01557A + 0,9666A^2$
Üçgen	$F_c = -0,2119 + 0,1198A + 1,319A^2$	$F_c = -0,3265 + 0,1844A + 2,054A^2$	$F_c = -0,1860 + 0,1034A + 1,235A^2$	$F_c = -0,2184 + 0,1225A + 1,376A^2$
Paralelkenar	$F_c = -0,05396 + 0,02762A + 0,9250A^2$	$F_c = -0,07994 + 0,04035A + 1,440A^2$	$F_c = -0,03462 + 0,01521A + 0,8671A^2$	$F_c = -0,04665 + 0,02222A + 0,9654A^2$
Elips	$F_c = -0,02621 + 0,01054A + 0,8864A^2$	$F_c = -0,03146 + 0,01147A + 1,380A^2$	$F_c = -0,008611 + 0,000166A + 0,8307A^2$	$F_c = -0,02138 + 0,006775A + 0,9248A^2$
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	$F_c = -0,03379 + 0,01526A + 0,9082A^2$	$F_c = -0,03737 + 0,01612A + 1,414A^2$	$F_c = -0,01559 + 0,003582A + 0,8512A^2$	$F_c = -0,03171 + 0,01303A + 0,9474A^2$

3. Sonuç

Tasarlanan kirişler hem analitik olarak çözümlenmiş hem de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu iki yöntem istatistiksel olarak karşılaştırıldığında aradaki farkın ortalama %0,38 civarında olduğu görülmektedir. Bu sayede yapılan sonlu elemanlar yönteminin doğru olduğu sonucuna varılmıştır.

Malzeme yönünden karşılaştırıldığında en iyi sonucu PLA en kötü sonucu ise PETG'nin verdiği ortaya çıkmıştır. Güvenlik katsayısı yönünden karşılaştırıldığında PLA'nın PETG'ye göre %39,9 daha mukavemetli olduğu görülmektedir. PLA'nın ABS ve PC'ye göre mukavemeti ise sırasıyla %35,7 ve %32,9 daha fazla olarak hesaplanmıştır. Malzeme cinsine göre gruplandırılarak elde edilen en yüksek ve en düşük kritik kuvvet değerleri Grafik 4'te gösterilmiştir.



Grafik 4. Kullanılan malzemelere göre ortaya çıkan en büyük ve en küçük kritik kuvvet değerleri

Yukarıdaki grafiğe bakıldığında en güçlü tasarımın PLA dan üretilen üçgen kesitli kirişin olduğu görülmektedir. En kötü tasarım ise PETG'den üretilen Elips kiriş olmuştur. Malzemenin yanında kesit geometrisi de hesaba katıldığı zaman PETG'den üretilen Elips, en iyi mukavemet gösteren PLA'dan üretilen Üçgen kesite göre %60 daha kötü performans göstermiştir. Elde edilen diğer tasarımların da PLA'dan üretilen üçgen kirişe göre performansları Çizelge 5'te gösterilmiştir. Bu Çizelgede aynı özellikleri gösteren dikdörtgen ve paralelkenar kirişler birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 5. Tüm tasarımların PLA'dan üretilen Üçgen kirişe göre performansları

	Üçgen	Çember	Dikdörtgen ve Paralelkenar	Yuvarlatılmış Dikdörtgen	Elips
PLA	0	-17,30066569	-30,7179677	-32,13531762	-33,84053255
PC	-33,02857143	-44,61507439	-53,60083322	-54,55005271	-55,69205951
ABS	-35,71428571	-46,83614223	-55,46155066	-56,37270418	-57,46891378
PETG	-40	-50,38039941	-58,43078062	-59,28119057	-60,30431953

Sonuç olarak 24 şeklin tamamı da analiz edilmiş, bu analizlere uygun kesit alanı-kritik kuvvet denklemleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra oluşturulan grafiklerden de görüleceği üzere tasarımlar kıyaslanarak modeller arasında mukavemet yönünden sıralama yapılmıştır. Bu sıralamada performans yönünden %60'lara varan farklar elde edilmiş, benzer güvenlik katsayısı değerlerinin veya kritik kuvvetlerin farklı malzeme ve kesit şekli kombinasyonları ile elde edilebileceği görülmüştür.

Referanslar

20. Biggins P, Hiltz J, Kusterbeck A. Bio-inspired Materials and Sensing Systems. Cambridge: RSC Pub; 2011.
21. Milovanović J, Trajanović M. Medical applications of rapid prototyping. Mechanical Engineering 2007; 5:79 – 85.
22. Gibson I. Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering. Software Conversion and Rapid Prototyping. West Sussex: John Wiley & Sons; 2005.
23. Subhransu Mohapatra, Prasad Dasappa Numerical Prediction of Stiffness and Strength of a Highly Complex Topology Optimized Thermoplastic Part designed for 3D Printing SPE ANTEC™ Indianapolis 2016.
24. Lars Krog, A. T. Application of Topology, Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components. Retrieved from Altair product design 2011.
25. Baich, Liseli, and Guha Manogharan. "Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts." International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX. 2015.
26. M. Iliescu E. Nuțu, B. Comănescu Applied Finite Element Method Simulation in 3D Printing, International Journal Of Mathematics And Computers In Simulation, Issue 4, Volume 2, 2008, 305-312.
27. Russell C. Hibbeler, Mechanics Of Materials, Pearson Education Canada 2011.
28. ANSYS Manual.

YENİ BİR TASARIM METODOLOJİSİ: 3D YAZDIRMA (3DP) PROSESİNE FARKLI BİR YAKLAŞIM: XD BÖLÜMLEME (XDP)

Mustafa YURDAKUL^a, Serkan GÜNEŞ^{a*}, Yusuf Tansel İÇ^b,

^aMakina Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

^bEndüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, 06810, Bağlıca, Ankara, Türkiye
yurdakul@gazi.edu.tr, serkan.gunes@gazi.edu.tr, ytansel@baskent.edu.tr

Özet

Endüstri 4.0 olarak adlandırılan Dördüncü Sanayi Devrimi'nin önemli bileşenlerinden biri de 3 Boyutlu Yazdırma (3D Printing-3DP) işlemidir. Endüstri 4.0'a geçişte; esnekliği, konfigürasyon değiştirebilme yeteneği ve diğer proseslerle uyumluluğu daha yüksek olan, daha genelleştirilebilen teknolojilerin kullanılması söz konusudur. Bu çalışmada; 4. Endüstri çağı olarak adlandırılan sürecin gelecek evrelerinde, 3D Yazdırma prosesinin mevcut halinden evrilerek "XDP: XD Yoğunluk Bölümleme'ye (XD Partitioning) dönüşeceği öngörülmüştür. XDP kavramı, boyuttan bağımsız ama gerekli olması durumunda boyutun da bileşenlerden biri olabileceği ve niteliğin ön planda olduğu kavramsal bir prosestir. Bu çalışmadaki temel amaç, 3D Yazdırma prosesini temel alan ürün/proses tasarım sürecine uyarlanmış XDP tarzı genel ve kavramsal bir tasarım metodolojisi önermektir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, 3D Yazdırma, XD Yoğunluk Bölümleme, Tasarım metodolojisi

A NEW DESIGN METHODOLOGY: A DIFFERENT APPROACH TO 3D PRINTING (3DP) PROCESS: XD PARTITIONING (XDP)

Abstract

One of the important components of the Fourth Industrial Revolution, which is called Industry 4.0, is 3D Printing-3DP (3 Dimensional Printing) process. In passage to Industry 4.0, technologies which are more flexible, reconfigurable, compatible with other processes and adaptable to changing conditions are being used. In this study, it is anticipated that 3D printing will be evolved from its current form to XDP: XD partitioning form in the later stages of the Industry 4.0. XDP concept is dimensionless but has properties; and when it is necessary dimensions can be one of the properties. The purpose of this study is to propose a general and conceptual design methodology which is adapted to product/process design and is based on the 3D printing process.

Keywords: Industry 4.0, 3D Printing, XD Partitioning, Design Methodology

1. Giriş

Üç boyutlu yazıcılar, 3 boyutlu olarak hazırlanan bilgisayar verilerini 3 boyutlu nesnelere dönüştürebilen, dolayısıyla üretim faaliyetlerinde kullanılabilen makinalardır. Sanal ortamda tasarım süreci tamamlanmış olan ürünler bu makinalar sayesinde doğrudan üretim sürecine sokulabilmektedir. Günümüz koşullarında her türlü mekanik parça ve unsur bu sistemler vasıtasıyla üretilebilmektedir. Bu sistemler; tasarımı tamamlanmış üç boyutlu bir nesnenin katmanlara ayrılması ve ürünü oluşturan hammadde ve materyallerin eritilerek bu makinalarda dökülmesi prensibine dayalı olarak işlevini yerine getirmektedir. 3D yazıcı sistemleri gerçek yaşamda mevcut olan her bir nesnenin üretilmesine de olanak sağlayarak, nesnelerin tasarımcılar tarafından algılanmasına yönelik olası hatalar ve subjektif değerlendirmelerin elimine edilmesine imkân tanıyacaktır [1,2].

Üç boyutlu yazıcılar genel olarak gövde, hareket eksenleri ve motorları, baskı tablası, nozul ucu ve elektronik kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Gövde; yazıcının motorlarını, eksenlerini, tablasını ve ısıtıcı

* İletişim yazarı

ucunu taşıyan ana elamandır. Gövde kısmı yazıcının büyüklüğüne ve özelliklerine göre değişebilmektedir. Genel olarak plastik parçalar ve bunlar ile birleştirilen alüminyum parçalardan oluşmaktadır [3]. Üç boyutlu yazıcıların önemli elemanları motor ve elektronik kontrol ünitesidir. Motorlar, hareket eksenleri üzerlerindeki kayış-kasnak ve vidalı milleri hareket ettiren elamanlardır. Genelde adım (step) motorları kullanılır. Bu motorlar dönme hareketleri ile yazıcının hareketlerini gerekli hassasiyet ile yapabilmeyi sağlamaktadır. Adım adım hareket edebilmesi küçük hareketler için imkân vermektedir. Motorlara ek olarak elektronik kontrol ünitesi ise yazıcı da bulunan ısıtıcı uç, baskı tablası ve motorları kontrol eden diğer sistem elemanıdır. Genellikle kontrol ünitesi olarak “Arduino” ve “Sanguinololu” isimli kartlar kullanılmaktadır. “Arduino” kartı daha yaygın bir kullanıma sahiptir. Bunun nedeni üzerinde “Ramps” kartı ile birleştirilerek daha çok destek ve özelliğe sahip olmasıdır [4].

Üç boyutlu yazıcılar ilk olarak 1970’li yılların sonlarına doğru bilim dünyasının gündemine yerleşmeye başlamış, boyutsal anlamda çok büyük ve oldukça pahalı olan makinelerdi. İlk üç boyutlu yazıcı Charles Hull tarafından 1984 yılında geliştirilip imal edilmiştir. 1986 yılında üç boyutlu yazıcı üretmek için ilk şirket kurulmuştur. 1988 yılında kurulan bu şirket tarafından geliştirilen SLA-250 ilk üç boyutlu yazıcıdır. Yine aynı yıl içerisinde “Seçici Lazer Sinterleme-SLS (Selective Laser Sintering) ve Eritilmiş Biriktirme Modellemesi-FDM (Fused Deposition Modelling) teknolojileri keşfedilmiştir. 1993 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde (MIT) iki boyutlu yazıcılarda kullanılan “inkjet” teknolojisinden yola çıkarak yeni bir teknoloji geliştirdi ve buna 3 Boyutlu Yazdırma (3DP) ismi verildi. İlk renkli üç boyutlu baskılar bu yazıcılarda üretildi. 1995 yılında üç boyutlu yazıcıların satışı yapılmaya başlandı. 1996 yılında ise Z Corporation firması yüksek çözünürlüğe sahip ürünler üreten ilk üç boyutlu yazıcıyı tasarladı. Bu yazıcı aynı zamanda renkli basım yapabilme yeteneğine de sahipti. 2007 yılında Reprap adıyla ilk açık kaynak kodlu yazıcılar piyasaya çıkmaya başladı. Dolayısıyla üç boyutlu yazıcıları geliştirme imkanı hızla arttı. 2008 yılında Object Geometries Şirketi, Connex500 ile aynı anda farklı malzemeler kullanarak ürün üretebildi. 2009 yılından itibaren Makerbot ve 3D Systems’in geliştirmiş olduğu “Cubify” gibi modeller sayesinde ev tipi üç boyutlu yazıcıların satışları gerçekleştirilmeye başlandı [5].

Üç boyutlu yazıcılar endüstriyel tasarım alanında yeni ürün tasarımı aşamasında ele alınabilecek tasarımlar sağladığı için artarak kullanılmaktadır. Tasarımların bir ön prototipi bu teknoloji sayesinde hızlı bir şekilde üretilebilmektedir. En sık kullanım alanı plastik ürün üretimidir. Tasarlanan modeller plastik hammadde kullanarak çeşitli boyut ve özelliklerde üretilebilmekte ve elle tutulur modeller ortaya çıkabilmektedir [6,7,8]. Üç boyutlu yazıcı bu sayede insan hayatının pek çok önemli alanına girmiş bulunmaktadır. Savunma sanayinde günümüzde prototip dışında son ürün üretimi içinde metal baskı alabilen üç boyutlu yazıcılar kullanılmaktadır. Yeni nesil savaş uçaklarının bazı parçaları üç boyutlu yazıcı aracılığı ile üretilip uçak üzerinde kullanılacaktır [9, 10].

Günümüzde tıp alanında yine yapay organ ya da yapay doku üretimi yapılabilmektedir. Üç boyutlu yazıcı ile eklem, kemik ya da diş gibi tıbbi ürünler üretilmiştir. Ayrıca, inşaat sektöründe kullanılması birçok kolaylık ve zaman tasarrufu sağlama potansiyeline sahiptir [11, 12]. Üç boyutlu yazıcıların bir diğer kullanım alanı ise yiyecek sektörüdür. Yiyecek üretmek için kullanılan özel kafalar ve nozul uçları sayesinde istediğimiz şekil ve karışıma sahip kurabiye, çikolata, pizza ve makarna gibi birçok yiyeceği üretmek artık mümkün olabilmektedir [13].

Günümüzde üretim yöntemleri her geçen gün daha hızlı üretim ve daha hassas üretim yönünde gelişme göstermektedir. Bunun yanında ihtiyaçların artması ile üretim adetleri de çok yüksek sayılara ulaşmıştır [14]. Bu bahsi geçen yöntemlerde ise üretim sırasında artık hammadde oranı çok yüksektir. Üç boyutlu baskı yöntemlerinin önemi burada ortaya çıkmaktadır. Üç boyutlu baskı işlemlerinde model sıfırdan oluşturulduğu için, kalıp ve talaşlı imalat ile üretimdeki gibi malzeme israfı oluşmamaktadır. Bunun yanında üç boyutlu baskı ile diğer yöntemler ile üretilemeyecek ya da birkaç işlemde üretilebilecek parçalar tek seferde üretilebilmektedir [15].

Literatürde 3D Yazdırma konulu pek çok akademik çalışma ve yayın bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada [16], ikiz-vidalı ekstrüder ile üretilen polimer nanokompozit malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirebilmek için, 3 boyutlu yazıcı kullanılarak test numuneleri üretilmiştir. Hazırlanan bu numuneler Shore-D Sertlik, çekme ve 3 nokta eğme deneyleri ile teste tabi tutulmuş ve testlerin ardından, malzemelerin gösterdikleri mekanik davranışların sebeplerini incelemek için SEM ve EDS çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan bulgular, ABS matris malzeme içerisine nano-parçacık takviyesi yapmanın çekme testinde UTS değerlerini takviyesiz malzemeye göre en az %13 iyileştirdiği sonucunu ortaya koymuştur.

3D Printing'de en popüler metod ise Ergiyik Biriktirerek Modelleme-Fused Deposition Modelling (FDM)'dir. Zhong ve arkadaşları [17], FDM malzemesi olarak kullanılmak üzere kısa fiberglass takviyeli ABS (GFABS) polimer kullanmışlardır. Bu birleşim, kırılabilirlik nedeniyle filament haline getirilememiştir. Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) katkısının daha iyi esneklik ve süneklik sağladığı görülmüştür. Gray ve diğerleri ise [18], termotropik sıvı kristal polimerlerin (TLCPs) ticari FDM 1600 (Stratasys) makinasında kullanımını araştırmıştır.

Başka bir çalışmada Li ve arkadaşları [19] kısmi kontrol edilebilen özelliklere sahip prototip imalatı için FDM prototip model mekanik özellikleri konusunda çalışmışlardır. Çalışmada teorik ve deneysel analizlere dayalı elastikiyet sabitlerini hesaplayacak denklem kümesi önerilmiştir. Bu sabitler FDM parça yapısal modellerini belirlemede kullanılmıştır. Onagoruwa ve arkadaşları [20], polipropilen (PP) bağlayıcı ile seramik tozun karışımından üretilen filamentli FDM sisteminde kullanmışlardır. Mullit, ergiyik silis ve titanya tozu içeren filamentler, FDM 1650 makinesinde kullanılarak gözenekli seramik parçalar üretilmiştir. Daha sonra bağlayıcı madde parçadan çıkartılmış ve sinterleme işlemi uygulanmıştır. Bazı gözenekli parçalar alüminyum ile infiltrasyon işlemine tabi tutulup metal seramik kompozitler üretilmiştir.

Bu çalışmadaki temel amacımız ise 3D yazdırma prosesini temel alıp, bu süreci tamamen değiştirerek ürün/proses tasarım sürecine uyarlanmış genel ve kavramsal bir ön tasarım metodolojisi oluşturmaktır. Bu sebepten dolayı tasarım konulu yayınlar da taranmış ve bahsedilen uyarılama için bu yayınlardan da faydalanılmıştır.

Tasarım operasyonu; "fonksiyonel uzayda tanımlanan ihtiyaçları fiziki çözüm uzayında en iyi şekilde karşılamak için yürütülen faaliyetler bütünü" olarak tanımlanabilir [21, 22]. Sistematik Mühendislik Tasarım yaklaşımı, temel olarak 4 aşamadan oluşmaktadır [23, 24]:

1. Amacın netleştirilmesi
2. Kavramsal tasarım
3. Şekillendirme tasarımı
4. Detaylı tasarım

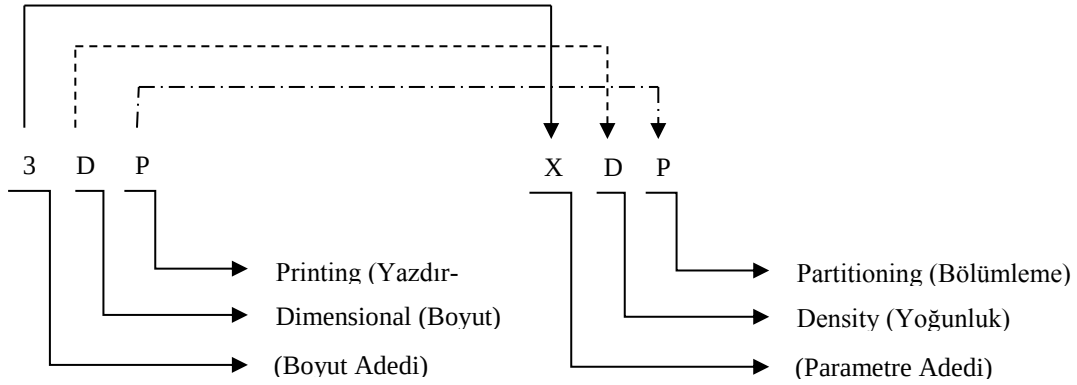
Tasarım işleminde en kritik aşama kavramsal tasarım sürecidir. Literatürde kavramsal tasarımı konu edinen çok sayıda akademik çalışma mevcuttur [25-28]. Kavramsal tasarım aşamasında verilen kararlar ürün maliyetini %80 oranında etkiler [25].

2. XD Bölümlleme (XD Partitioning-XDP) Kavramı

Ürün geliştirme süreci aşamalarından birinden diğerine geçiş ya da ürün geliştirme aşamalarının kendi iç dinamikleri ve değişimleri incelendiğinde görülmektedir ki, bir aşamadan diğerine geçişte ve sonrasında; esneklik, yeni konfigürasyonlara uyum sağlayabilme hızı ve yetenekler ile diğer proseslerle uyumluluk en önemli etkenler olmaktadır.

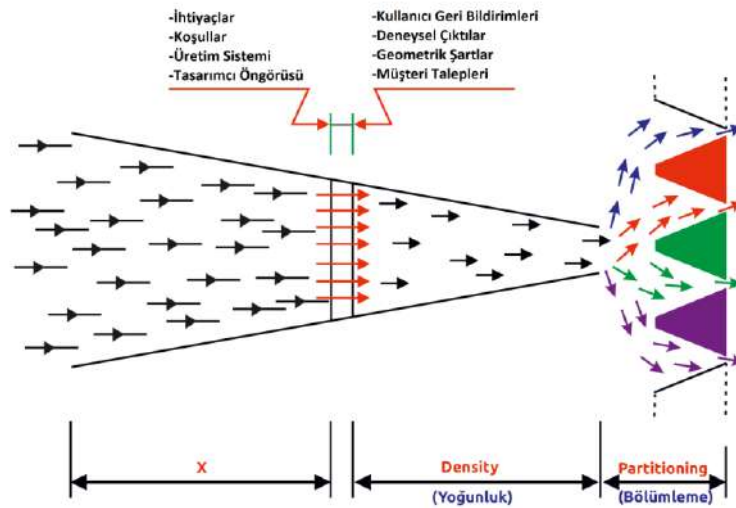
Bu bağlamda bakıldığında 3DP prosesinin yerini de 3DP ve benzeri diğer prosesleri de kapsayacak nitelikte ve büyüklükte yeni bir kavramın alması kaçınılmaz ve zaruri görünmektedir. Bunun en temel sebebi ise, proseslerin her geçen gün daha spesifik bir hal alması ve bir bütünü oluşturan (örneğin nihai ürün) alt sistemlerin her birindeki gelişimin bütünü de (örneğin nihai ürün) etkileyecek olmasıdır. Bu nedenle teknolojik gelişmeler, malzeme bilimindeki ilerlemeler gibi unsurların nihai ürün tasarım ve üretim aşamalarını etkilemesi kaçınılmazdır. Dolayısıyla ürün geliştirme süreci sürekli olarak iyileştirmeye ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla ürün tasarım ve üretim süreçlerinin esnek bir şekilde düzenlenmesi rekabet avantajı sağlamak açısından son derece önemlidir.

4. Sanayi Devrimi olarak adlandırılan süreç içerisinde 3DP gibi teknolojileri de kapsayacak şekilde daha esnek ve kavramsal tasarım yöntemlerine olan ihtiyaç her geçen gün artacaktır. Bu çalışmada, bu ihtiyacı karşılayabileceği düşünülen yeni bir kavram olarak "XDP: X Density Partitioning" yani "XYB: X Yoğunluk Bölümlleme" kavramı önerilmektedir (Şekil 1., Şekil 2.). XYB kavramı, boyuttan bağımsız ama ihtiyaç olması halinde boyutun da bileşenlerden biri olabileceği ve niteliğin ön planda olduğu kavramsal bir prostestir.



Şekil 1. 3DP-XDP parametre dönüşümü

“XD” ifadesindeki X; gereksinimlere göre niteliksel ya da niceliksel bir parametre olabilen ve XDP yaklaşımının uygulanacağı prosesi tanımlayabilecek sayıdaki parametrelerin tamamını ifade etmektedir. Yani kullanımı öngörülebilir parametre sayısıdır ve bu değer ihtiyaca göre değişebilen esnek bir değerdir. “D” ise yoğunluk anlamına gelen “Density” kelimesini sembolize etmektedir. Partitioning (Bölümleme) ise sadece fiziksel yazdırma prosesini değil kalitatif ve kantitatif olarak ele alınabilecek genel bir kavramsal ifade olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2. XDP akış diyagramı

XDP yaklaşımı detaylandırılacak olursa;

X; ihtiyaç, koşullar, üretim sistemi, tasarımcı öngörüsü, müşteri talepleri, pazar ihtiyaçları, kullanıcı geri bildirimleri, deneysel çıktılar ve benzeri bir çok farklı faktörlere göre 1,2,3,4,5,6... gibi değerler alabilen, sayısal değer ifade eden bir parametredir. X, ürün/proses tasarımına doğrudan ya da dolaylı olarak etkisi olan ve tasarıma uygulanabilecek parametrelerin tamamını kapsamaktadır.

D, Density yani yoğunluk; tıpkı X'te olduğu gibi; ihtiyaç, koşullar, üretim sistemi, tasarımcı öngörüsü, müşteri talepleri, pazar ihtiyaçları, kullanıcı geri bildirimleri, deneysel çıktılar ve ayrıca geometrik ve ölçüsel istekleri/sınırlamaları/koşulları içeren parametreler bütünüdür. X, olası tüm parametrelerin adeti olarak ifade edilirken, Density kavramı kendine has özelliği olan ve ürün/proses tasarımının girdi ve çıktıları üzerinde spesifik etkileri olan, ihtiyaca yönelik seçimler sonrasında tasarımcı tarafından ya da pazar ihtiyaçları doğrultusunda belirlenmiş parametreleri anlatmak için kullanılmaktadır.

D terimi için belirlenen parametreler ne kadar spesifik olursa, ürün/proses tasarımı da o denli spesifik özelliklere sahip olacaktır. Ürün/proses tasarımıdaki spesifikasyonların derinleşmesi ise, kaliteyi arttıracak ancak tasarım ve üretim süreçlerinin uzamasına ve zorlaşmasına neden olabilecektir. Bu noktada; üretim ve sistem planlama faaliyetleri, yapay zeka uygulamaları, CIM (Computer Integrated Manufactu-

ring) uygulamaları, PLM (Product Life Management) ve PDM (Product Data Management) sistemleri, otomasyon sistemleri, Japon tarzı üretimde Jidoka adı verilen Autonomation (Automation with human touch ya da Automation with human mind) uygulamaları ve gelecekte daha da etkin bir şekilde kullanımı olacağı düşünülen IoT (Internet of Things) uygulamalarının kullanımı ile tasarım ve üretim faaliyetlerinin yalınlaştırılması ve bu süreçlere insan etkisinin ve katılımının en aza indirgenmesi sağlanabilecektir.

Genel olarak Karanlık üretim/Karanlık fabrika (Lights out Manufacturing) adı verilen ve yukarıda belirtilen uygulamaları içeren üretim anlayışının gelişmesi ile başta üretim olmak üzere sistemi oluşturan tüm süreçler daha verimli, aktif ve kolay işleyecektir. Yani, ürün/proses tasarımıındaki spesifikasyonların derinleşmesinin zaman yönetimi ve zorluk açısından etkisi daha az olacak ve bu spesifikasyonlar da daha etkin bir şekilde kontrol altında olacaktır.

Bölümleme (Partitioning) kavramı; ürün/süreç tasarımıında birbirleri ile ilişkili olan parametrelerin beraber ele alınıp, beraber değerlendirilmesi sürecini anlatan bir kavramdır. Buradaki temel amaç, tasarım aşamasında eş zamanlı olarak kullanılabilir ya da kullanılması gereken parametreleri süreç içinde beraber düşünüp tasarlamaktır. Böylece olası zaman ve emek kayıplarının önüne geçileceği gibi aynı zamanda tasarımın küçük parçalardan oluşan bir yapıya kavuşması sağlanacaktır. Bu durum, hem tasarım süreci sırasında, hem de sonrasında ortaya çıkabilecek problemlere müdahale ederken sistemin tamamı yerine bu alt parçalara müdahale edilebilmesine olanak sağlayacaktır. Partitioning yani bölümleme süreci; fonksiyon bazlı, ürün bazlı, yarı mamul bazlı, zaman bazlı, süreç bazlı ve karma uygulamalar şeklinde gerçekleştirilebilir. Buradaki seçim tamamen tasarımcının/tasarım takımının inisiyatifindedir ki bu inisiyatif, yetkinlik ve deneyim gerektirmektedir.

Bu çalışmada XDP kavramını örneklemek amacı ile bilgisayar giriş bileşenlerinden olan mouse'lar ele alınmıştır. Bir tasarımcının kullanacağı, oyun amaçlı kullanılacak ve amatör bir kullanıcıya yönelik mouse'lar birbirinden farklılık göstermektedir. Buradaki temel seçim kriteri ihtiyaçtır. Tasarımcı, ihtiyacı göz önüne alarak farklı kullanım alanlarına göre uygun parametreleri belirleyip tasarımı bunlara göre şekillendirmektedir.

Mouse tasarımı için XDP yaklaşımı;

i. X'in belirlenmesi: Bu aşamada bir mouse'tan beklenen genel özellikler belirlenir (Çizelge 1.). Burada belirtilen faktörler için bir kısıtlama yoktur. Çok basit kriterler belirlenebileceği gibi, çok spesifik ya da çok uç noktada olan kriterler de belirlenebilir. Buradaki amaç olabileceği düşünülen tüm özellikleri bir arada görmek, bir olası ihtiyaçlar bulutu oluşturabilmektir. Bu kriterlerin tamamı tasarıma uygulanabileceği gibi gereksinimlere göre filtrelenen kriterler seçilerek de tasarıma uygulanabilir.

Çizelge 1. Bir oyun mouse'undan beklenebilecek kriterler

1. DPI (DPI değeri arttıkça hassasiyet artar.)	12. Makrolar (Ekstra tuşlara özellik bağlamak için yazılım)
2. Lazer algılayıcı	13. El ergonomisine genel uygunluk
3. Kablosuz	14. Sağ-sol el kullanımına uygunluk
4. Pil bitmesi durumunda kablolu kullanıma çevirebilme	15. Değiştirilebilir ağırlık
5. Mouse'u, pili şarj edebilecek şart ünitesi formuna uygun tasarlamak	16. Dayanıklılık
6. Mouse'un hareket etmesi ile şarj edilen piller	17. Terlemeye sebep olmamak
7. Ekstra tuşlar	18. Elin üstünde kaymayacağı üst yüzey
8. Ekstra tuşların yerleşimi	19. Değiştirilebilir üst yüzey
9. Mouse üzerinde yeri değiştirilebilen tuş kombinasyonları	20. Mouse'un kolay kayabilmesini sağlayan alt yüzey
10. Kaydırma makarası yerine küresel bir eleman kullanımı	21. Mouse'un kolay hareket etmesini sağlamak için alt yüzeye küçük döner elamanlar koymak
11. Mouse üzerinde tuşlar yerine dokunmatik yüzey kullanmak	22. Kullanıcı, elini mouse üzerinde çektiğinde ışık yanması

Çizelge 1.'de de görülebileceği gibi X değeri 22 farklı parametre ile ilişkilendirilmiştir. Yani X=22'dir. Bu parametrelerin sayısını arttırmak ya da azaltmak mümkündür. Yukarıda da değinildiği gibi buradaki temel amaç istenilebilir/olabilir tüm seçenekleri bir arada görmektir. Burada ortaya konulan fikirler, ileri

aşamalarda inovasyon değeri yüksek olan çıktılara dönüşebilir. Sonraki aşamalarda da olacağı gibi bu aşamada da fikirleri belirlemek için; Beyin Fırtınası, Neden-Sonuç Diagramı çalışmaları ve Süreç Akış Şemaları gibi tekniklerden faydalanılabilir.

ii. D'nin (Density) belirlenmesi: Bu aşamada, ihtiyaçların hangi kriterler üzerinde yoğunlaştığı üzerinde durulur. Temel amaç, ihtiyaç ve istekleri karşılayan ve nihai ürün/proses'te olması gereken kriterleri belirlemektir. Bu aşama, pazara çıkacak ürünün ya da geliştirilecek prosesin ana hatlarının belirlendiği aşamadır. Burada da; Beyin Fırtınası, Neden-Sonuç Diagramları, İstatistiksel Kontrol Yöntemleri ve Süreç Akış Şemaları gibi tekniklerden faydalanılabilir. Aynı zamanda burada tasarımcı/tasarım ekibi de önemli bir rol oynar. Tasarımcı/tasarım ekibinin yetkinliği, deneyimi, karar alabilme kabiliyeti ve inovatif fikirler üretebilme yeteneği bu aşamanın verimli, aktif ve hızlı bir şekilde yürümesini sağlar.

Mouse örneğine dönüldüğünde;

Bir önceki aşamada X değeri 22 olarak belirlenmişti. Bu aşamada, bir oyun mouse'unda olması gereken kriterler üzerinde durulacaktır. Belirtilen 22 kriter içerisinde bir oyun mouse'unda olması gereken özellikler yani istek ve ihtiyaçlar yukarıda belirtilen teknikler ya da tasarımcı/tasarım ekibinin belirleyeceği başka teknikler kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir (Çizelge 2.).

Çizelge 2. Oyun mouse'ndan beklenen kriterler

1. DPI (DPI değeri arttıkça hassasiyet artar.)	7. Sağ-sol el kullanımına uygunluk
2. Lazer algılayıcı	8. Değiştirilebilir ağırlık
3. Kablosuz	9. Dayanıklılık
4. Ekstra tuşlar	10. Terlemeye sebep olmamak
5. Makrolar (Ekstra tuşlara özellik bağlamak için yazılım)	11. Elin üstünde kaymayacağı üst yüzey
6. El ergonomisine genel uygunluk	12. Mouse'un kolay kayabilmesini sağlayan alt yüzey

Görüldüğü üzere bir oyun mouse'u için gereken temel nitelikler yukarıda ki gibi 12 maddeye indirgenmiştir. Böylece D=12 olarak belirlenir. Bu sayıyı arttırmak/azaltmak mümkündür, bu durum genel olarak istek ve ihtiyaçlarla doğru orantılı olup, üretici ve kullanıcı tercihlerine bağlı spesifik bir karardır. D'yi belirlemek; tasarım, üretim planlama ve üretim aşamalarını taslak olarak görüp önceden kurgulayabilme ve olası ihtiyaçları görebilme açısından yardımcı olacaktır.

iii. P'nin (Partitioning) tespiti: P, ürün/süreç tasarımında, birbirleri ile ilişkili olan kriterlerin prosese aynı grupta (bölümde) dahil edilip, değerlendirilmesini yani bölümlendirme aşamasını temsil etmektedir. Mouse örneğinde bir önceki aşamada çeşitli filtreleme kriterleri kullanılarak D=12 değeri belirlenmişti. Bu aşamada ise, süzülen bu kriterler; fonksiyon bazlı, ürün bazlı, yarı mamul bazlı, zaman bazlı, süreç bazlı ya da karma bölümlendirme tekniklerinden uygun olanı kullanılarak gruplara ayrılır. Bu çalışma için oyun mouse'u tasarımında fonksiyon ve kullanım bazlı yaklaşım tercih edilmiştir. Burada bu yaklaşımın seçimi ihtiyaçlar göz önüne alınarak belirlenmiş olup, tasarımcının/tasarım takımının inisiyativedir. Bu inisiyatifi kullanmak; karar alabilme kabiliyeti, yetkinlik ve deneyim gerektirmektedir. Bu şartlar dikkate alınarak aşağıda belirtildiği gibi bir bölümlendirme yapılmıştır (Çizelge 3.).

Çizelge 3. Bölümleme

P1; Ergonomi

El ergonomisine uygunluk, Sağ-sol el kullanımına uygunluk, Ekstra tuşlar, Değiştirilebilir ağırlık

P2; Malzeme

Terlemeye sebep olmamak, Elin üstünde kaymayacağı bir üst yüzey, Mouse'un kolay kayabilmesini sağlayan alt yüzey, Değiştirilebilir ağırlık, Dayanıklılık(Üretim teknolojisi)

P3; Teknoloji

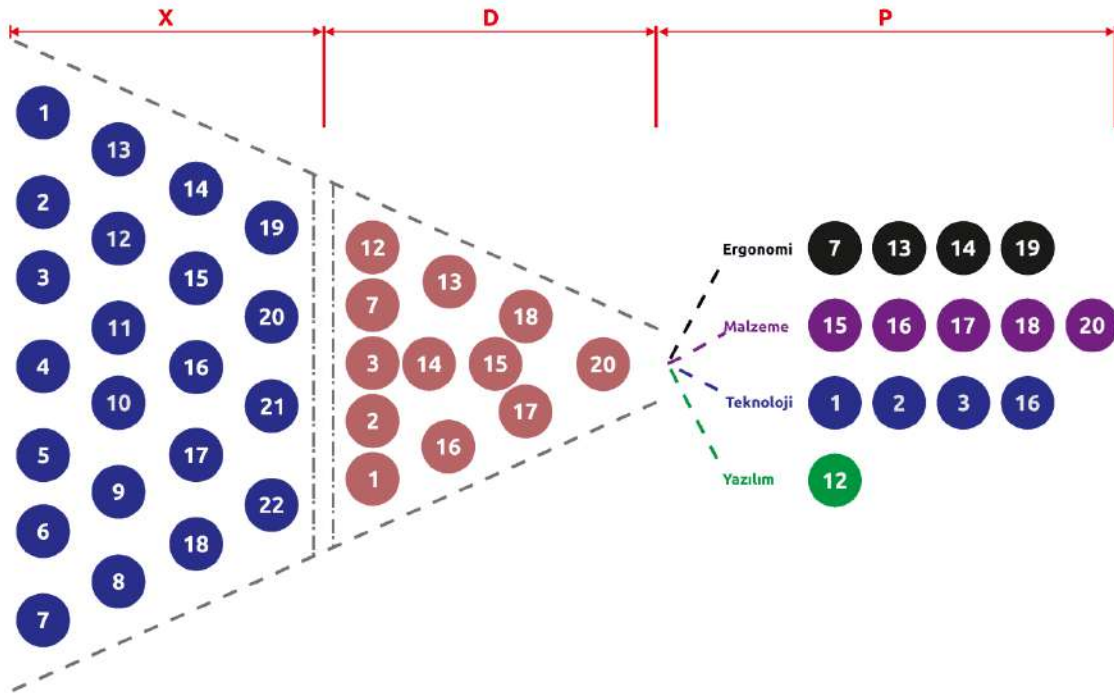
DPI, Lazer algılayıcı, Kablosuz, Dayanıklılık(Üretim teknolojisi)

P4; Yazılım

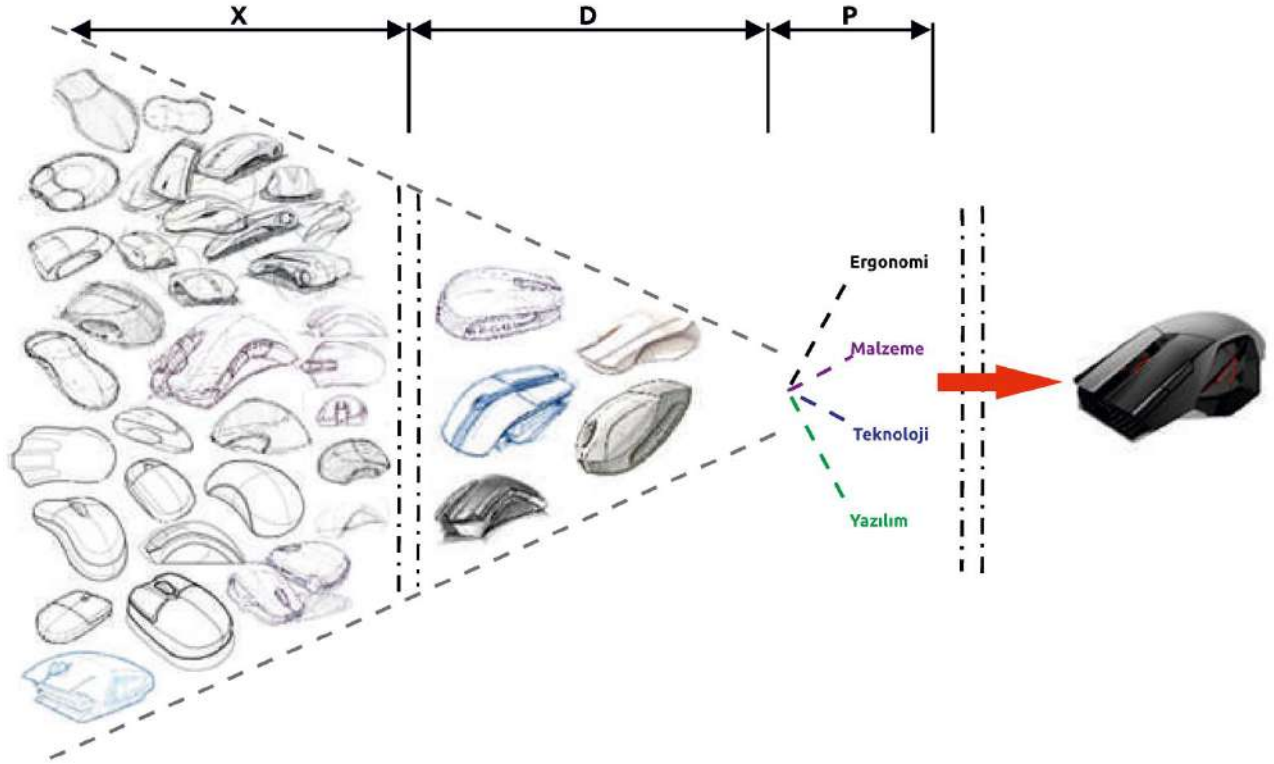
Makrolar

Şekil 3.'te görüldüğü üzere ergonomi, malzeme, teknoloji ve yazılım bazlı 4 bölümle yapılmıştır. Böylece $P=4$ olarak alınır. Bu bölümlemeyi farklı kriterler dikkate alınarak ta yapmak mümkündür. Tasarımcı/tasarımcı ekibinin seçimine göre istenilen kombinasyonda seçimler yapılabilir.

Sonuç olarak; $X=22$, $D=12$ ve $P=4$ olarak belirlenmiştir (Şekil 3, Şekil 4). Bu sonuç, $XD=22/12/4$ şeklinde gösterilir. Bu gösterim; 22 farklı seçenek arasından, 12 kriterin belirlendiğini ve bu 12 kriterin de 4 ayrı bölümde incelendiğini ifade etmektedir. Yukarıda da görüldüğü gibi bazı kriterler 2 bölümde de yer alabilmektedir.



Şekil 3. XDP=22/12/4 akış diagramı



Şekil 4. XDP yaklaşımı ile mouse tasarımı

3. Sonuçlar

Endüstri 4.0'ın her geçen gün hayatın tüm alanlarına etkin bir şekilde girmeye başladığı günümüzde 3D yazdırma prosesi de çok farklı kullanım alanlarına sahip olmuştur. Teknolojik gelişimin hızı ve büyüklüğü arttıkça 3D yazdırma gibi fiziksel proseslerin de daha nitelikli, daha geniş kapsamlı ve üst seviye kavramsal proseslere dönüşmesinin söz konusu olacağı açıktır. Bundan dolayı, 3D Printing (3DP) prosesi baz alınarak yeni bir kavramsal proses geliştirmek fikrinden hareketle XD Bölümleme (XDP) adlı yeni bir kavram geliştirilmiştir.

Çalışmada örnek olarak incelenen bilgisayar mouse'u için XDP Yaklaşımı uygulanmıştır. Çalışma sonunda $X=22$, $D=12$ ve $P=4$ olarak belirlenmiştir. Daha sonra mouse için $XDP=22/12/4$ denilmiştir. $XDP=22/12/4$ ifadesi, ürün/proses tasarımına uygulanabilecek olası 22 farklı parametre içinden 12 gerek/yeter parametrenin seçildiğini ve bu 12 parametrenin de 4 bölüme ayrılarak değerlendirildiğini göstermektedir.

XDP yaklaşımın faydaları aşağıda sıralanmıştır:

1. Tasarım sürecine geçmeden önce üzerinde durulan faktörler hakkında yalın ve kolay anlaşılır bilgiye sahip olma ve bu bilgiyi sonraki zamanlarda benzeri diğer tasarımlarda kullanabilme kolaylığı sağlar.
2. Nihai ürün ya da sürecin tasarımı gerçekleştirildikten sonra ortaya çıkabilecek sorunlara, hazırlanmış olan XDP dosyası içeriğine bakarak hızlı ve etkin bir şekilde müdahale edilme kolaylığı sağlar.
3. İlerleyen zamanlarda iyileştirmeler yapılmak istenmesi durumunda hangi parametreler kullanılarak geliştirme yapılabileceğinin görülmesini kolaylaştırır.
4. Kavramsal tasarımı gerçekleştirirmeden önce ürün/proses için istenilebilecek ve gerçekleştirilebilecek alternatiflerin ve kombinasyonların basit bir şekilde görülmesini sağlar. Bu da istenilen nihai sonuç için bir ön görüş oluşmasına katkı verir.
5. Kavramsal tasarıma, detaylandırılmış veri kaynağı sağlar. Böylece kavramsal tasarım aşaması hızlandırılabilir.

6. Bazı durumlarda XDP yaklaşımında görülen sonuçlar, ilgili ürün/proses tasarımının konusunun aynı işlevi görecektir farklı bir ürün/proses tasarımı ile değiştirilmesi gerektiğini bilgisini de verebilir. Böylece henüz tasarım sürecinin en başındayken benzeri sonucun alınabileceği yeni bir yönlendirme gerçekleştirilebilir.

Sonuç olarak XDP Yaklaşımının faydaları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Prosesler her geçen gün daha karmaşık yapılar haline gelirken, birbiri ile ilişkili olarak çalışan alt prosesleri/ürünleri, alt proseslerin/ürünlerin oluşturduğu yan prosesleri/ürünleri ve prosesin/ürünün tümünü yani sistemleri/nihai ürünleri basit bir şekilde tanımak, tanımlamak ve detaylarını bilmek, genel süreci daha net bir şekilde görebilmek açısından faydalı olacaktır. Sistemi bu şekilde bir kroki halinde görebilmek, sisteme hakim olmak ve belirli/belirsiz gerçekleşen etkilere karşı gerekli aksiyonları almak açısından destek verici olacaktır. XDP yaklaşımı da bu destek verme noktasında yardımcı olarak devreye girecek bir kavram olarak kullanılabilir.

Referanslar

1. Görçün Ö.M., Serer M., *Dördüncü Endüstri Devrimi, Endüstri 4.0*, Beta Yayıncılık, Ağustos 2016, İstanbul
2. Striukova, R., From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation, *Technological Forecasting & Social Change*, 102: 214–224, 2016.
3. Bernard, A. and Fischer, A., New trends in rapid product development, *Industrial Engineering Research*, 1 (1): 1-18, 2012.
4. Acuña, F., Rivas, D., Chancusi, S. And Navarrete, P., Design and construction of a 3D printer auto controller wirelessly through of free software, *IEEE Latin America Transactions*, 13: 6, 2015.
5. Kashdan, L., Seepersad, C. C., Haberman, M. and Wilson, P. S., Design, fabrication, and evaluation of negative stiffness elements using SLS, *Rapid Prototyping Journal*, 18 (3): 194-200, 2012.
6. Polzin, C., Spath, S. and Seitz, H., Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process, *Department of Mechanical Engineering*, 19 (1): 37-43, 2013.
7. Evans, M. A. and Campbell, R. I., A comparative evaluation of industrial design models produced using rapid prototyping and workshop-based fabrication techniques, *Rapid Prototyping Journal*, 9 (5): 344 – 351, 2003.
8. Guangchun, W., Huiping, L., Yanjin G. and Guoqun, Z., A rapid design and manufacturing system for product development applications, *Rapid Prototyping Journal*, 10 (3): 200 – 206, 2004.
9. Kroll, E. and Artzi, D., Enhancing aerospace engineering students learning with 3D printing wind-tunnel models, *Rapid Prototyping Journal*, 17 (5): 393 – 402, 2011.
10. Campbell, I., Bourell, D. and Gibson, I., Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age, *Rapid Prototyping Journal*, 18 (4): 255-258, 2012.
11. Billiet, T., Vandenhaute, M., Schelfhout, J., Vlierberghe, S. V. and Dubruel, P., A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering, *Biomaterials*, 33 (1): 6020-6041, 2012.
12. Singare, S., Lian, Q., Wang, W. P., Wang, J., Liu, Y., Li, D. and Lu, B., Rapid prototyping assisted surgery planning and custom implant design, *Rapid Prototyping Journal*, 15 (1): 1923, 2009.

13. Santos, D. M. C., Pertence, A. E. M., Campos, H. B. and Cetlin, P. R., The development of 3D models through rapid prototyping concepts, *Journal of Materials Processing Technology*, 169 (1): 1-4, 2005.
14. Stephens, B., Azimi, P., El Orch, Z. and Ramos, T., Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers, *Atmospheric Environment*, 79: 334-339, 2013.
15. Günther D., Heymel B., Günther F. J. and Ederer I., Continuous 3D-Printing for additive manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 20 (4): 320–327, 2014.
16. Çantı E., Aydın M., Yıldırım F., Development of Novel Nanocomposite Materials for 3D Printing, International Symposium on 3D Printing Technologies, S: 76-83, İstanbul, 2016.
17. Zhong W, Li F, Zhang Z, Song L, Li Z., Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling, *Mater Sci. Eng. A.*, 301:125–30, 2001.
18. Robert W. Gray IV, Donald G. Baird, Jan Helge Bøhn.: Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4 Iss: 1, pp.14 – 25, 1998.
19. L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur: Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties, *Journal of Manufacturing Processes*
20. Seyi Onagoruwa, Susmita Bose ve Amit Bandyopadhyay: Fused Deposition of Ceramics (FDC) and Composites, WA 99164-2920
21. Mayda , M., Web tabanlı kavramsal tasarım, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6, 2007.
22. Börklü, H.,R., Makine tasarım dili, *Mesleki ve Teknik Eğitim Sempozyumu*, Elazığ, 1, 1995.
23. Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. ve Grote, K. H., “*Engineering Design – A Systematic Approach*”, *Springer Verlag*, 3. Baskı, London, UK , 2007.
24. Pahl, G. ve Beitz, W., Engineering Design, *The Design Council, Springer-Verlag, London*, 1988.
25. Börklü, H., R., Computer-aided conceptual design based on design catalogues, *Politeknik Dergisi*, 4 (3) : 77- 78, 2001.
26. Guan, L., Wang, J. And Wang, L., Integrated approach for parallel machine tool conceptual design, *Int. Conf. on Robotic, Intelligence Systems and Signal Processing*, China, 456–461, 2003.
27. Carl, T.F., A conceptual design of an underwater vehicle, *Ocean Engineering*, 33: 2087-2104, 2006.
28. Gao, X., And Li, Z., “Computer-aided conceptual design of mechanical products using polychromatic sets”, *Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, China, 25-28, 2006.

THE ALGORITHM DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION FOR 3D PRINTERS BASED ON ADAPTIVE PID CONTROLLER

Aytaç ALTAN^a, Rifat HACIOĞLU^b

a,b, Bülent Ecevit University, Engineering Faculty, Electrical Electronics Engineering Department, Zonguldak, Türkiye

{aytacaltan, hacirif}@beun.edu.tr

Abstract

The 3D printers widely used in the world are produced in different mechanical and electronic designs. The 3D printers which have various mechanical structures such as cartesian, delta and core (xy, xz) already are used open source code software such as Sprinter, Marlin, Cura 3D and Teacup. The control of the 3D printers is usually done by the classical PID control algorithm. In this study, we have developed for the designed 3D printer a new software by using adaptive PID control algorithm instead of classical PID. Five step motors of the designed 3D printer are controlled by the adaptive PID. In addition, there are both heating and cooling processes in the extruder system and these processes are controlled by the adaptive PID. The mechanical design uses a belt and pulley drive system which is suitable for accelerated movements. In the system software, 3D Printing Software Pipeline (input model, orientation and positioning, support structures, slicing, path planning, machine instructions) is applied. The control algorithms for extruder and step motors are prepared as separate function files in software implemented in C. It has been observed that the designed software is particularly successful in eliminating errors on the surface of the products.

Keywords: Adaptive PID, 3D printer, Step motor, Algorithm.

3 BOYUTLU YAZICILAR İÇİN UYARLAMALI PID KONTROL TABANLI ALGORİTMA GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEKLENMESİ

Özet

Dünyada yaygın olarak kullanılan 3B yazıcılar farklı mekanik ve elektronik tasarımlarda üretilmektedirler. Kartezyen, delta ve core (xy, xz) gibi çeşitli mekanik yapıları sahip olan 3B yazıcılarda hâlihazırda Sprinter, Marlin, Cura 3D ve Teacup gibi açık kaynak kodlu farklı yazılımlar kullanılmaktadır. 3B yazıcıların denetimi genellikle klasik PID denetim algoritması ile yapılmaktadır. Bu çalışmada, klasik PID yerine uyarlamalı PID kontrol algoritması kullanılarak yeni bir yazılım ile 3B yazıcı tasarlanmakta ve geliştirilmektedir. Tasarlanan 3B yazıcıda beş adet adım motoru kullanılmakta, her bir motorun denetimi uyarlamalı PID ile yapılmaktadır. Ayrıca, ekstruder sisteminde hem ısıtma hem de soğutma yapıları bulunmakta olup bu süreçler uyarlamalı PID ile kontrol edilmektedir. Mekanik tasarımında ivmeli hareketler için elverişli olan kayış ve kasnak sürücü sistemi kullanılmaktadır. Sistemin yazılımında, 3B yazıcı yazılım aşamaları (giriş modeli, yönlendirme ve konumlandırma, destek yapıları, dilimleme, yol planlama, makine komutları) uygulanmaktadır. C ortamında gerçekleştirilen yazılımda ekstruder ve step motorlar için kontrol algoritmaları ayrı fonksiyon dosyaları şeklinde hazırlanmaktadır. Tasarlanan yazılımın özellikle ürünlerin yüzeyindeki hataların giderilmesinde başarılı olduğu gözlemlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uyarlamalı PID, 3 boyutlu yazıcı, Adım motor, Algoritma.

1. Introduction

The 3D printer is called a device that produces models that are designed on a computer or scanned in 3D using different materials without the need for any pattern. 3D solid objects are produced by 3D printers with the aid of 3D file prepared in digital environment. The models that have been designed in the

digital environment come into being as tangible objects in a short time thanks to 3D printers. The different methods such as Fused Deposition Modelling (FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Polyjet Photopolymer, Selective Laser Sintering (SLS), Stereolithography (SLA) and Syringe Extrusion are used to perform the 3D printing process [1]. The most widely known and used of these methods is FDM. In the FDM method, extruded thermoplastic or wax from a heated extrusion head is used to track the solid areas of the physical models. The thermoplastic such as Polylactic Acid (PLA) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) materials that can take shape with heat are used in this method [2]. In this study, FDM type 3D printer has been used.

The technological development of additive manufacturing and 3D printing provides a significant contribution to the rapid prototyping of commercial products and designed products [3-5]. The minimum error production of prototypes of commercially produced or designed products is very important. The 3D printing process needs to be controlled so that these prototypes can be produced with minimal error. The extruder position control of the 3D printers is usually done by the classical PID control algorithm [6-8]. Even though the control algorithms such as PID are used in 3D printers, it is possible some errors especially on the surface of the produced objects [9, 10]. These errors are seen more common, especially during the production of objects with complex geometries. The elimination of these errors leads to increase the cost of production.

The 3D printers widely used in the world are produced in different mechanical and electronic designs. The 3D printers which have various mechanical structures such as cartesian, delta and core (xy, xz) already are used open source code software such as Sprinter, Marlin, Cura 3D and Teacup [11-13]. In these 3D printers, the control of the motors and the heating and cooling processes in the extruder system are controlled by classical control methods.

In this study, we have developed for the designed 3D printer a new software by using adaptive PID control algorithm instead of classical PID. Five step motors are used in the designed 3D printer. The heating-cooling processes in the extruder system and each motor of the designed 3D printer are controlled with the adaptive PID instead of classical PID. The control algorithms for extruder and step motors are prepared as separate function files in software implemented in C. It has been observed that the designed software is particularly successful in eliminating errors on the surface of the products.

This article is organized as follows: mechanical design of 3D printer in Section II. The adaptive PID of 3D printer is expressed in Section III. Experimental studies and discussions are presented in Section IV, and conclusions are finally given Section V.

2. Mechanical Design of 3D Printer

The 3D printers are manufactured in different designs such as cartesian, delta and core xy. Cartesian-designed 3D printers usually consist of a thermoplastic sprayer attached to the xyz cartesian platform. In the cartesian 3D printer, the x and y axis movements are provided by the eccentric trigger strap. The movement in the z axis is controlled by two step motors using a screw-on mile. A typical cartesian 3D printer [14] is shown in Figure 1.

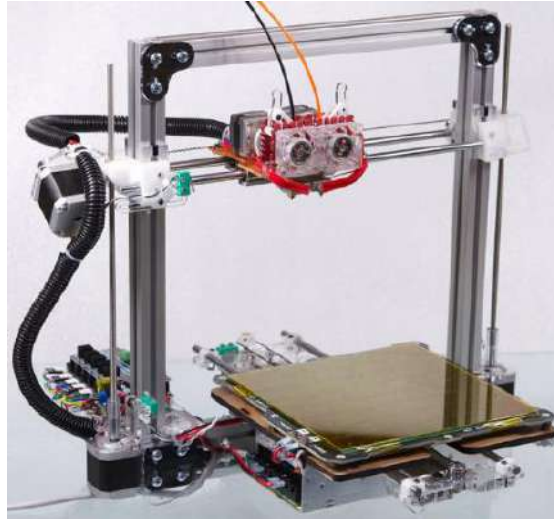


Figure 1. A typical cartesian 3D printer (a Deezmaker Bukobot Duo).

The main difference that distinguishes delta printers from other printers is that they are driven from three points by a three step motor to ensure vertical z axis movement. This difference is due to the triangular shapes of the delta printers. A deltabot 3D printer [14] is shown in Figure 2.



Figure 2. A deltabot 3D printer (the seeMeCNC Orion).

In core xy designed 3D printers, x and y axis movement is provided by strap pulleys. In this design, the head where the smelting process is performed is connected to the xy coordinate system. The movement of the heating table is in the z axis direction. The heating plate is controlled by step motors via screw shaft. The configuration of core xy designed 3D printer [13] is shown in Figure 3.

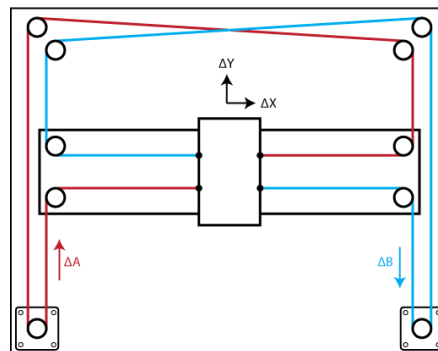


Figure 3. Core xy configuration [15].

In this section of our study, the mechanical design and prototype of the 3D printer are realized. The 3D printer, which is designed as a cartesian type, is used five step motors. The dimensions of the designed

and produced prototype are 320x390x350 mm. Also, in designed 3D printer is used a heated table with dimensions of 210x210x210 mm, a nozzle with a size of 0.4 mm and xy belt mechanism for driving. The 3D printer, which is designed and prototyped, is presented in Figure 4 and Figure 5.



Figure 4. Front view of the designed 3D printer.

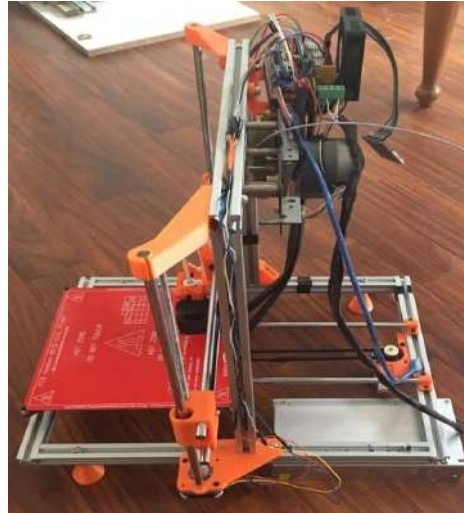


Figure 5. Side view of the designed 3D printer.

The system is designed to take place in the open housing. With the prototype 3D printer the goal is to minimize errors on the surface of the produced objects. The surface deformation, which is a major problem especially in the production of objects with complex geometries, is greatly reduced by the 3D printer being designed. In this study, a body built from sigma profiles is designed because it can be easily mounted on the prototype produced and easy attachment can be made. Axes are mounted on the body formed by the sigma profiles and fasteners. The extruder, which is the part where the filament is pushed into the nozzle tip, is located on the y axis. To facilitate the movement of the extruder, toothed belts and ball-bearings are used. Also, a fan is used to cool the nozzle against overheating. The front view of the extruder in the designed 3D printer is shown in Figure 6. In the designed 3D printer, the fixing of the heating table is carried out as in the Prusa model construction and the fixing mechanism is presented in Figure 7. The heating plate moves in the z direction. As shown in Figure 7, the heating plate is fixed to the bearings by means of bolts in accordance with the design specifications of the plate fastener. The heat value of the heating plate is controlled by the electronic processor card. In addition, the designed system also has a card holder for the mounting of electronic cards.

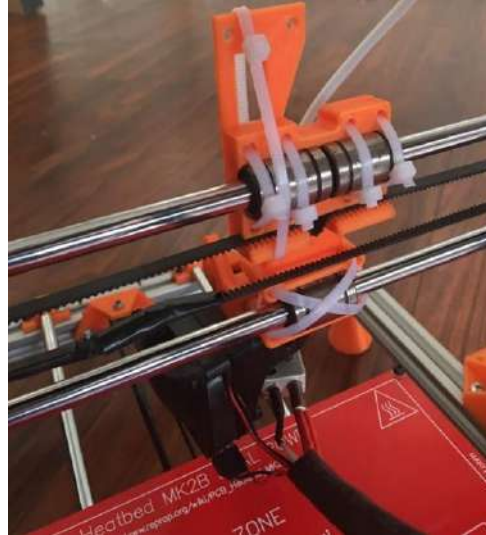


Figure 6. Front view of the extruder in the designed 3D printer.



Figure 7. The view of heating table and heater table fixing.

3. Adaptive PID Algorithm for 3D Printer

It is very important to control the speeds of the x, y and extruder axes as well as the speed of the printer so that an object can be produced in good shape with the 3D printer. The MakerBot-endorsed open-source firmware for the Replicator I, Cupcake, and Thing-O-Matic printers includes default acceleration and speed change settings. The Marlin firmware, which is used on a variety of printer designs, also specifies defaults. Acceleration specified by Sailfish is 1000 mm/sec^2 , while Marlin uses a much higher 3000 mm/sec^2 . Sailfish's speed change default is 15 mm/sec and Marlin's is about the same at 20 mm/sec . Generally, these parameters are tuned by manufacturers or users to minimize print time and avoid skipped steps while maintaining smooth extrusion and finished part surface quality. Because the motors are run open-loop, any steps skipped are undetectable and therefore unrecoverable, resulting in the entire print shifting in the x or y direction from that layer onwards [16].

Nowadays 3D printers are usually controlled by the classical PID or open loop control method. Unlike other studies, the 5 step motors used in the 3D printer designed in this study are controlled by the adaptive PID algorithm in software. In addition, the nozzle and heater plate temperatures are controlled by the same algorithm. The control objective of designed 3D printer is to find the suitable control variables so that the system tracks desired load angular position and velocity with accepted errors while keeping the states and control variables bounded too. There are many internal and external uncertainties that may affect the performance of the controlled system. These uncertainties are the stiffness of the flexible

shaft, the inertia of the rotor [17]. The adaptive control is used to tune the parameters of the PID controller online. This is achieved by scheduling the gains of the PID control based on system performance indices as shown in Figure 8. In Figure 8, u_d and u_q denote the controller's output signal, ω_r and θ_r are the reference angular speed and angular displacement, respectively. The control closed loop outputs are the actual angular displacement and speed (θ, ω). In this study, two motors used for z axis control, two motors used for x and y axes control and one motor used for driving the filament are controlled by adaptive PID algorithm. In the system software, 3D Printing Software Pipeline is applied as shown Figure 9. The control algorithms for extruder and step motors are prepared as separate function files in software implemented in C.

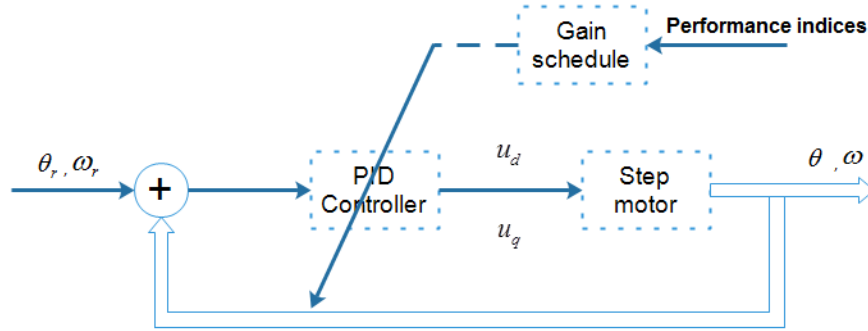


Figure 8. Block diagram of adaptive PID controller.

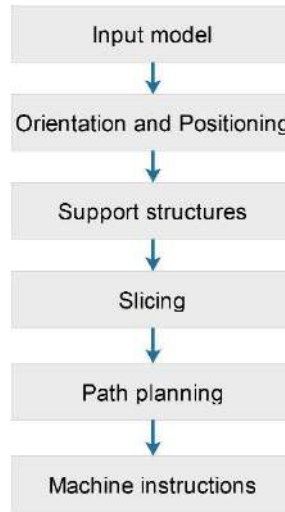


Figure 9. 3D printing software pipeline.

4. Experimental Studies and Discussion

The coordinate information obtained from the G code of the object drawn in the CAD environment is prepared to be applied to the adaptive PID controller for driving the motors as binary values. Also, in the designed 3D printer, the table temperature is one of the factors affecting the print quality and the adhesion to the table. In this study, the temperature of the 3D printer table is set at 70 ° C. Its control is also provided by the adaptive PID controller. The objects printed with classical PID and adaptive PID at 100 mm / sec are presented in Figure 10 and Figure 11, respectively.

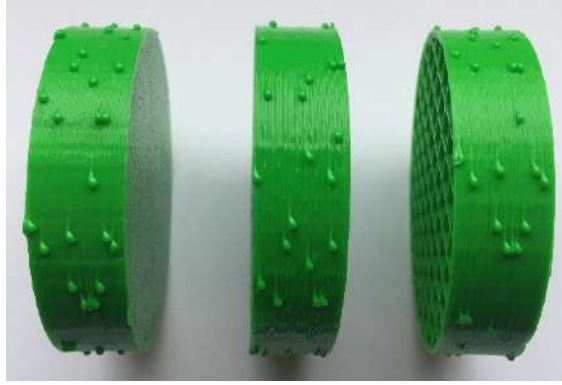


Figure 10. The objects printed with PID control at 100 mm/sec.



Figure 11. The objects printed with adaptive PID control at 100 mm/sec.

The designed 3D printer is operated at 100 mm/sec and the surface areas of the objects printed with classical PID and adaptive PID are compared. It has been observed that the surface area of objects printed with the adaptive PID control have a marked improvement compared to the surface area of the objects printed with the classical PID control. The printing of the objects was completed in 14 minutes with a nozzle of 0.4% and a filling of 60%. Note that classical PID object has been prepared as same time as adaptive PID. The PID coefficients for the designed 3D printer were given in Table 1. It is obtained that the surface deformation of objects printed with the adaptive PID is 1.5% while the surface deformation of the objects printed with the classical PID is 28%. The circular selection of the geometry of the object to be printed in this study is rapid change in the surface coordinates relative to the linear geometric shape.

Table 1. PID coefficients of designed 3D printer.

	Kp	Ki	Kd
Case 1	4	5	0.14
Case 2	10	0.293	1
Case 3	3	0.521	0.821

5. Conclusion

The designed for cartesian construction the 3D printer was controlled with classical PID and adaptive PID. The position of the 5 step motors used in the 3D printer, the temperature of heating table and nozzle were controlled by the both classical PID and adaptive PID. The circular geometric shapes were printed with both controller methods and surface defects of shapes were investigated. It was obtained that the surface deformation of objects printed with the adaptive PID was 1.5% while the surface deformation of the objects printed with the classical PID was 28%. In the system software, 3D Printing Software Pipeline (input model, orientation and positioning, support structures, slicing, path planning, machine instructions) was applied. The control algorithms for extruder and step motors were prepared as separate function files in software implemented in C. It has been observed that the designed software is particularly successful in eliminating errors on the surface of the products.

References

1. Prince, J. D., "3D printing: an industrial revolution", Journal of Electronic Resources in Medical Libraries, Vol. 11 (1), pp. 39-45, 2014.
2. Hunt, G., Mitzalis, F., Alhinai, T., Hooper, P. A., and Kovac, M., "3D printing with flying robots", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 4493-4499, 2014.
3. Petrovic, V., Gonzalez, J. V. H., Ferrando, O. J., Gordillo, J. D., Puchades, J. R. B., and Grinan, L. P., "Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies", International Journal Production Research, Vol. 49 (4), pp. 1061-1079, 2011.
4. Lipson, H. and Kurman, M., "Fabricated: the new world of 3D printing", John Wiley & Sons, 2013.
5. Gibson, I., David, R., and Brent, S., "Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing", Springer, 2014.
6. Barnett, E. and Gosselin, C., "Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot", Additive Manufacturing, Vol. 7, pp. 27-44, 2015.
7. Choi, J. W., Kim, H. C., and Wicker, R., "Multi-material stereolithography", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211 (3), pp. 318-328, 2011.
8. Wei, Y., Chen, Y., Yang, Y., and Li, Y., "Novel design and 3-D printing of nonassembly controllable pneumatic robots", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21 (2), pp. 649-659, 2016.
9. Güler, B. and Çetinkaya, K., "Industrial sizes double nozzle and cartesian type 3D printer design and prototyping", International Symposium on 3D Printing Technologies, pp. 128-137, 2016.
10. Akçay, T., Semiz, S., and Aykut, Ş., "Design and product testing of 3 dimensional printers", International Symposium on 3D Printing Technologies, pp. 294-305, 2016.
11. Anzalone, G. C., Wijnen, B., and Pearce, J. M., "Multi-material additive and subtractive prosumer digital fabrication with a free and open-source convertible delta RepRap 3-D printer", Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 (5), pp. 506-519, 2015.
12. Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y. H., and Hong, G. S., "An overview of 3D printing technologies for food fabrication", Food and Bioprocess Technology, Vol. 8 (8), pp. 1605-1615, 2015.

13. Blandon, S., Amaya, J. C., and Rojas, A. J., "Development of a 3D printer and a supervision system towards the improvement of physical properties and surface finish of the printed parts", IEEE 2nd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), pp. 1-7, 2015.
14. Horvath, J., "Mastering 3D printing", Apress, 2014.
15. Moyer, I. E., "Core XY", July 2012. (Available: <http://corexy.com/theory.html>)
16. Weiss, B. M. K., "Closed-loop control of a 3D printer gantry", Master of Science Thesis, University of Washington, 2014.
17. Elsodany, N. M., Rezeka, S. F., and Maharem, N. A., "Adaptive PID control of a stepper motor driving a flexible rotor", Alexandria Engineering Journal, Vol. 50 (2), pp. 127-136, 2011.

MÜHENDİSLİK EĞİTİMİ İÇİN MALZEME KRİSTAL KAFES YAPILARININ MODELLENMESİ VE 3 BOYUTLU BASKISI

Kutay AYDIN, Arif GÖK, Ferhat GÜL

*Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya/TÜRKİYE
kutay.aydin@amasya.edu.tr, arif.gok@amasya.edu.tr, ferhat.gul@amasya.edu.tr*

ÖZET

Bu çalışmada malzeme kristal yapılarının bilgisayar ortamında katı modelleme programlarıyla STL (STereoLithography) formatında modellenmesi ve 3B (üç boyutlu) yazıcı teknolojisi kullanılarak imal edilmesi incelenmiştir. Üretilen 3B malzeme kristal yapıları sayesinde mühendislik eğitimi alan öğrenciler, dersleri somut makroskopik örneklerle inceleyip daha iyi kavrayacaklardır. Ayrıca anlaşılması ve zihinde canlandırılması zor konuların öğrencilere anlatılma süresi kısılacak ve bu materyaller sayesinde daha etkili bir eğitim ortamı oluşturulabilecektir.

Anahtar kelimeler: 3B üretim, 3B yazıcılar, kristal yapı.

MODELLING AND 3D MANUFACTURING OF MATERIAL CRYSTAL STRUCTURES FOR ENGINEERING EDUCATION

Abstract

In this study, the modelling in STL (STereoLithography) format with computer aided design programs and manufacturing using 3D printer technology of the material crystal structures are investigated. Through produced 3D material crystal structures, engineering students will study the lessons with tangible macroscopic examples and get a better understanding. In addition, the duration of lecturing to students of subjects that are difficult to understanding and imagine will be shorten and these materials will provide a more effective educational environment.

Keywords: 3D manufacturing, 3D printers, crystal structure.

1. Giriş

Teknoloji, teorik bilgilerin günlük yaşamımıza uyarlanması ve uygulanması yöntemidir. Diğer bir yandan teknolojinin gelişmesi ve bununla birlikte bilgi birikiminin sürekli artması, içinde bulunduğumuz çağın en temel özelliğidir. Bilginin artması ile toplumların bu gelişime uyum sağlaması zorunlu hale gelmiştir. Bu uyum sağlama süreci eğitim-öğretim sistemini ve insan-makine etkileşimini derinden etkilemektedir. Bu sebeple uyumun sağlanması, öğrenme ve öğretme sürecinde eğitim teknolojileri ve bunun geliştirilmesi ile mümkün olmaktadır [1].

Mühendislik eğitimi ve özellikle Makine Mühendisliği eğitimi teknolojik gelişmelerden en çok etkilenen bilim dallarından biridir. Bu dalda eğitim teknolojilerinin etkin bir biçimde kullanılması ve geliştirilmesi oldukça önemlidir. Makine Mühendisliği öğrencileri, teorik içerikli derslerin yanında uygulama içerikli laboratuvar derslerini de eğitim ve öğretim sürecinde tamamlamaktadırlar. Bu süreçte yoğun teorik içeriğe maruz kalan öğrenciler, öğrendikleri konu ve kavramları hayal güçlerinin dışına taşıyacak bir takım somut materyallere ihtiyaç duymaktadırlar. Malzeme kristal kafes yapıları uygulama materyali açısından, öğrencilerin ihtiyaçların duydukları öğelerdir.

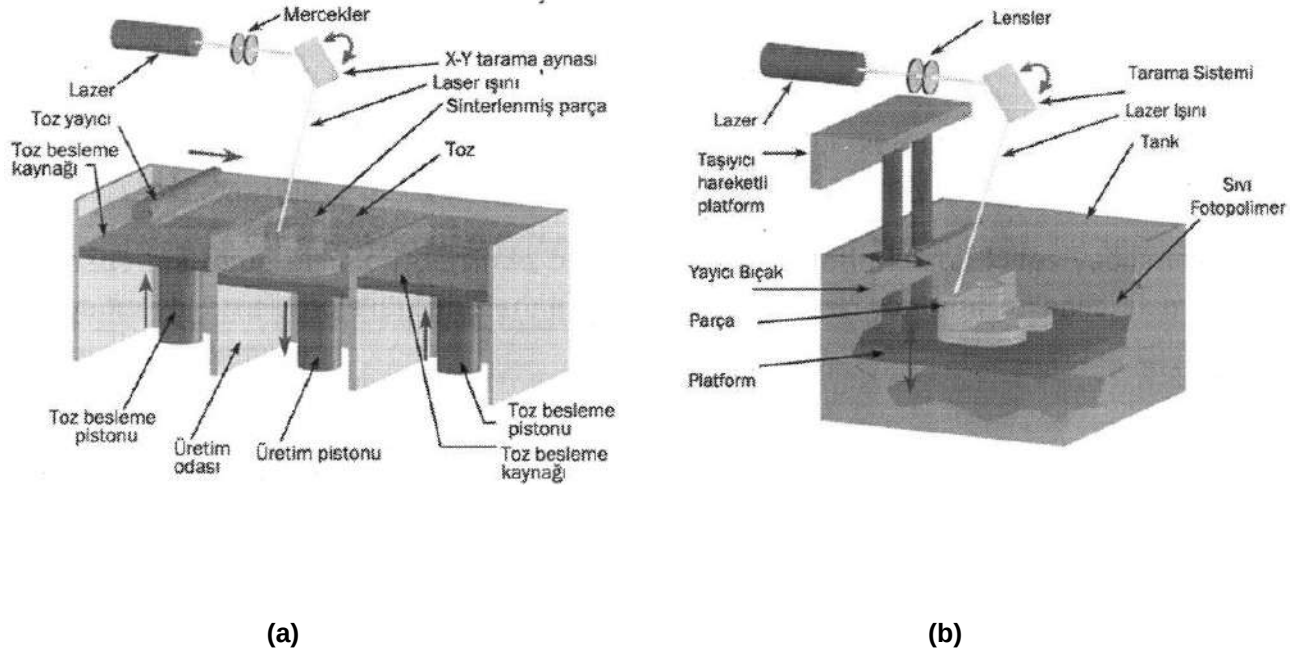
Malzeme bilimi dersinin öğretilmesi konusunda yaşanan birtakım zorluklar şu şekilde sıralanmıştır [2]:

- Laboratuvar gibi gerekli altyapı zayıftır.
- Öğrenciler teknik terimlere karşı yabancılık çekmektedirler.
- Faz diyagramları, atom ve kristal kafes yapıları gibi konuların öğrencilerin zihinlerinde canlanması zordur ve bunu için görsellere ve materyallere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada malzeme bilimleri dersinde öğretilen malzemelerin kristal kafes yapılarının ve elmas molekül yapısı vb. örnek molekül kafeslerinin 3B (3 boyutlu) baskı yöntemi kullanılarak modellenmesi ve üretilmesi ele alınmıştır.

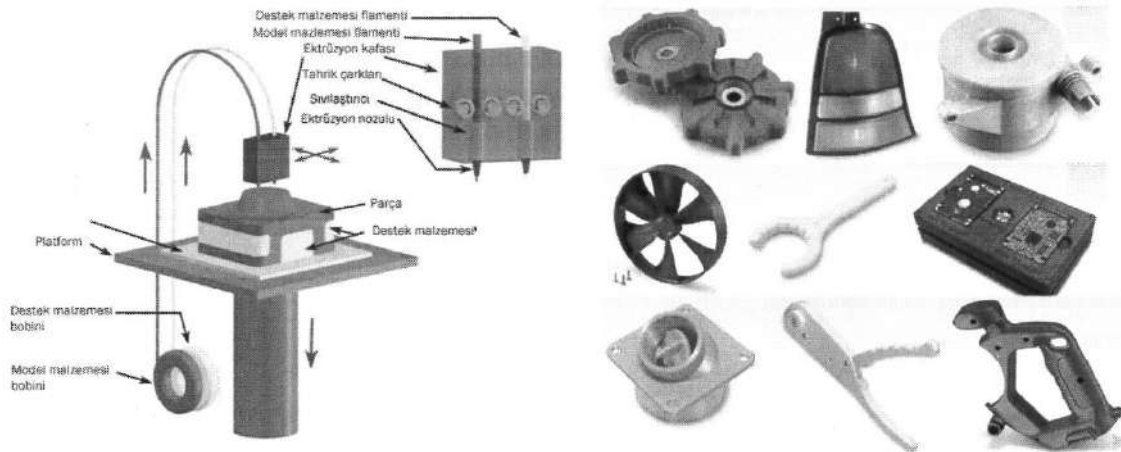
2. 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojileri

3B üretim, diğer adlarıyla masaüstü imalat ve hızlı prototipleme olarak da bilinen bilgisayar ortamında tasarlanmış 3B katı modellerin çeşitli yöntemlerle herhangi bir kalıp vb. elemanlara ihtiyaç olmadan gerçek objeler halinde imal edilme teknolojisidir. En çok kullanılan 3B imalat teknolojileri, Seçici lazer sinterleme - SLS (Selective Laser Sintering), Eriyik biriktirerek modellerine - FDM (Fused Deposition Modeling), Tarayarak ışıkla kütleme - SLA (Stereo Lithography Apparatus) teknikleridir [3]. Şekil 1'de SLS (a) ve SLA(b) teknikleriyle 3B üretimin çalışma şeması gösterilmiştir.



Şekil 1. SLS ve SLA sistemlerinin çalışma prensibi [4]

Eriyik biriktirerek veya ekstrüzyonla yığma adlarıyla bilinen FDM tekniğinde termoplastik model malzemesi teli (filaman) ısıtıcı nozulun içinde eritilir ve platform üzerine akıtılır. Akan eriyik plastik, platform üzerinde aniden sertleşir ve bu şekilde yatay hareketlerle katman oluşturur. Daha sonra platform aşağı inerek katmanlar aynı şekilde üst üste oluşturulmaya devam edilir. Bu teknik ile karmaşık ve çok elemanlı parçaların imalatı mümkün ve kolaydır. Plastik malzeme olarak ABS (Akrilonitril Bütadiyen Stiren), poliamid, polikarbonat, polietilen ve polipropilen gibi malzemeler kullanılır. Ayrıca bu yöntemde destek malzemesi için ikinci bir nozul da sisteme ilave edilebilir [4,5]. Şekil 2'de FDM çalışma şeması ve üretilmiş örnek parçalar gösterilmiştir.

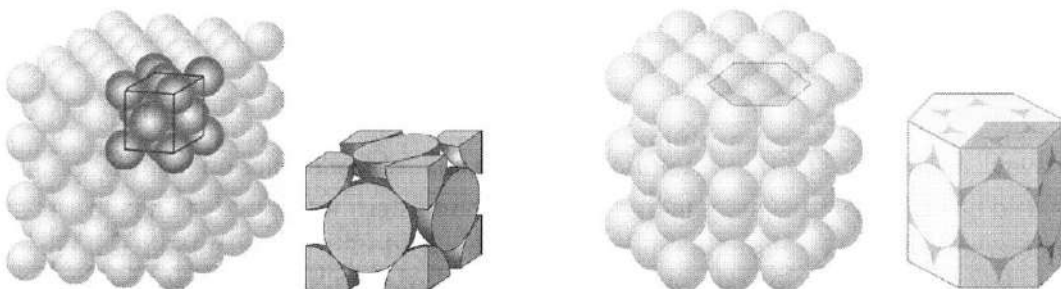


Şekil 2. FDM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar [4]

3. Kristal Kafes Yapılarının Modellenmesi ve 3B Üretimi

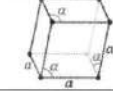
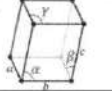
Katı malzemelerin sınıflandırılmasında kullanılan yöntemlerin biri de atomların veya iyonların oluşturdıkları düzendir. Bir kristal malzemede atomlar sıralanırken atomsal ölçekte birbirini tekrar eden düzenli bir yapı oluştururlar. Bir başka deyişle bir kristal malzeme, katılaşma sırasında atomları en yakın komşu atomlarla bağ kurar ve bu sırada birbirini tekrar eden üç boyutlu bir düzen oluştururlar. Oluşan bu düzene kristal yapı veya kristal kafes denir. Kristal kafes yapılan, genelde metal malzemelerde bulunan basit geometrik yapılardan, bazı seramik ve polimerlerde bulunan çok karmaşık kafes yapılarına kadar çok çeşitli şekillerde bulunabilir [6,7].

Kristal yapılar görsel şekilde ifade edilirken atomların veya iyonların belirli çaplarda katı küreler şeklinde oldukları düşünülür. Katı-küre atom modeli olarak adlandırılan bu yapıda, atomları en yakın komşu atomları temsil eden küreler birbirlerine temas edecek şekilde dizilirler. Malzemelerin atomsal düzeni, kristal yapısının küçük bir grup atom grubunun birbirlerini tekrar etmesi ile oluşur. Kristal yapının tekrar eden bu en küçük ögesine birim kafes adı verilir. Şekil 3'de birim kafes yapısı gösterilmiştir. Doğada 7 temel kristal sistemi altında toplam 14 tür kristal yapı bulunur [6]. Bu kristal yapılar Çizelge 1'de gösterilmiştir.



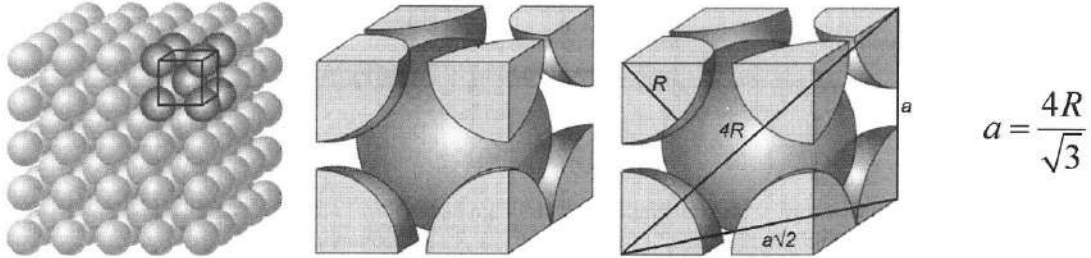
Şekil 3. Temsili atom küreleri ve birim kafes yapıları [6]

Çizelge 1. Yedi kristal sisteminin birim hücre geometrileri [7]

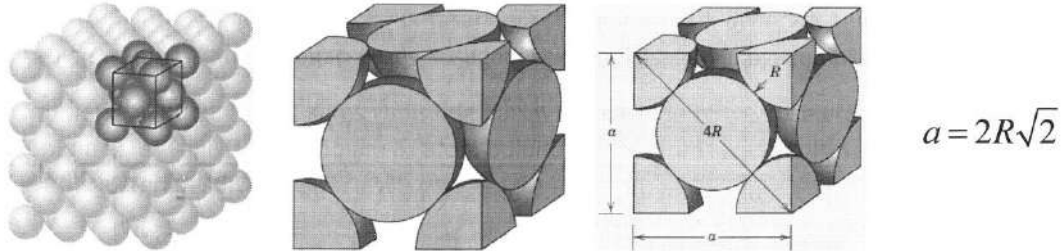
Kübik			
			
basit	hacim merkezli	yüzey merkezli	
Tetragonal		Monoklinik	
			
basit	hacim merkezli	basit	taban merkezli
Ortorombik			
			
basit	taban merkezli	hacim merkezli	yüzey merkezli
Rombohedral	Hegzagonal	Triklinik	
			

3B yazıcıda üretilcek malzeme kristal kafeslerin modelleme aşamasında birim kafes yapılarındaki temsili atom küreleri parametrik olarak tasarlanmıştır. Parametrik değerler, temsili atom kürelerinin yarıçapları ve birim kafesin kenar, yüzey köşegeni ve cisim köşegeni gibi uzunluklardan oluşmaktadır.

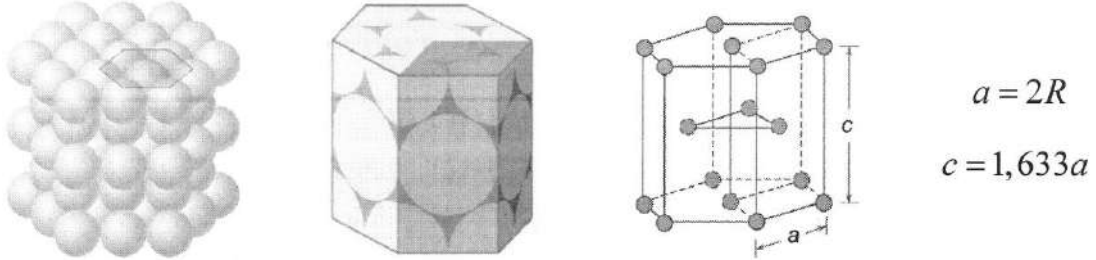
Hacim Merkezli Kübik (HMK) kafes yapısında hacim merkezinde bir ve köşelerde sekiz atom bulunur. HMK birim kafes yapısı içinde toplam iki atom bulunur. HMK birim kafes yapısı ve parametrik değerleri Şekil 4'de gösterilmiştir.

**Şekil 4.** HMK kafes yapısı ve parametrik değerleri [6]

Yüzey Merkezli Kübik (YMK) kafes yapısında yüzey merkezlerinde ve köşelerde olmak üzere toplam 14 atom bulunur. YMK birim kafes yapısı içinde toplam dört atom bulunur. YMK birim kafes yapısı ve parametrik değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir.

**Şekil 5.** YMK kafes yapısı ve parametrik değerleri [6]

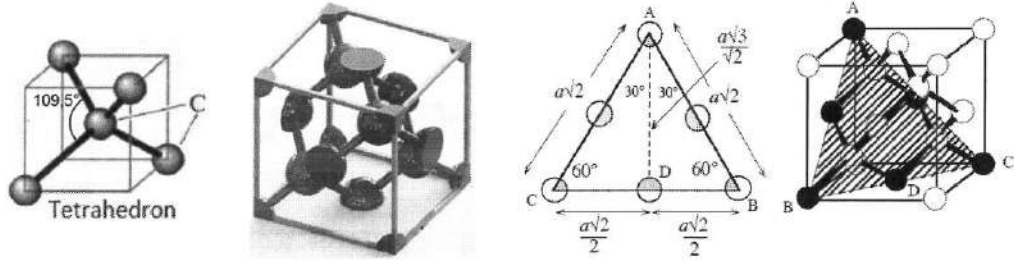
Sıkı Düzen Hegzagonal (SDH) kafes yapısında alt ve üst düzgün altıgen yüzeylerde, merkezlerde birer, köşelerde altışar olmak üzere toplam yedişer atom bulunur. Alt ve üst yüzeyler arasındaki ara düzlemde üç atom bulunur ve bu üç atom alt ve üst düzlemdeki atomlarla temas halindedir. SDH birim kafes yapısı içinde toplam altı atom bulunur, SDH birim kafes yapısı ve parametrik değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir [6].



Şekil 6. SDH kafes yapısı ve parametrik değerleri [6]

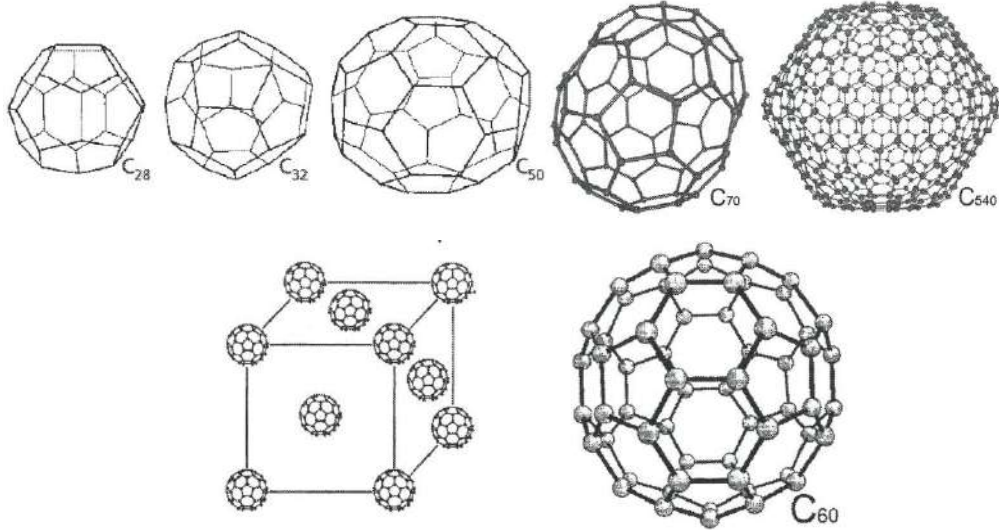
Basit kübik, HMK, YMK ve SDH kristal yapıları, temsili atom küreleri yapısı ve birim kafes yapısı olmak üzere ikişer adet ve toplamda 10 adet katı model oluşturulmuştur. Kristal yapılar 3b yazıcıda 0,14 mm katman kalınlığında ve düşük iç dolgu yoğunluğunda üretilmiştir. Üretim, 3sa 55dk ila 8sa 27dk/adet aralığında ve ortalama 6sa 32dk/adet hızında tamamlanmıştır.

Karbonun yüksek sıcaklık ve aşırı basınç altında oluşmuş bir allotropu olan elmas, düzgün dörtyüzlü (tetrahedron) bağ yapısıyla bilinen en sert malzemedir. Kristal yapısı geometrik açıdan YMK yapıya benzerlik gösterir ve köşelerde sekiz adet çeyrek, yüzeylerde altı adet yarım ve hücre içinde dört adet tam atom olmak üzere toplam sekiz atomlu bir birim kafes yapısı vardır [9,10]. Karbon atomlarının tetrahedron bağ yapısı ve elmas birim kafes yapısı ve parametrik değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. 3b imalat için elmas katı modelleri, birim kafes yapısı ve büyük molekül yapısı olmak üzere iki adet katı model oluşturulmuştur. Birim kafes yapısı 0,14 mm, büyük molekül yapısı 0,19 mm katman kalınlıklarında ve yüksek iç dolgu yoğunluğunda üretilmiştir. Üretim, birim kafes için 4sa 24dk sürede ve molekül yapısı için ise 10sa 10dk sürede tamamlanmıştır.



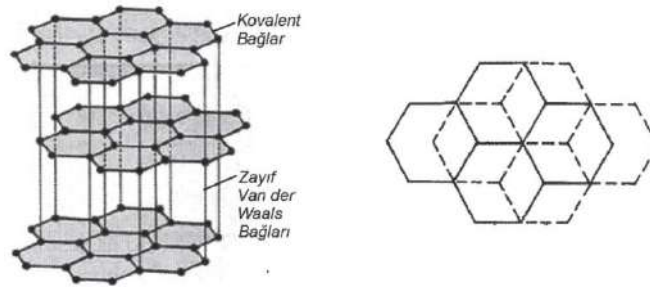
Şekil 7. Tetrahedron bağ yapısı, elmas birim kafes yapısı ve parametrik değerleri [6, 9]

Fulerenler karbonun yapay allotroplarıdır. Buckyball olarak da bilinen fulerenler bir karbon atomunun sp^2 hibritleşmesi ile diğer üç karbon atomuna bağlanarak küresel biçimde kaplanmasıyla oluşan büyük moleküllerdir. En çok bilinen fuleren molekülü 20 adet altıgen ve 12 adet beşgen yapıdan oluşan C_{60} diğer adıyla *buckyball* molekülüdür. Katı halde C_{60} birimleri YMK kristal yapıda bir araya gelirler. Fulerenler farklı karbon sayılarında küresel veya eliptik yapılardan oluşabilir [6, 8, 9, 11]. C_{60} ve çeşitli fuleren yapıları Şekil 8'de gösterilmiştir. 3b imalat için C_{60} , C_{70} fuleren katı modelleri oluşturulmuştur. Fuleren modeller, 0,19 mm katman kalınlığında ve yüksek iç dolgu yoğunluğunda üretilmiştir. Üretim, C_{60} için 6sa 25dk, C_{70} için ise 8sa 27dk sürede tamamlanmıştır.



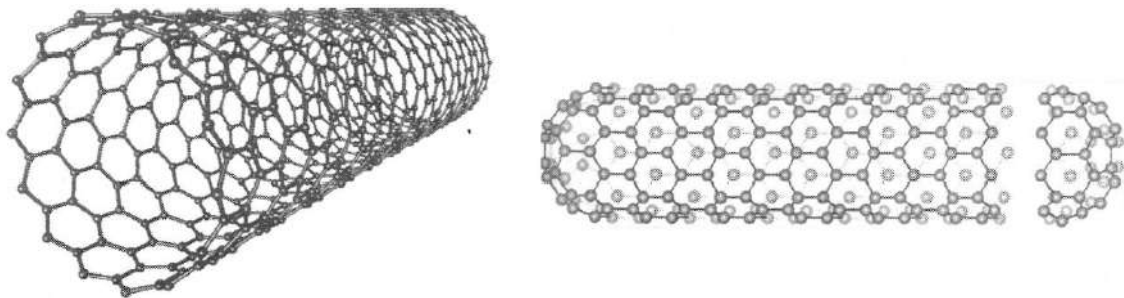
Şekil 8. C_{60} , YMK yapıdaki C_{60} ve çeşitli fullerene yapıları [8, 9,11]

Karbonun yaygın bulunan bir diğer allotropu da grafitir. Grafit, karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesi ile kovalent bağ kurarak altıgen halkalar şeklinde dizildiği levhalı (grafen) bir yapıya sahiptir. Grafitin elektrik ve ısı iletkenliği yüksektir ve iyi bir katı yağlayıcıdır [6, 11]. Grafit kristal yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir. 3b imalat için üç grafen levhalı bir katı model oluşturulmuştur. Model, 0,19 mm katman kalınlığında ve yüksek iç dolgu yoğunluğunda üretilmiştir, Üretim, 8sa 7dk sürede tamamlanmıştır.



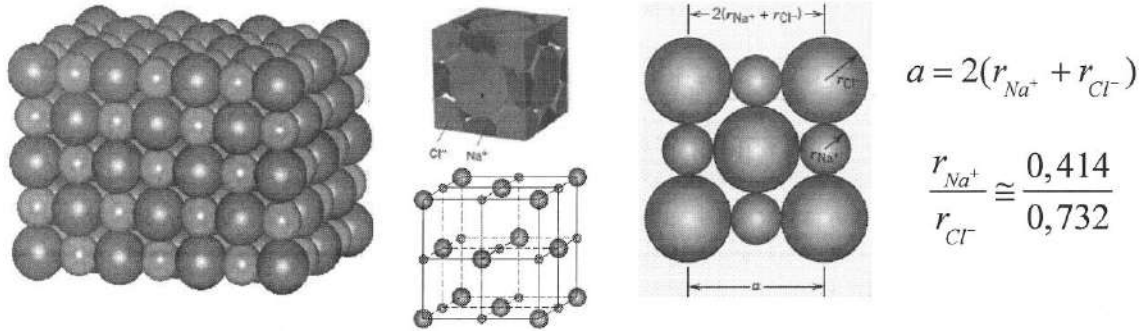
Şekli 9. Grafit kristal yapısı [8]

Karbonun yakın zamanda keşfedilmiş üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip bir diğer molekülü de nanotüplerdir. Nanotüpler bir grafen kıvrılarak birleştirilmesi ile elde edilir. Elde edilen nanotüpün iki ucu C_{60} fullerene yarım küresi ile kapatılıp kapsül haline de getirilebilir. Her bir nanotüp milyonlarca atomdan bir araya gelmiş tek bir moleküldür. Nanotüpler, 50 ila 200 GPa arası çekme mukavemeti ile dayanımı en yüksek malzeme olarak bilinir [6]. Karbon nanotüp ve kapsül kristal yapısı Şekil 10'da gösterilmiştir. 3b imalat için birer adet nanotüp ve nanokapsül molekülü modellenmiştir. Nanotüp 0,14 mm, nanokapsül 0,19 mm katman kalınlıklarında ve yüksek iç dolgu yoğunluğunda üretilmiştir. Üretim, nanotüp için 6sa 35dk sürede, nanokapsül için ise 8sa 51dk sürede tamamlanmıştır.



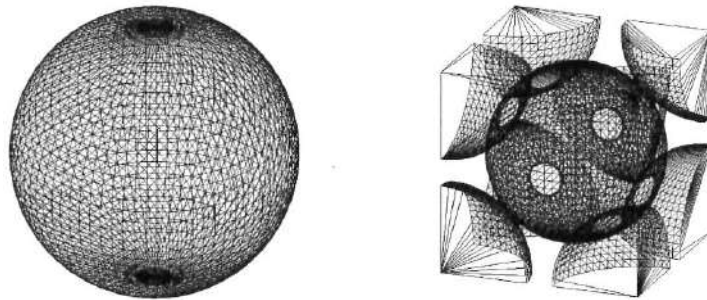
Şekil 10. Karbon nanotüp ve kapsül kristal yapısı [6,11]

Malzemelerin metal olmayan sınıfında bulunan seramik malzemelerde eşit sayıda katyon ve anyon içeren bileşiklere AX tipi kristal yapıdaki bileşikler denir. Burada A katyon, X ise anyondur. En yaygın ve en çok bilinen AX tipi kristal sodyum klorür (NaCl) veya diğer adıyla kaya tuzudur. Sodyum klorür kristal yapısı, YMK yapılarda dizilmiş sodyum ve klor atomlarından oluşmuştur. Yani iki YMK yapının birbirleri içine geçmiş bir şekilde olduğu düşünülebilir. Birim kafes yapısında, merkezde ve kenarların ortalarında yerleşmiş dört sodyum katyonu, köşelerde ve yüzey merkezlerinde yerleşmiş dört klor anyonu olmak üzere dört sodyum klorür molekülü bulunur [6]. Sodyum klorür kristal yapısı Şekil 11'de gösterilmiştir. 3b imalat için birim kafes modellenmiştir. Model, 0,14 mm katman kalınlığında ve düşük iç dolgu yoğunluğunda üretilmiştir. Üretim, 5sa 40dk sürede tamamlanmıştır.



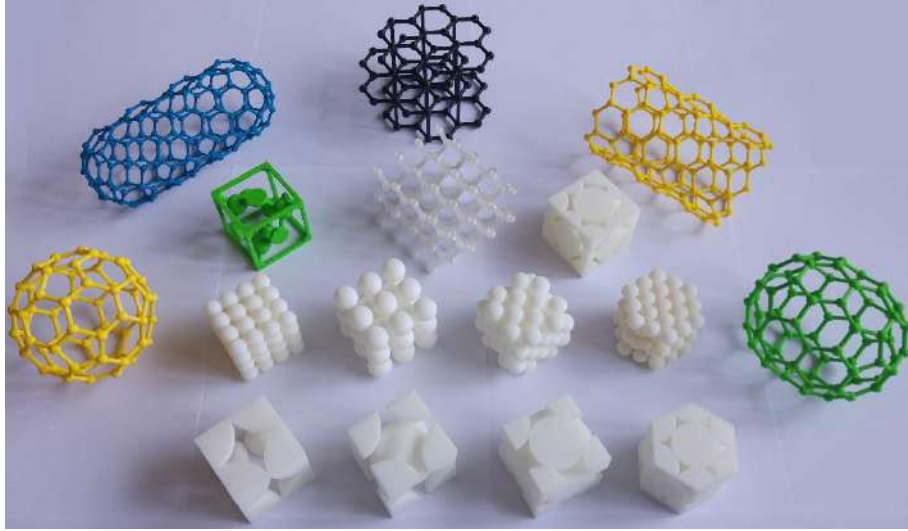
Şekil 11. Sodyum klorür kristal yapısı ve parametrik değerleri [6]

Malzeme kristal yapılarının 3B üretiminin ilk aşamasında, bir bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design-CAD İng.) programı ile kristal yapının 3B modeli oluşturulur. Daha sonra modellenen parça STL dosya formatına dönüştürülür (Şekil 12). STL model, 3B yazıcıların kendi yazılımları ile ince katmanlara ayrılır ve tüm geometri için en alt katmandan en üst katmana kadar bir takım yolu oluşturulur. Bu takım yolu 3B yazıcının işleyebileceği dosya formatında yazıcıya aktarılır ve imalat işlemi başlar. İmalat süreci en alttan en üste katman katman tamamlanır. En son ise varsa destek kısımları parçadan temizlenir ve son şekil ortaya çıkmış olur [4].



Şekil 12. STL (STereoLithography) formatında örnek geometriler

3B imalat, FDM teknolojisine sahip Zortrax M200 modeli 3B yazıcıda yapılmıştır. Filaman olarak Zortrax'ın kendi ürünü olan Z-ABS, Z-ULTRAT ve Z-GLASS malzemeler kullanılmıştır. Z-ABS, mat ve pürüzsüz yüzeyler elde edilen ve daha çok test amaçlı parçaların üretildiği termoplastik bir malzemedir. Z-ULTRAT, yarı mat yüzey elde edilebilen Z-ABS'ye göre daha sert termoplastik bir malzemedir. Z-Glass ise parlak yüzey sağlayan, saydam, aşınma ve sıcaklığa dayanıklı termoplastik bir malzemedir. Beyaz renkli kristal yapılar Z-ABS malzemesi, renkli kristal yapılar Z-ULTRAT malzemeleri ve saydam elmas molekül yapısı ise Z-GLASS malzemesi kullanılarak imal edilmiştir. 3B imalatı yapılan malzeme kristal yapılan Şekil 13'de ve Çizelge 2'de gösterilmiştir.



Şekil 13. 3B imalatı yapılan tüm kristal yapılar

Çizelge 1. 3B imalatı yapılan malzeme kristal yapıları

Basit Kübik Kristal Yapı



Hacim Merkezli Kübik (HMK) Kristal Yapı



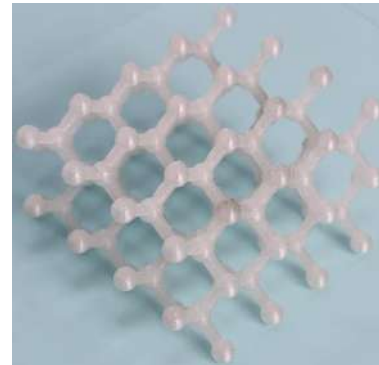
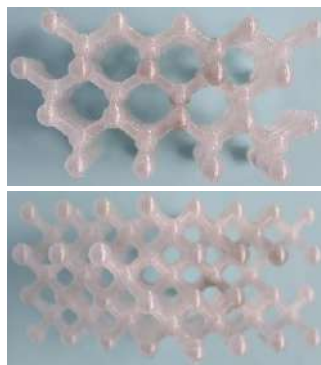
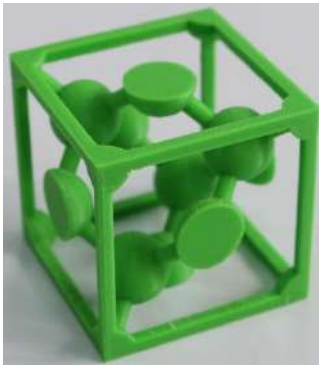
Yüzey Merkezli Kübik (YMK) Kristal Yapı



Sıkı Düzen Hegzagonal (SDH) Kristal Yapı

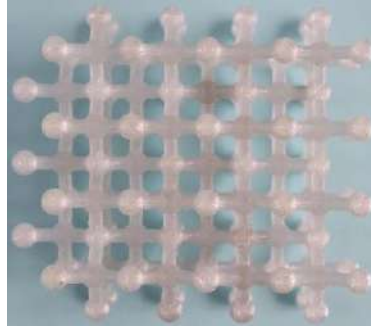
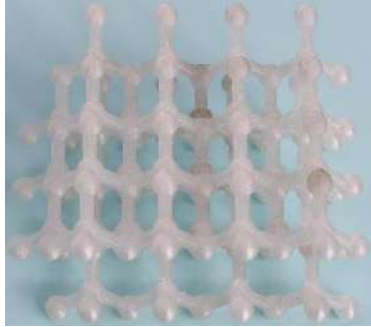


Elmas Birim Kafes ve Molekül Yapısı



Çizelge 1.^{devam} 3B imalatı yapılan malzeme kristal yapıları

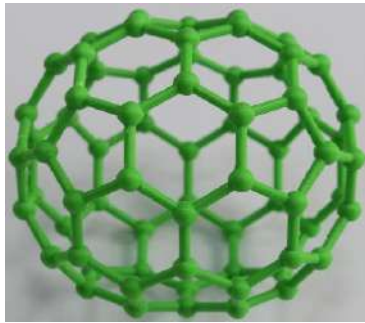
Elmas Birim Kafes ve Molekül Yapısı



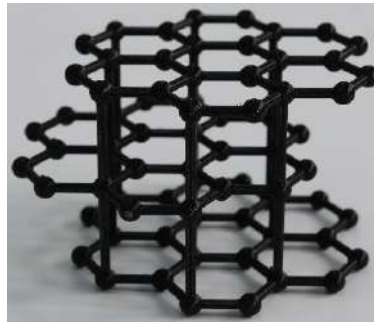
Sodyum Klorür (NaCl) Kristal Yapısı



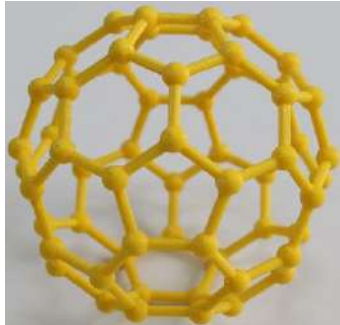
Fuleren C₇₀ Molekül Yapısı



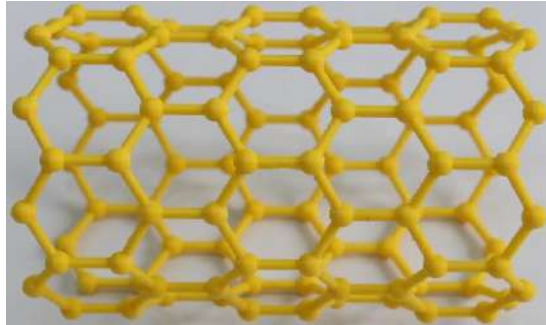
Grafit Kristal Yapısı



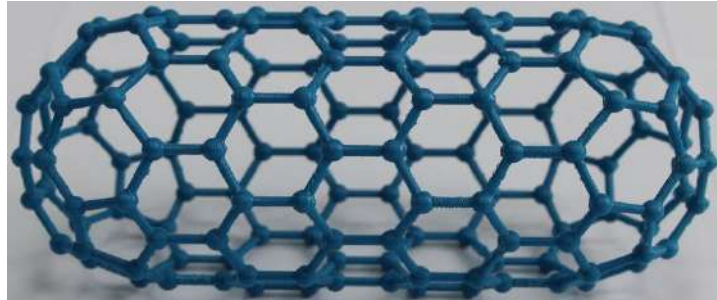
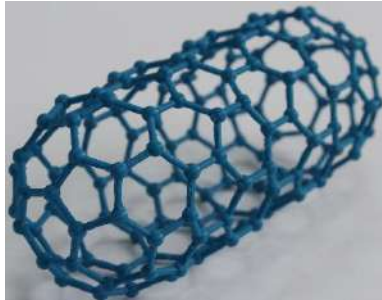
Fuleren C₆₀ Molekül Yapısı



Karbon Nanotüp Kristal Yapısı



Karbon Nanokapsül Kristal Yapısı





Şekil 14. Malzeme Bilimleri dersi sırasında 3B yazıcıda üretilmiş kristal yapılar kullanılırken

4. Sonuçlar

Mühendislik eğitiminde öğrencilerin yeterli mesleki donanıma sahip olabilmeleri için ders sürecinin olabildiğince anlaşılması kolay yürütülmesi ve çeşitli uygulamaları da içermesi gerekir. Bu çalışma, yoğun teorik ve uygulama ağırlıklı derslerin sürdürüldüğü Makine Mühendisliği eğitiminin görsel ve somut materyallerle zenginleşmesine yardımcı olmuştur. Bu materyallerin ders içeriğine ve öğrencilere katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- Makine Mühendisliği programında özellikle bu tip materyallerin ihtiyaç duyulduğu Malzeme Bilimleri dersi oldukça anlaşılır hale gelecektir.
- Resimlerden anlaşılması zor ve karmaşık olan kristal yapıların, 3B üretilmesi ile öğrenciler tarafından kavranması kolaylaşacaktır.
- Mühendislik eğitimi nitelikli eğitim materyalleri ile zenginleşecektir.
- Bu materyaller öğrenciler tarafından ilgi görecektir ve 3B yazıcı teknolojisinin kullanılması ve yaygınlaşması sağlanacaktır.
- Öğrenme sürecinin daha çekici ve verimli olması sağlanacaktır.

Kaynaklar

- [1] Alkan, C., Eğitim Teknolojisi, Anı Yayıncılık, Ankara, 1998.
- [2] Aydoğan, H., Kuş, R., Özsoy, A., Malzeme Bilimi Öğretiminde Çoklu Ortam Uygulamaları, Teknik-Online Dergi, Cilt 4, Sayı 1, 2005.
- [3] <http://kedkem.com/urunler/3-boyutlu-yazicilar/3-boyutlu-yazicilar-hakkinda-genis-bilgi-10538.htm>, 2017.
- [4] Çelik İ., Karakoç F., Çakır M., Duysak A., Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 31, Ağustos 2013.
- [5] <http://myobjectify.com/additive>, 2017.
- [6] Callister, W. D., Rethwisch, D. G., Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., ABD, 2013.
- [7] https://tr.wikipedia.org/wiki/Kristal_yap%C4%B1, 2017.
- [8] Hammond, C, The Basics of Crystallography and Diffraction, Oxford University Press, Oxford, 2009.
- [9] Kasap, S. O., Principles of Electronic Materials and Devices: 3rd Edition, McGraw-Hill, 2006.
- [10] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Elmas>, 2017.
- [11] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon>, 2017.

3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN POLYLAKTİKASİT (PLA) NUMUNELERDE DOLULUK ORANLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Ahu ÇELEBİ^{1*}, Süleyman DEMİRDAL², Murat AKBULUT³

¹Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Bölümü, Manisa/Türkiye, ahu.celebi@cbu.edu.tr

²Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Bölümü, Manisa/Türkiye suleyman.demirdal.94@gmail.com

³Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Bölümü, Manisa/Türkiye m.akbulut4504@gmail.com

Özet

Polilaktik asit (PLA) bilim tarihinde bugüne kadar en çok araştırılan ve kullanılan biyolojik olarak parçalanabilen alifatik polyesterdir. PLA birçok yararlılıkları nedeniyle gerek birçok medikal uygulamada gerekse de konvansiyonel petrokimyasal tabanlı polimerlerin yerini almak suretiyle diğer endüstrilerde lider bir biyo malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, 3 boyutlu yazıcılarda PLA dan üretilen numunelerde farklı doluluk oranlarının (%5, %50, %100) mekanik özelliklere etkisini araştırmaktır. Her bir dolum oranında ASTM-D-790 (eğme testi) ve ASTM-D-638 (çekme testi) standartları altında 4 numune üretilmiştir. Sonuçlar numunelere uygulanan eğme ve çekme testlerine göre revize edilmiştir. Uygun iyileştirme stratejileri ile birlikte PLA'nın bu testlerdeki özelliklerinin iyice anlaşılmasının PLA'nın ve onun kopolimerlerinin/kompozitlerinin/karışımlarının kullanımı açısından anahtar önemde olduğunu görmekte ve tüm dünyadaki uygulama alanlarından bu çalışmanın uygunluk belirlemesi açısından önemli olduğunu düşünmekteyiz.

Gerçekleştirilen çalışmada PLA flamenti kullanılarak %5 doluluk oranında 4, %50 doluluk oranında 4, %100 doluluk oranında 4 çekme numunesi ve %5 doluluk oranında 4, %50 doluluk oranında 4, %100 doluluk oranında 4 adet eğme numunesi olmak üzere toplamda 24 adet numune üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polilaktik asit (PLA), 3 boyutlu yazıcı, Katmanlı imalat

INFLUENCE of FILL RATES on THE MECHANICAL PROPERTIES of POLY LACTIC ACID (PLA) SPECIMEN PRODUCED by 3D PRINTING

Abstract

Polylactic acid (PLA), so far, is the most extensively researched and utilized biodegradable aliphatic polyester in science history. Due to its merits, PLA is a leading biomaterial for numerous applications in medicine as well as in industry replacing conventional petrochemical-based polymers. The main purpose of this review is to elaborate the mechanical properties of PLA, that sample different scanning fill rates (%5, %50, %100). For each fill rate, four specimens produced under ASTM-D-790 (bending test) and ASTM-D-638 (tensile test) standards. The result has been revised by implementing tensile and bending test for the specimen. Incorporating better understanding of the role of these properties with available improvement strategies is the key for successful utilization of PLA and its copolymers/composites/blends to maximize their fit with worldwide application needs.

Keywords: Polylactic acid (PLA), 3d printing, Additive manufacturing

1. Giriş

Üç boyutlu yazıcılar birbirinden farklı teknolojileri kullanarak üretim yapabilmektedir. Bunlardan en yaygın olarak bilineni ve kullanılanı FDM (Fused Deposition Modelling) ya da birleştirme yoluyla yığma teknolojisidir. Bu teknikte ısı ile şekil alabilen termoplastik (PLA, ABS) malzemeler kullanılmaktadır [1,2].

Çok kullanılan diğer bir yöntem ise SLS (selectivelasersintering) yöntemidir. Türkçede karşılığı seçici lazer sinterleme olarak geçmektedir. Sinterleme genelde toz metalürjisinde kullanılan toz metallerin ısı ve basınç altında katı nesnelere dönüştürülmesini kapsayan teknolojidir. Burada lazer ışınları toz malzemenin üzerine hızlı bir şekilde yansıtılarak katmanlar meydana getirilir. Lazer teknolojinin gücüne bağlı olarak metal, plastik ve seramik gibi birçok farklı malzeme kullanılabilir [3].

Gelecekte üç boyutlu yazıcıların kullanımı yaygınlaştıkça maliyetleri de giderek azalacaktır. Üç boyutlu yazıcı maliyetlerinin düşmesiyle beraber hemen hemen her eve girmeye başlayacaktır. Bu durum birçok avantajı beraberinde getirecektir. Örneğin çocuklar internetten indirdiği üç boyutlu bir oyuncak verisi ile kendi oyuncağını yapabileme şansına sahip olacaklardır. Ya da evde kullanılan cihazların herhangi bir parçası bozulduğu zaman bu parçayı direkt fabrikadan getirtmek yerine yalnızca gerekli olan geometri ve malzeme bilgisi için ödeme yapmak yeterli olacaktır. Bu durum malın transferinden çok bilginin transferine önem kazandıracaktır [4].

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzeme

Polilaktik Asit ise şu anki istatistiklere göre en çok kullanılan üç boyutlu yazıcı malzemesidir. Bu malzemenin tercih etmesinin başlıca sebebi düşük sıcaklıklarda eriyebilmesinden dolayı kolay çalışılabilir olmasıdır. PLA malzemesinin yazdırılırken çarpılma ihtimali çok daha düşüktür. Bundan dolayı da ısıtıcı tabla kullanılmasını zorunlu hale getirmemektedir. Polilaktik asit ABS malzemesinden farklı olarak petrolden değil de nişasta içeren ürünlerden elde edilmektedir. PLA malzemesi medikal sektöründe implant ve protezlerde sıkça kullanılmaktadır [5].

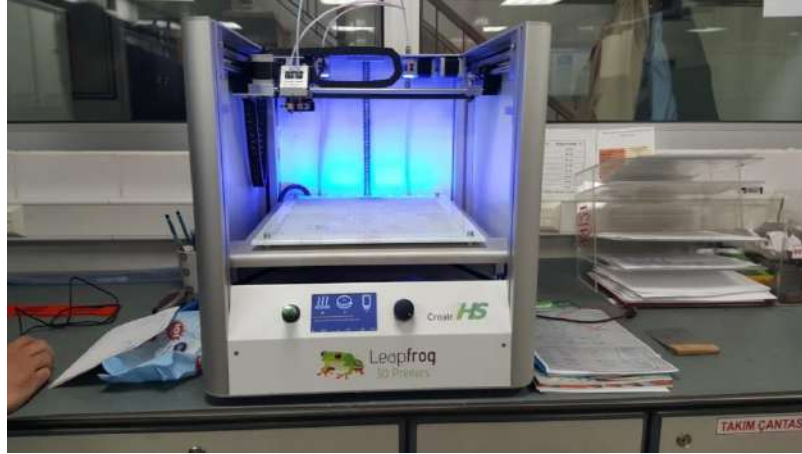
Tablo 1. PLA 'nın teknik özellikleri [5].

Özellikler	Polilaktik Asit (PLA)	Birim
Yoğunluk	1,24	gr/cm ³
Çekme Dayanımı	50-70	MPa
Elastiklik Modülü	3-4	GPa
Kopma Uzaması	2-10	%
Eğilme Dayanımı	100	MPa
Eğilme Modülü	4-5	GPa
Darbe Dayanımı (Izod, çentikli)	3-7	kJ/m ²
Sertlik (Rockwell-H)	70-90	
Erime Sıcaklığı	180	°C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	60-70	°C

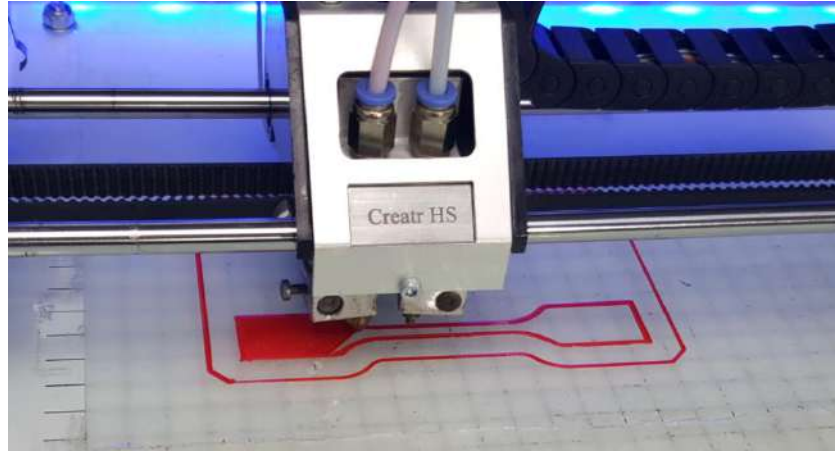
2.2. Numunenin Hazırlanması

Bu deneyde LEOPFROG marka CREATR HS model 3D yazıcı ve PLA filament kullanılmıştır. ASTM D-638 standardına ve ASTM D-790 standardına uygun çekme ve eğme numunelerinin katı modelleri Autodesk Inventor Professional 2013 programında oluşturulmuştur, oluşturulan katı model harici disk yoluyla Simplify 3D programında aktarılmıştır ve burada numunenin yazıcı tablası üzerindeki konumu ve diğer üretim parametreleri girildikten sonra numuneleri yazdırma işlemine başlanmıştır. Üretilen numu-

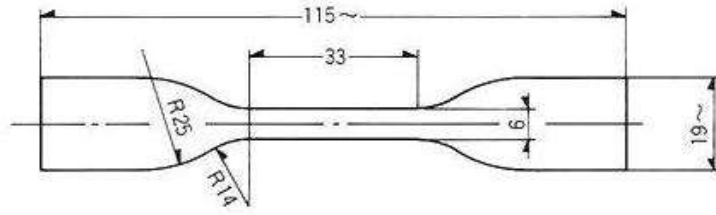
nelerin yazıcı tablasına yapışmaması için tabla ısıtılmıştır. Bir önceki üretimden kalma kurumuş PLA'nın nozuldan atılması için numune üretimine başlamadan önce tabla üzerinde numunelerin basılacağı alanın etrafında çerçeve oluşturularak varsa kurumuş PLA'nın numuneden uzaklaştırılması sağlanmıştır. Dönderli gruplar halinde yazma işlemi gerçekleştirilmiş ve aynı doluluk oranındaki numuneler tek seferde üretilmiştir.



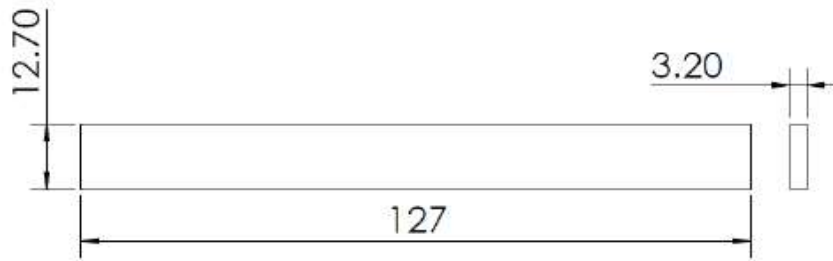
Şekil 1. Çekme ve eğme numunelerinin üretildiği LEOPFROG marka creatr HS model 3D yazıcı



Şekil 2. Çekme numunesinin 3D yazıcıda üretimi



Şekil 3. ASTM D-638 Standardına uygun çekme numunesi



Şekil 4. ASTM D-790 Standardına uygun eğme numunesi

Üç boyutlu yazıcılarda filament malzemesi olarak kullanılan PLA (Polilaktik Asit) dan üretilmiş ASTM-D-638 standardında %5 doluluk oranında 4 çekme numunesi, %50 doluluk oranında 4 çekme numunesi, %100 doluluk oranında 4 çekme numunesi ve ASTM-D-790 standardında %5 doluluk oranında 4 eğme numunesi, %50 doluluk oranında 4 eğme numunesi, %100 doluluk oranında 4 eğme numunesi olmak üzere toplamda 24 adet deney numunesi üç boyutlu yazıcıda hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere çekme ve eğme testi uygulanarak bulgular incelenmiştir.

2.3. Çekme testi

ASTM D638 standardı ile numuneyi AUTOGRAPH marka AG-IS 100KN model çekme cihazında alt ve üst çenelere sıkıştırılan numune 5.08mm/dk hızla çekme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan testlerde numunelerin çekme mukavemeti, elastisite modülü ve yüzde uzama değerleri belirlenmiştir. Tüm doluluk oranındaki numune için aynı çekme hızı kullanılmıştır.



Şekil 5. 3D Printerda üretilmiş numunenin çekme testi

2.4. Eğme testi

ASTM D790 standartındaki numuneyi AUTOGRAPH marka AG-IS 100KN model çekme cihazında destekler arası mesafe standart gereği numune kalınlığının 16 katı olacak şekilde belirlenmiştir, 5mm/dk hızda eğme işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve uzama miktarları belirlenmiştir. Tüm doluluk oranındaki numunelerde aynı eğme hızı kullanılmıştır.

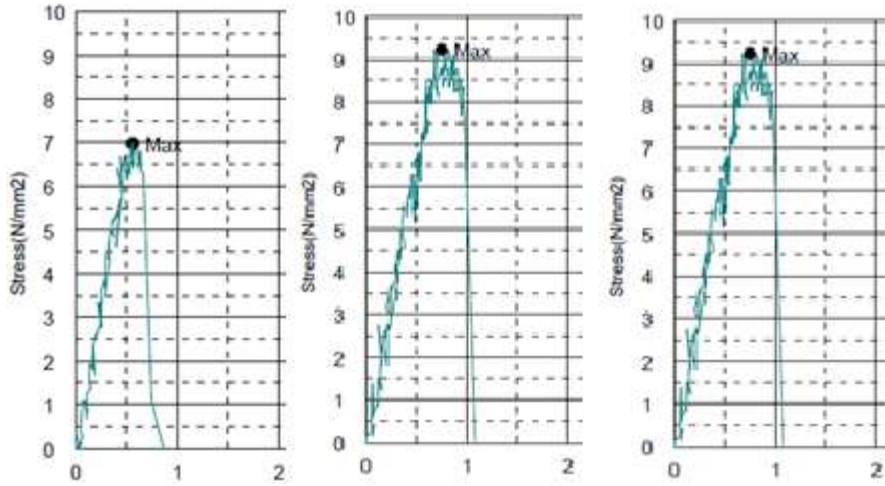


Şekil 6. 3D Printerda üretilen numunenin eğme testi

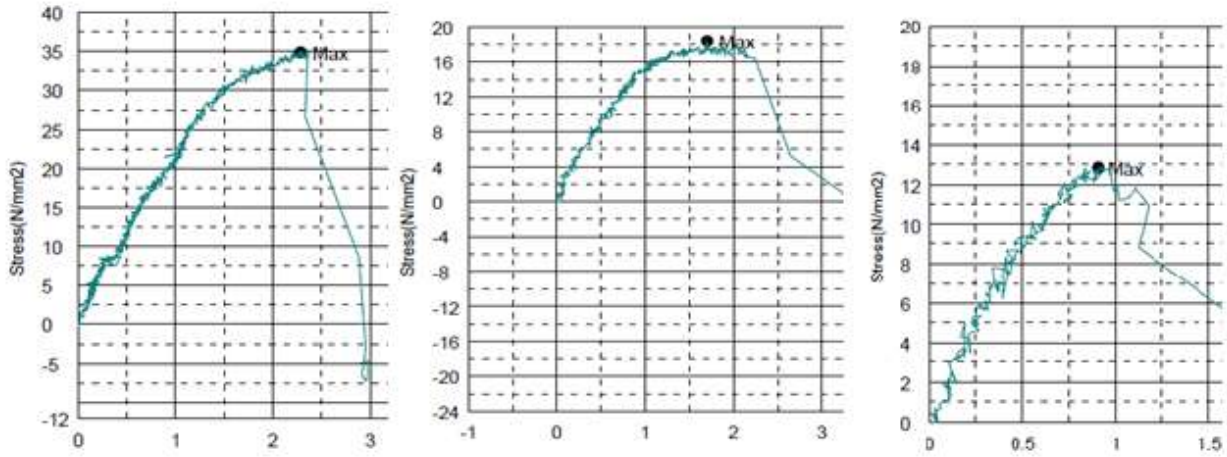
3. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada günümüzde kullanım alanı oldukça yaygınlaşan ve önümüzdeki yıllarda pek çok alanda kullanılacak olan üç boyutlu yazıcılarda kullanılan hammadde ve üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Giderek evlerimize kadar giren ve ulaşılması oldukça kolay olan bu yazıcılarda kullanılan PLA'nın farklı parametrelerde ve farklı doluluk oranlarındaki davranışları incelenmiştir.

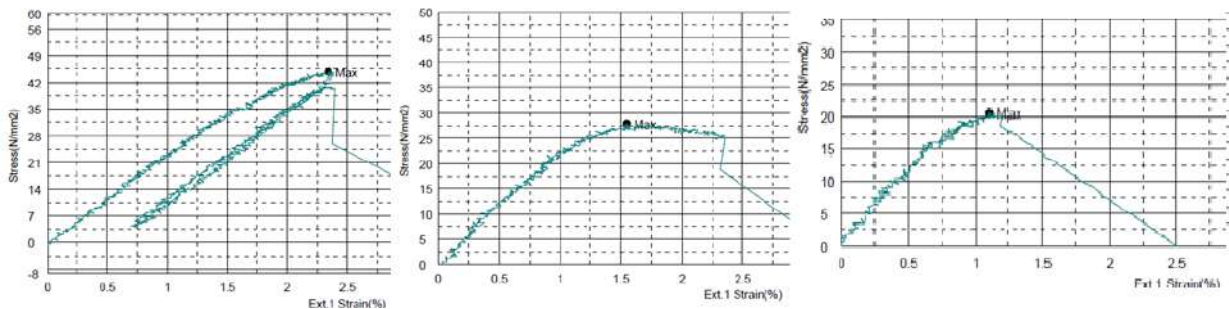
PLA'yı farklı fiziksel özelliklerde üretmek ve istenilen performans değerini elde etmenin de mümkün olduğunu göz önünde bulundurarak numuneleri hazırladığımız yazıcıda kullanılan PLA filamentinden hazırladığımız numunelere çekme ve eğilme testleri yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir. 9 numuneye uygulanan çekme deneyi sonucu deney çubuklarında meydana gelen kopmalar Şekil 7-8-9 'da verilmiştir. Şekil 7'de % 5 doluluk oranına sahip numunelerin çekme eğrileri verilirken, Şekil 8'de % 50, Şekil 9'da % 100 doluluk oranına sahip numunelerin çekme eğrileri yer almıştır.



Şekil 7. % 5 doluluk oranında 3 farklı numuneye ait çekme eğrisi



Şekil 8. % 50 doluluk oranında 3 farklı numuneye ait çekme eğrisi



Şekil 9. % 100 doluluk oranında 3 farklı numuneye ait çekme eğrisi

Elde edilen sonuçlar özet bir şekilde Tablo.2’de verilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda aynı doluluk oranına sahip numunelerin çekme dayanımlarında %50 ye varan farklılıklar tespit edilmiştir (%100 doluluktaki 1 no’lu numune ve %100 doluluktaki 2 nolu numune). Bunun farklılıkların sebebinin, üç boyutlu yazdırma işlemi esnasında oluşan mikro çatlaklar olduğu düşünülmüştür. Üretim sırasında ortam sıcaklığının sabit tutulması, tabla ve nozul arasındaki sıcaklık farkının düşük olması, soğutma fanı hızının yüksek olmaması ve ürünü tabladan ayırma sırasında hassas davranılması önerilmiştir. Eğilme testi sonuçları incelendiğinde doluluk oranının eğilme sırasındaki çatlamanın başladığı Fmax kuvvetine etkisinin oldukça küçük olduğu gözlemlenmiştir. Basma kuvvetine maruz kalacak ürünlerde mekanik özelliklerden ödün vermeden maliyeti düşürmek adına doluluk oranının makul miktarda düşürülebileceği düşünülmüştür.

Tablo 2. Eğme ve çekme testi sonuçları

	Doluluk Oranı	1. numune	2.numune	3.numune	4.numune	Ortalama
Çekme Dayanımı (Mpa)	5%	6,97545	9,20759	13,6719		9,951646667
	50%	34,8772	18,4152	12,8348	11,687	19,45355
	100%	44,7824	27,9018	23,577	20,5078	29,19225
Eğilme Dayanımı (Mpa)	5%	68,1818	66,4773	73,2955	68,1818	69,0341
	50%	80,1136	78,4091	81,8182	78,4091	79,6875
	100%	95,4545	100,568	95,4545	98,8636	97,58515

KAYNAKLAR

- [1] İnternet: Üç Boyutlu Yazıcılar, “3D Printers and Components”, <http://3d.grabercars.com/?p=125> (2014).
- [2] Turner, B. N., Strong, R. and Gold, S. A. ,“A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling”, *Rapid Prototyping Journal*, 20 (3): 192-204 (2014).
- [3] İnternet: Üç Boyutlu Yazıcılar, “3D Printers and Components”, <http://3d.grabercars.com/?p=125> (2014).
- [4] Ruffo, M., Tuck, C. and Hague, R., “Make or buy analysis for rapid manufacturing”, *Rapid Prototyping Journal*, 13 (1): 23 – 29 (2007).
- [5] Chhabra, M. and Singh, R. ,“Rapid casting solutions: a review”, *Rapid Prototyping Journal*, 17 (5): 328 -350 (2011).

HASARLI DİŞLİLERİN TERSİNE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMIYLA YENİDEN OLUŞTURULMASI

İsmail ŞAHİN^a, Tolgahan ŞAHİN^a, Harun Gökçe^b ve Oğulcan Eren^a

^aG.Ü. Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Ankara, Türkiye,
isahin@gazi.edu.tr, tolga_han38@hotmail.com, ogulcaneren@gmail.com

^bTUBİTAK – SAGE, harungokce@outlook.com

Özet

Tasarıma yardımcı yazılım teknolojilerinin ilerlemiş olması önemli kolaylıklar sağlamasına rağmen, özellikle karmaşık şekilli parçaların tekrar tasarımında yaşanan güçlükleri ortadan kaldırmamaktadır. Örneğin, helis dişlilerde diş profillerinin oluşturulması önemli güçlüklerle sahiptir. Tersine mühendislik yaklaşımları bu noktada önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu tür parçalarda tersine mühendislik yaklaşımlarının kullanılması özellikle hasarlı dişlilerin tekrar imal edilmesi sürecinde büyük bir kolaylığa sebep olacaktır. Bu çalışmada tersine mühendisliğin zaman ve karmaşık profilleri oluşturmada sunduğu imkânlar hasarlı helis dişlilerin yeniden oluşturulmasında kullanılmıştır. Makine elemanlarının hızlı prototipleme yöntemleri ile üretilmesi ise ürün geliştirme süreçlerinde yaşanan problemlere çözüm getirmede önemli fırsatlar sunmaktadır. Hızlı prototiplemenin bu özelliğinden yararlanmak için 3B yazıcı aracılığı ile helis dişlinin hızlı prototipi oluşturulmuştur. 3B yazıcı ile üretilen dişli ile orijinal dişli arasında boyutsal karşılaştırmalar yapılarak elde edilen ürünün doğruluğu test edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Helis dişli, Tersine Mühendislik, Bilgisayar Destekli Tasarım, Hızlı Prototipleme

Sorumlu Yazar: İsmail ŞAHİN, isahin@gazi.edu.tr

RECONSTRUCTION OF DAMAGED GEARS USING REVERSE ENGINEERING APPROACH

Abstract

Despite the fact that the design improves the utility of software technologies, especially the complex shape of the parts does not remove difficulties in re-design. For example, the creation of tooth profiles in helical gears has some difficulties. Reverse engineering approaches provide significant benefits at this point. The use of reverse engineering approaches in such parts will result in a great deal of ease, especially in the case of repaired of damaged gear. In this study, the opportunities for reverse engineering to create time and complex profiles will be used in the design of damaged helical gears. The production of machine elements with rapid prototyping methods presents important opportunities to solve the problems experienced in product development processes. Rapid prototypes of helical gear is created via 3D printers to take advantage of this feature of rapid prototyping. In this context, a software that can make parametric design by means of the data obtained by the reverse engineering approach has been developed. The accuracy of the product is tested by dimensional comparison between the gear produced by the 3D printer and the original gear.

Keywords: Helical Gear, Reverse Engineering, Computer Aided Design, Rapid Prototyping

1.Giriş

Mühendislik, sistemleri, bileşenleri, materyalleri, süreçleri, çözümleri keşfetmek, geliştirmek, tasarlamak, araştırmak, inşa etmek ve geliştirmek için matematik ve bilimsel, ekonomik, sosyal ve pratik bilgilerin uygulanmasıdır. Bir uygulama alanı olarak mühendisliği iki ana başlıkta incelemek mümkündür: İleriye (forward) mühendislik ve tersine (reverse) mühendislik. Klasik mühendislik faaliyetlerini ileriye mühendislik başlığı altında inceleyebiliriz. Klasik mühendislik faaliyetlerinin ardıllığı, mühendislik süreçlerinin bir kısmında eksiklik ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu gibi durumlarda parçanın kendisinden hareket ederek geriye gitme işlemi, süreci geriye yürütme işlemi yapılır. Ürünün başlangıç aşamasındaki bilgisayar destekli tasarım modeli elde edilebilir. Bu işlemlere Tersine mühendislik denir [1]. Geri mühendislik (Back Engineering) olarak da adlandırılan tersine mühendislik (Reverse Engineering), insanın yapmış olduğu ve yeniden ürettiği veya çıkarılmış bilgiye dayanan herhangi bir şeyi yeniden üreten herhangi bir bilgidir bilgi veya tasarım bilgisi çıkarman sürecidir. [2].

Tersine mühendislikte amaç, ortada hiçbir BDT model yok iken, bir nesnenin gelecek çalışmalarda kullanılmak üzere başarılı bir şekilde 3B BDT modelini oluşturmaktır. Hızlı prototipleme (Rapid Prototyping), tersine mühendislik faaliyetlerinin tamamlayıcı unsurudur. Hızlı prototipleme, üç boyutlu BDT verileriyle fiziksel bir parçanın veya montajın modelini hızla üretmek için kullanılan tekniktir. Tersine mühendislik ve hızlı prototipleme süreçleri tasarım ve imalat süreçlerinde son yıllarda ilgi çeken bir çalışma alanı olmuştur. Ye ve arkadaşlarının taranmış veriden unsur tabanlı parametrik katı modellerin tanımlanması ve oluşturulmasını ele alan bir çalışma yapmışlardır [3]. Çalışmada taranmış verilerden katı model tasarım değişiklikleri ve güncellemeler için unsur verileri oluşturulmuştur. Hisao ve Chuang'ın çalışmasında poliüretan veya polistren köpükle 3B'lu modeli oluşturulan ürünün yüzeyindeki veri noktaları temassız bir 3B tarama cihazı kullanılarak ölçülmüş, daha sonra ürünün 30 kesiti için nokta bulutları ölçülen bilgilere dayanarak elde edilmiştir [4]. Yang ve Chen'in çalışması nokta bulutlarını kullanmada serbest elle sayısallaştırmayı temel alması yönü ile diğer çalışmalardan farklılaşır [5]. Bunun için bir sayısallaştırıcı kullanılmıştır. Yöntemde ara temsil olarak nokta bulutu verisi kullanılmadığı için nokta bulutu birleştirme gibi zaman alıcı ön işlemler bulunmamaktadır. Mevcut sayısallaştırıcıları kullanarak farklı görünümünden sayısallaştırılmış nokta bulutlarını birleştirme gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Bu yönü ile diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Budak ve arkadaşları veri noktası ön işleme için bir program sistemi geliştirmiştir. Çalışmanın temel hedefi standart CAD araçlarıyla çok zor veya hatta imkansız olan şekilleri kolayca modelleyebilen bir yazılım geliştirmektir [6]. Veri ön işleme için geliştirilen program sistemi, gürültü filtreleme, veri yumuşatma ve veri azaltma için bilinen yöntemlere dayanarak gerçekleştirilmiştir. Sokoviç ve Kopac çalışmalarında özellikle 3B-BDT desteği olmayan parçaların mevcut olması durumunda, üretim yönteminde tersine mühendislik yöntemleri ve tekniklerinden faydalanmanın bazı olasılıkları ve yararlarını ele almışlardır [7]. Ayyıldız, çalışmalarında hasarlı kalıp elemanlarının tamiri ve imali için tersine mühendislik yaklaşımını ele almıştır [8, 9]. Sistem, hasarlı kalıp elemanlarının Tersine Mühendislik yaklaşımı ile ürün bilgisini toplama ve yeniden imalini temel alır. Tam ve Cham ise bir tersine mühendislik yaklaşımı ile termoform kalıp tasarımı yapmışlardır [10]. Çalışmada, kalıplanacak ürünün yüzeyini sayısallaştırmak için araştırmacılar tarafından geliştirilen bir sayısallaştırıcı cihaz kullanılmıştır. Çiçek'in yaklaşımı ise düz ve helis dişli çarkları bilgisayar destekli tasarım modellerinden yola çıkarak tanımlanması esasına dayanır [11]. Çalışmada STEP formatındaki BDT modelinin fiziksel dosyası karşılaştırılarak düz ve helis dişliler uzman sistem tarafından tanımlanmıştır. Matta ve arkadaşları CAD / CAM, RP&M (Hızlı Prototipleme ve İmalat) sistemleri ile ilgili son araştırmaların kapsamlı bir incelemesini sunmuşlardır [12]. Paul ve Anand mevcut STL dosya formatındaki parçaların yüzeylerini yaklaştırmak için kullanılan üçgen yöntemlerinin parça gösteriminde eklemeli imalat süreçleri aşamasında ortaya çıkan hataları ortadan kaldırmaya yönelik yeni bir yaklaşım önermiştir [13]. Yaklaşım, yalnızca parça yüzeylerini yakınlaştırmakla kalmayıp aynı zamanda dilimlerin oluşturulması için düzlemsel üçgenler yerine kavisli Steiner yamalar kullanan yeni bir dost formatı önermektedir. Çetinel'in tersine mühendislik yaklaşımı bir nesnenin üç boyutlu modelini oluşturabilmek için fotogrametri yöntemini kullanmayı içermektedir [14].

Makine elemanlarının tersine mühendislik yaklaşımı ile modellenmesi ve hızlı prototiplerinin oluşturulmasına yönelik çalışmaların yanında dişli çarkların parametrik tasarımını gerçekleştirmek amacıyla yapılan yazılımsal çalışmalar da literatürde dikkat çekmektedir [15-19]. Bu çalışmalar dişli çarkların geliştirilen yazılımlarla otomatik olarak oluşturulması ve optimizasyonunu kapsamaktadır.

Bu çalışmanın amacı tersine mühendislik yaklaşımı ile elde edilen 3B'lu model verilerini kullanarak hasarlı dişlilerin yeniden oluşturmaktır. Helis dişlilerin tersine mühendislik yaklaşımı ile 3B'lu modellerini oluşturmaya yönelik çalışmalarda nokta bulutu verilerinin koordinat ölçüm cihazları (CMM) vasıtası ile edildiği görülmektedir. Burada tanıtılan çalışmada ise tarayıcılar aracılığı ile elde edilen nokta bulutları kullanılmaktadır. Böylece daha fazla sayıda veri kullanmak mümkün olmuştur. Çalışmada, modeli oluşturulan helis dişli çarkın hızlı prototipi oluşturulmuş, orijinal dişli ile geometrik tutarlılığı kontrol edilmiştir.

1. Hasarlı Dişli Çarkın Tersine Mühendislik yöntemi ile oluşturulması

Çalışmada şanzıman mekanizmasında kullanılan bir helis dişlinin, çalışma sürecinde maruz kaldığı yükler dolayısıyla deforme olan diş profilinin tadilatı için gerekli olan 3B (üç boyutlu) modelinin tersine mühendislik yazılımı ile elde edilmesi anlatılmaktadır. Çalışmada tersine mühendislik yaklaşımıyla modellenen dişlinin helis yönü sol, diş sayısı 49, genişliği 54,98 mm olarak ölçülmüştür.

2.1. Tarama verilerinin oluşturulması

Çalışmada hasarlı dişliye ait veriler 3B tarayıcı yardımıyla alınmıştır. Hasarlı dişlinin taranmasında kullanılan tarayıcı 30 mm küçük, 1500 mm büyük görüş alanına sahip, minyatür projeksiyon tekniği ile çalışan, LED ışık kaynaklı (kırmızı, mavi, beyaz ve yeşil), 0.8 ila 8.0 mega piksel arasında değişen beş farklı çözünürlüğe göre ayarlanabilmektedir. Pozlama süresi 1 sn'den küçük olan tarayıcı BRE, STL, PLY ve VRML veri formatlarını desteklemektedir.

Hasarlı helis dişlinin hassas bir şekilde bilgisayar ortamında modelini oluşturabilmek için parçanın en ince detayına kadar görüntüsünü almak gerekmektedir. Metal parçaların taranması sırasında oluşan yansımalar parçanın bazı bölgelerinde eksik veri oluşumuna yol açabilir. Bunu önlemek için bu tür parçalarda yansıma önleyici sprej kullanılarak parça boyama işlemi yapılır (Şekil 1-b).



(a)



(b)

Şekil 1. (a) Çalışmada kullanılacak hasarlı helis dişli (b) Sprey ile boyanmış hali

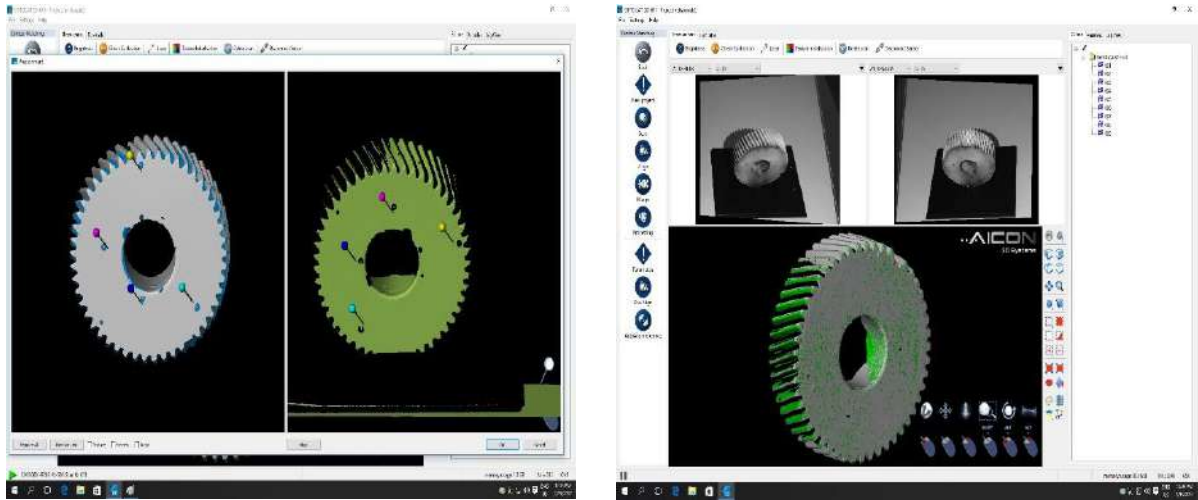
Sprey ile boyanan hasarlı dişlinin görüntülerini eşleştirmeyi kolaylaştırmak için dişlinin her iki yüzüne markerlar yapıştırılmıştır. Tarama işlemi AICON Smart Scan marka tarayıcı ile yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Tarama işleminden görüntüler

Parça tarama işleminde ilk görüntü alındıktan sonra parça yaklaşık 15-20 derece döndürülerek bir sonraki görüntü alınmıştır. Alınan iki görüntü bilgisayar ortamında eşleştirilerek tek görüntü elde edilmiştir (Şekil 4). Bu işlem başlangıç noktasına gelene kadar her alınan görüntü elde edilen birleştirilmiş görüntü ile örtüştürülerek işleme devam edilmiştir. Aynı işlem diğer yüzeyler için de yapılmıştır. Bu şekilde toplam 20 adet görüntü alınmıştır. Alınan görüntü bir önceki görüntü ile en az 3 noktasından eşleştirilerek elde edilmiştir.

Tarama işlemini tamamladıktan sonra tarayıcının göremediği boşluklar program tarafından en küçük boşluktan başlayarak doldurulmuştur. Doldurma işlemi tamamlandıktan sonra görüntü STL formatında kaydedilmiştir.

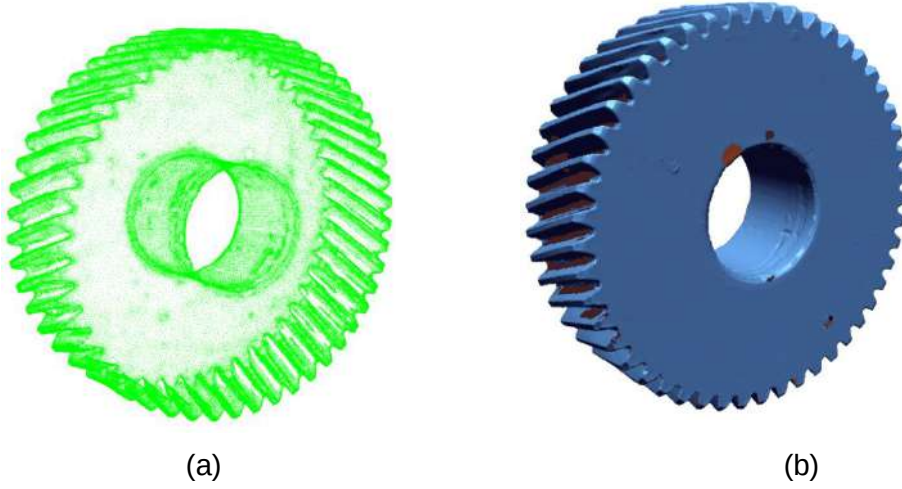


Şekil 3. İki ayrı görüntünün markerlar yardımı ile eşleştirilmesi

2.2. Hasarlı Diş Profiline Yeniden Oluşturulması

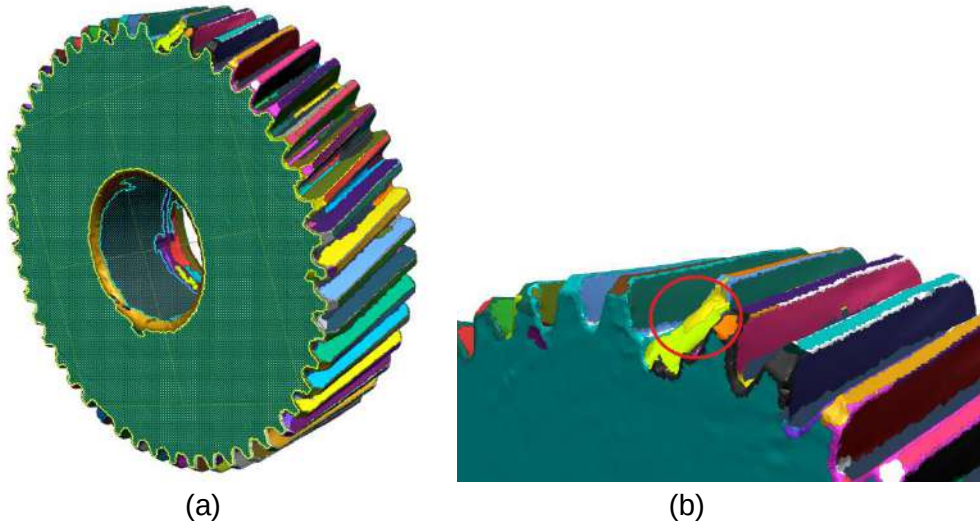
Bu bölümde helis dişlinin, çalışma sürecinde maruz kaldığı yükler dolayısıyla deforme olan diş profilinin tadilatı için gerekli olan 3B (üç boyutlu) modelinin tersine mühendislik yazılımı ile elde edilmesi anlatılmaktadır. Hasarlı diş profilinin tadili ve modelin tekrar oluşturulması ile ilgili işlemler için Geomagic Design X yazılımı kullanılmıştır. AICON Smart Scan tarayıcı ile taranıp tarayıcı yazılımında oluşturulan helis dişli çarka ait koordinat bilgilerini içeren nokta bulutu Geomagic Design yazılımında açılarak üzerinde gerekli işlemler yapılmaktadır. Geomagic Design X yazılımı içerisine alınan nokta bulutu verisi StereoLithography (STL) formatındadır. Hasarlı dişli üzerinden elde edilen nokta sayısı 230077 adettir (Şekil 4 (a)). Nokta bulutu üzerinden tekrar modelleme yapılabilmesi için noktalar arasına ağ model oluşturulmalıdır. Bunun için Mesh Building Wizard yardımı ile ağ boyutları ve noktalar arasındaki en

yüksek ve en düşük uzunluk bilgisine göre ağ model oluşturulur. Ağ yapısı, en büyük ağ boyutu 2,5mm ve noktalar arası en fazla uzaklığı 0,1mm olacak şekilde hazırlanmıştır.



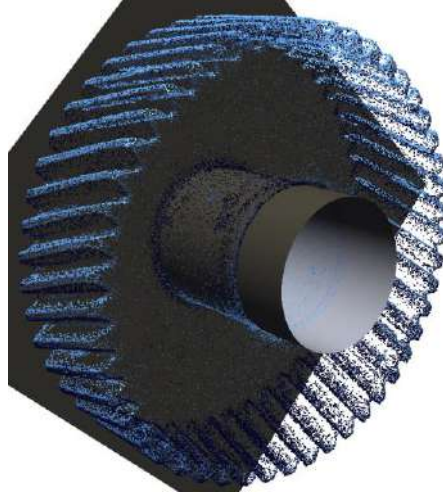
Şekil 4. Hasarlı dişli: (a) nokta bulutu verisi (b) ağ modeli

Büyük çaplı dişli çarkların tekrar üretimindeki maliyetlerin yüksek oluşu, tadilat işlemlerinin daha uygun olduğunu ve mevcut dişli çarkın maksimum ömürde kullanılmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Ağ modeli, noktaların birbirleri ile uzaklık değişimleri dikkate alınarak eğrisellik ve yarıçap dönüşümlerine göre bölgelere ayrılır. Bölgelerin ayrıştırılmasının nedeni, parça üzerindeki pah, yarıçap, düzlem veya eğrisel formların tespit edilerek, bu bölgelerin buna uygun olacak şekilde modellenmesidir. Şekil 5 (a)'da Geomagic Design X yazılımının izin verdiği yoğunluk değişkeni %20 olacak şekilde ayrıştırılan bölge taraması verilmiştir. Bu hesaplama süresini belirleyen en önemli değişkenler, bilgisayar işlemci kapasitesi ve ağ yapısı boyut ve düzenidir. Bölgelerin ayrıştırılmasının ardından helis dişlinin çalışma ekseninin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun nedeni, Şekil 5 (b)'de gösterilen hasarlı diş profilinin diğer diş profillerinden elde edilmesi ve çalışma ekseninde döndürülerek, hasarlı diş üzerine pozisyonlanabilmesidir.



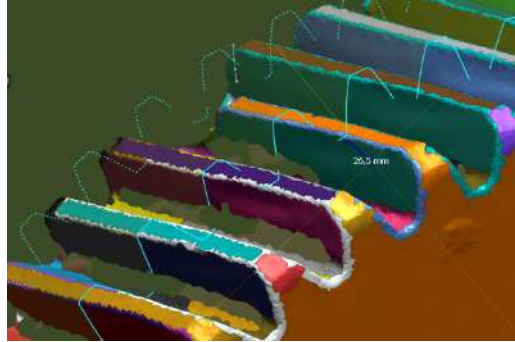
Şekil 5. (a) Bölgelere ayrılan ağ modeli (b) Hasarlı diş profilinin ağ modeli

Bölge tanımlaması ile parça üzerinde düzlem ve silindirik yapıların ayrıştırılması sağlanmıştı. Belirlenen bu form yapılarından yararlanılarak, parçanın yan yüzeyine düzlem ve ortasına bir silindir yüzey oluşturulur. Bunun için Surface Primitives komutundan ilgili bölge ve oluşturulmak istenen form yapısı seçilir. Şekil 6'da helis dişli dönme merkezine oluşturulan silindir ve düzlem yüzey gösterilmiştir.



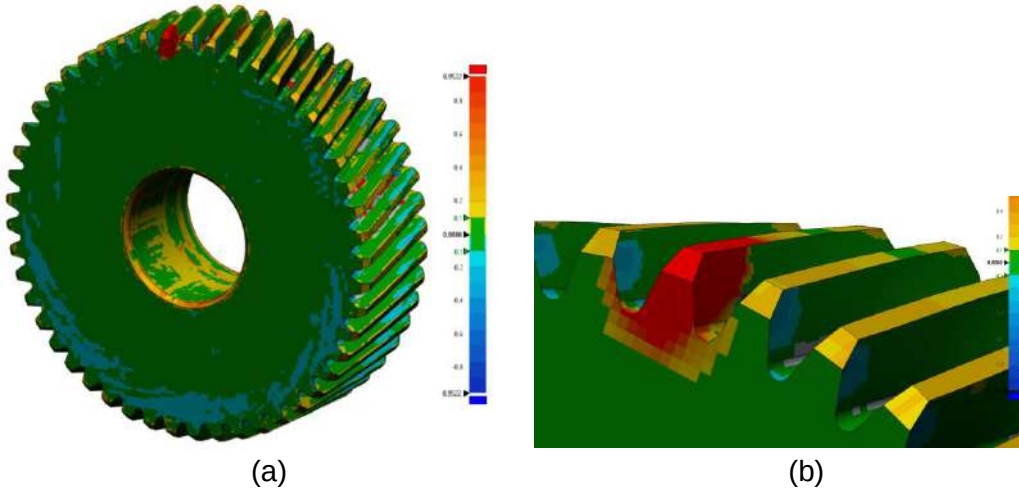
Şekil 6. Helis dişli çalışma eksenin belirlenmesi

Bölge ayrıştırılması ile oluşturulan yüzey model geliştirilme çalışması hasarlı olmayan bir diş profili içinde gerçekleştirilir. Ancak diş profilinin helis olmasından dolayı form yapısında eğrisellik vardır. Bu eğrisel form yapısının elde edilmesi için ağ model üzerinde belirli mesafe aralıklarında kesitler oluşturulur. Şekil 7’de elde edilen kesit profilleri gösterilmiştir. Diş formu için elde edilen 2B (iki boyutlu) kesit çizimleri kullanılarak aralarından geçen formu yüzey modeli elde edilir. Oluşan yüzeyler arasında gerekli kesme ve birleştirme operasyonları yapılarak sağlam bir diş profili elde edilir.



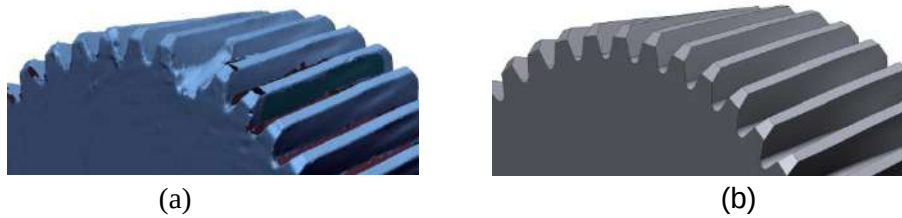
Şekil 7. Diş profilinin elde edilmesi

Elde edilen 3B helis diş profili ile nokta bulutu verisi arasındaki sapma miktarının minimize edilmesi çok önemlidir. Bunun için bölge tanımlamaları ile elde ettiğimiz tüm yüzeyler için (Deviation Analysis) sapma analizinin yapılması gerekmektedir. Sapma analizi parça boyutu, çalışma hassasiyeti ve bölgesel kararlılık değişkenleri dikkate alınarak incelenir. Bu helis dişli çark için izin verilen en yüksek sapma miktarı 0.05 mm’dir. Bu nedenle oluşturulan her yüzeyde bu analiz kontrolü yapılmıştır. Hasarlı diş profilinin olduğu bölge, en yüksek sapmanın olduğu hacimdir. Şekil 8’de ilgili hasar bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 8. (a) Sapma analizi sonucu (b) hasarlı diş profili

Aşağıda hasarlı diş profili ve elde edilen 3B modeli gösterilmiştir (Şekil 9). Hasarlı bölgenin tadilatı için ihtiyaç duyulan model elde edilmesi ile ihtiyaç duyulan imalat çalışmaları başlanabilir.

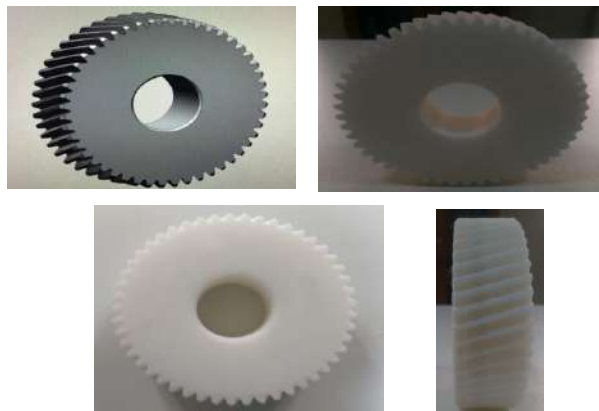


Şekil 9. a) Hasarlı diş profili b) Onarılmış dişli profili

2.3. Dişlinin 3B Hızlı Prototipinin Oluşturulması

3B modeli oluşturulan hasarlı helis dişlinin hızlı prototipi 3Dison Pro marka yazıcı kullanılarak oluşturulmuştur. Yazıcı ABS, PLA, Naylor, Esnek plastik, HIPS, PVA ve Isıya dayanıklı PLA malzemelerini yazdırma özelliğine sahiptir. Yazıcının maksimum yapı boyutu 290-205-250 mm'dir. Windows, Mac OS X işletim sistemine uyumludur. Yazıcı baskı hızı 40 mm/dk – 1000 mm/dk arasıdır.

Helis dişli yazdırma parametreleri; nozul çapı 0,40 mm, katman kalınlığı 0.250 mm, tabla sıcaklığı 110°C, nozul sıcaklığı 245°C ve doluluk oranı %25 olarak ayarlanmıştır. Destek malzemesi kullanılmamıştır. Yazdırma işlemi 5 saat 52 dakika da tamamlanmıştır. Yazdırma işleminde 27260.8 mm ABS filament kullanılarak helis dişli oluşturulmuştur.



Şekil 10. BDT modeli oluşturulan dişli ve dişli çıktıları

3. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada 3B tarayıcı sistemler aracılığı ile hasarlı bir helis dişlinin taranması, STL formatlı nokta bulutlarının oluşturulması ve nihayet hasarlı bölgenin onarılacak dilinin tekrar oluşturulmasını içeren tersine mühendisliğe dayalı bir hızlı prototipleme uygulaması tanıtılmıştır.

Yapılan bu uygulama, diş profili bilinmeyen bir helisel dişli çarkın tersine mühendislik uygulamaları sayesinde diş profillerinin belirlenebildiğini göstermiştir. Helis dişliler gibi diş profillerinin oluşturulmasının güç olduğu parçalarda tersine mühendislik uygulamalarının olumlu sonuç verdiği gösterilmiştir. Bunun yanında, tersine mühendisliğin farklı mühendislik problemlerine çözümler getirebileceğini, tarihçesini bilmediğimiz sistemlerin bilgilerine kolayca ulaşmaya olanak sağladığı görülmüştür.

Hızlı prototipi oluşturulan helis dişlinin orijinali ile hızlı prototipi arasında yapılan boyutsal karşılaştırmalarda prototip ölçülerinin yazıcı toleransı aralığında ölçüsel tutarlılığa sahip olduğu görülmüştür (Çizelge 1). Çizelgede numune ile ilgili verilen veriler geleneksel ölçümlerle elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları ve hesaplanan veriler helis dişli çarkın prototipinin gerçek nesneyi % 99,426 doğrulukta karşıladığını göstermektedir. Buradaki sapma 3B yazıcı, malzeme, tabla ısı, BDT modelinin oluşturulma hassasiyeti ve diğer şartlara bağlı olarak değişebilir. Elde edilen değerlerle, eşitlik 1-5'te verilen helis dişli formülleri kullanılarak analitik olarak dişlinin diğer değerleri hesaplanabilir. Bu hesaplamalar sonucunda dişlinin normal modülü (Mn) 3,5 olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda görünen adım (Mt) 3.64, bölüm dairesi çapı (d) 178,36 mm, diş dibi çapı (df) 170,08 mm olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1. 3B yazıcıdan alınan çıktı ve hasarlı dişli arasındaki boyutsal karşılaştırma

Ölçülen değerler	Numune	Prototip
Göbek çapı ($d1$ -mm)	59,7	59,2 mm
Diş Üstü Çapı (Da -mm)	185,64 mm	185,67
Diş yüksekliği (h)	7,64	7,53 mm
Dişli genişliği (b)	54,98 mm	54,92 mm

$$h = 2,166 \times Mn$$

Helis açısı (β)

16°

16°

(1)

$$Mt = \frac{Mn}{\cos \beta}$$

(2)

$$d = Mt \times Z$$

(3)

$$da = d + (2 \times Mn)$$

(4)

$$df = da - (2 \times h)$$

(5)

Çalışmada tarayıcılarla elde edilen verilerden yola çıkarak oluşturulan hızlı prototiplerle eksik bilgilere erişilebileceği görülmüştür. Tarama hassasiyeti iyileştirilerek prototip ve fiziksel parça arasındaki doğruluk % 100'e çıkartılabilir. Ayrıca geliştirilecek yazılımlarla tersine mühendislik yaklaşımıyla elde edilen parça verileri parametrik hale getirilebilir.

Referanslar

1. 3D Sayısallaştırma Sistemleri, http://www.modelleme.8k.com/new_page_6.htm., Erişim tarihi: 27.12.2016.
2. Chikofsky, E.J.; J.H. Cross . "Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy in IEEE Software". IEEE Computer Society: 13–17., 1990.
3. Xiuzi Ye, Hongzheng Liu, Lei Chen, Zhiyang Chen, Xiang Pan, Sanyuan Zhang, Reverse innovative design—an integrated product design methodology, ComputerAided Design 40, 812–827, 2008.
4. Shih-Wen Hsiao and Jiun-Chau Chuang, A reverse engineering based approach for product form design, Design Studies 24, 155–171, 2003.
5. Zhengyi Yang, Yonghua Chen, A reverse engineering method based on haptic volume removing, Computer-Aided Design, 37, 45–54, 2005.
6. I. Budak, J. Hodolic , M. Sokovic, Development of a programme system for datapoint pre-processing in Reverse Engineering, Journal of Materials Processing Technology 162–163, 730–735, 2005.
7. M. Sokovic , J. Kopac, RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development, Journal of Materials Processing Technology 175, 398–403, 2006.
8. Ayyıldız, M., Hasarlı Makine Elemanlarının Tersine Mühendislikle İle Tasarım ve İmalat İçin Yenilenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
9. Ayyıldız, M., Göloğlu, C., Hasarlı Kalıp Elemanlarının Tamiri İçin Tersine Mühendislik Destekli Bir Çerçeve Çalışması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, İats, Karabük, Mayıs 13-15, 1437–1441, 2009.
10. K.W. Tam, K.W. Chan, Thermoforming mould design using a reverse engineering approach, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23, 305–314, 2009.
11. Çiçek, A., Dişlilerin Uzman Sistem Tabanlı Tanımlanması Ve Detaylı Boyutlarının Çıkarılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara, Cilt 23, No 3, 709-717, 2008.
12. Nitish Kumar, Hemant Kumar, Jagdeep Singh Khurmi, Experimental Investigation of Process Parameters for Rapid Prototyping Technique (Selective Laser Sintering) to Enhance the Part Quality of Prototype by Taguchi Method, Procedia Technology, Volume 23, Pages 352-360, 2016.
13. Ratnadeep Paul, Sam Anand, A new Steiner patch based file format for Additive Manufacturing processes, Computer-Aided Design, Volume 63 , Pages 86-100, 2015.
14. Çetinel, M., Tersine Mühendislik İle Üç Boyutlu Cisimlerden Grafik Tasarım İçin Veri Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
15. Karpat, F., Çavdar, K. ve Babalık, F.C., "Bilgisayar Yardımıyla Düz, Helisel, Konik ve Sonsuz Vida Dişli Mekanizmalarının Boyutlandırılması ve Analizi", Mühendis ve Makine Dergisi, Sayı 510, Temmuz 2002.
16. Avcıl, Ö.A., Dişli Çarkların Standartlara Göre Hesaplanması ve Bilgisayar Destekli Tasarımla Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
17. Sönmezler, H., Bilgisayar Destekli Tasarım Programlarında Dişli Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
18. Ayyıldız, M., Çiçek A, Kara F., Bilgisayar Destekli Tasarımda Parametrik Dişli Çark Uygulamaları, Gazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara, Cilt 25, No 3, 643-651, 2010.
19. Nitish Kumar, Hemant Kumar, Jagdeep Singh Khurmi, Experimental Investigation of Process Parameters for Rapid Prototyping Technique (Selective Laser Sintering) to Enhance the Part Quality of Prototype by Taguchi Method, Procedia Technology, Volume 23, Pages 352-360, 2016.

THE CASE OF DIGITAL DESIGN AND FABRICATION LAB IN PRODUCT DESIGN EDUCATION; GAZİ DLAB

Abdullah TOGAY^a, Serkan GÜNEŞ^b, Merve COŞKUN^c, Ebru GEDİK^d

a, Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Ankara/Türkiye, atogay@gmail.com

b, Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Ankara/Türkiye, serkanguenes@gazi.edu.tr

c, Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Ankara/Türkiye, mervesarisin@gmail.com

d, Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Ankara/Türkiye, ebrugdk89@gmail.com

Abstract

The conception of digitalization has gained importance for the field of product design due to the developments in the fields of CAD/CAM over the last decades. Improvements in 3D printing technology have become an essential part of today's product design practice and education. In product design studio courses, products developed by traditional design methods remain at a more conceptual level and product ideas are often not tested in the third dimension. The importance of physical prototypes produced in the early stages of product development processes in product criticism is often emphasized in the literature. This makes it necessary for design students to use 3D printing technology at each stage of the project. Despite the increasing use of technology in product design education, it is possible to say that the access of students to technology is still limited.

In accordance with this need, GAZİ DLAB, which was founded as a digital design and fabrication laboratory in Gazi University Department of Industrial Product Design, aims to introduce different 3d printing technologies to students during their education life within the related courses and to use these technologies effectively in their design processes. In this study, the structure and content of DLAB, the way it works and the opportunities it offers students will be introduced. DLAB's contribution to the design process and integration into the design education will be evaluated through the 3d outputs presented so far.

Keywords: Digital fabrication, 3D printing technology, Product design, Design education.

ÜRÜN TASARIMI EĞİTİMİNDE DİJİTAL TASARIM VE FABRİKASYON LABORATUVARI ÖRNEĞİ; GAZİ DLAB

Özet

Son yıllarda CAD/CAM alanlarındaki gelişmelere bağlı olarak dijitalleşme kavramı ürün tasarımı alanı için önem kazanmıştır. 3 boyutlu baskı teknolojilerindeki gelişmeler ile bu teknoloji günümüz ürün tasarımı pratiğinin ve eğitiminin önemli bir parçası haline gelmiştir. Ürün tasarımı stüdyo derslerinde, geleneksel tasarım yöntemlerinin kullanıldığı süreçlerle geliştirilen ürünler daha kavramsal bir düzeyde kalmakta ve ürün fikirleri genellikle üçüncü boyutta test edilmemektedir. Ürün geliştirme süreçlerinin erken aşamalarında üretilecek fiziki prototiplerin ürün sınanmasındaki önemi literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu, tasarım öğrencilerinin projenin her aşamasında 3B baskı teknolojisi kullanımını gerekli kılmaktadır. Ürün tasarımı eğitiminde teknolojinin kullanımı hergeçen gün yaygınlaşmaktadır ancak öğrencilerin teknolojiye erişiminin halen sınırlı düzeyde olduğunu söylemek mümkündür.

Bu ihtiyaçtan hareketle Gazi Üniversitesi Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü bünyesinde bir dijital fabrikasyon laboratuvarı olarak kurulan GAZİ DLAB; öğrencilerin eğitim hayatları boyunca farklı 3d baskı teknolojileriyle, ilgili dersler kapsamında tanışmasını ve tasarım süreçlerinde bu teknolojileri etkili biçimde kullanmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada DLAB'ın yapısı ve ihtivası, çalışma biçimi, öğrenciye sunduğu imkanlar tanıtılacak; bugüne kadar ortaya konan 3d çıktılar üzerinden tasarım sürecine ilişkin katkıları, tasarım eğitime entegrasyonuna dair izlenimler değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Diital fabrikasyon, 3B baskı teknolojisi, Ürün tasarımı, Tasarım eğitimi.

1. INTRODUCTION

As professions evolves due to internal and external factors, the collective intellectual and experiential knowledge of a profession evolves and continues to grow minute by minute, day by day [1]. With the new technological advances, product design profession has been highly affected by computer aided design systems with the competence to allow to draw virtual but realistic 3d models, to simulate product's functionality virtually before production, and to produce precisely working tangible product parts. According to Industrial Design Institute [1], skills on Digital Modeling & Prototyping via 3D CAD software in general and rapid prototyping methods (SLA, FDM, PJET, SLS, DMLS, and DDM) are defined as one of the most required collective intellectual and experiential knowledge of product design profession. This condition inevitably requires product designers and design students to internalize the 3D printing/rapid prototyping logic to develop a set of 3D thinking habits or practices to cope with the advanced created by the digital manufacturing. Due to the reasons we have mentioned above, an established digital design and fabrication lab (DLAB) described in the following paragraphs of the paper, aiming to facilitate a complete new world of opportunities for the design students in Gazi University to cope with multi-dimensional and studio project-based design dilemmas.

2. RAPID PROTOTYPING AND ITS' APPLICATIONS IN PRODUCT DESIGN PRACTICES

Lennings [2] defines rapid prototyping as a process that automatically creates a physical prototype from a 3D CAD model in a short period of time. According to Wood, it is the creation of three dimensional objects directly from CAD files, without any human intervention [3]. According to these definitions, rapid prototyping can be seen as a broad term that can include both additive and subtractive processes. In the context of this study, it is the use of 3D computer geometry in the production of components using a layer-based build process in condensed time-scales, as Evans described [4]. 3d printing, as the most commonly used way of rapid prototyping, is a process in which different materials are constructed on thin layers in order to construct 3D objects [5].

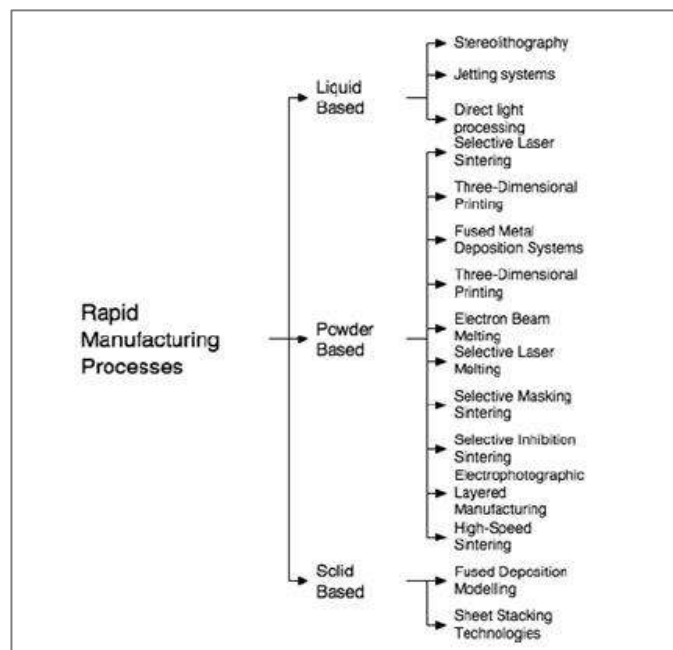


Figure 1. Major rapid manufacturing processes [6]

Hopkinson, Hague, and Dickens [6] have classified rapid prototyping processes according to the raw material used in the process. As can be seen in the Figure 1, these categories are liquid-based, pow-

der-based and solid-based systems. Similarly, Kai and Fai have identified the operating principles of rapid prototyping systems, categorizing them as: liquid-based e.g. stereolithography (SLA) and solid ground curing (SGC); solid-based e.g. laminated object manufacture (LOM) and fused deposition modelling (FDM); powder-based e.g. selective laser sintering (SLS) [7]. Jacobs' more descriptive system identifies layer-additive laser point by point fabrication (SLA and SLS); layer-additive non-laser point by point fabrication (FDM); layer-subtractive laser fabrication (LOM); layer-additive non-laser fabrication. According to Barnatt [5], 3D printing technologies are grouped under 3 headings according to the working principles of systems as:

1. Material Extrusion
2. Photopolymerization
3. Granular Material Binding

2.1. THE APPLICATIONS OF RAPID PROTOTYPING IN PRODUCT DESIGN PRACTICES

Constructing physical models and prototypes has been an essential part of the new product development process since the beginning of the profession [8]. The most basic functions of a physical model are investigation and demonstration [9]. Beside this general distinction, according to Evans taxonomy of physical models, there are eight different types of physical models including 3D sketch model, design development model, appearance model, functional concept model, operational model, production concept model, assembly concept model and service concept model [10]. Each one them is used for different purposes in different stages of product development. While rough models such as 3d sketch and design development models are suitable for shaping by hand, in order to produce more detailed model types like operational or production concept models, the use of precise CAD data and some rapid prototyping techniques are needed.



Figure 2. Taxonomy of physical models [11]

Although a “prototype” may be considered as a form of model, Luzadder [12] specifies its’ definition as “a full-sized working model of a physical system”. A prototype is used for supporting the design decisions and verifying the final design before production. According to Evans [10] taxonomy of prototypes, there are eight different types of prototypes including appearance prototype, alpha prototype, beta prototype, pre-production prototype, experimental prototype, system prototype, final hardware prototype, tooling prototype, off-tool prototype. Accordingly, models are better suited to the early stages of development for using as a means of idea generation and designers’ decision making, whereas prototypes are employed towards the later stages of development for confirmation and representation. In many of the classes given above, rapid prototyping/3d printing is commonly used methods for both product designers and engineers.



Figure 3. Taxonomy of prototypes [11]

Kochan has identified three generic categories of use for rapid prototyping “prototypes for evaluation of designs; prototypes for functional tests/evaluation; models for further manufacturing processes”. (1993 pp22 - 23) Besides the use of rapid prototyping for aesthetic visualization, form-fit-and-function testing, and casting models; recent developments imply a shift in its use as a design tool by moving “into the heart of the manufacturing process” via its use in the production of low volume injection mold tools [13].

When considering the widespread application areas in product design practices, it is required to integrate 3D printing/rapid prototyping into design education in order to prepare design student for their professional life. In the following sections of the paper, the case of Gazi DLAB which was founded in response the mentioned needs will be presented.

3. THE CASE OF GAZI DLAB

The establishment of DLAB was funded by the university within the scope of the Scientific Research Infrastructure Project. The primary aim of DLAB was to introduce different digital design and fabrication technologies to students and to create an opportunity to use these technologies in the design process. With a holistic approach, the need for different technological equipment for different stages of design process had been taken into consideration. The following technologies and equipment were acquired within the project; graphic tablets for digital sketching and rendering, 3d scanners that allow reverse engineering applications, wearable display glasses that enables a variety of augmented reality applications, and 3d printers. Fund-raising is probably the most difficult part, because these machines are very expensive and in our country they need to be imported and shipped from far away. So, some technologies, such as CNC router and laser cutter, could not be acquired due to budget constraints.

Dlab is located in the faculty of architecture in the Maltepe campus of the university. The space where the lab was built was not initially designed as a laboratory. It was a relatively small studio environment. The area was divided into three parts: the meeting area that allows some courses and research meetings to be held, the printing area where 3d printers are located and the area where students can work individually with computers and tablets. (Figure 4.)



Figure 4. General views of the DLAB

It targeted primarily industrial design undergraduate/graduate students. Taking into account the intensity of printing schedule, it can also serve other departments of the faculty and university (e.g. Architecture, City and Regional Planning, Electronic Engineering, Mechanical Engineering). For communicating with students and other users, a social media group page was established [14]. The content of the page is constantly updated. At DLAB there are simply no paid staff at all. The staff was composed by research assistants and student assistants of the department, who are in charge of printing scheduling and proper functioning of the LAB.

In the scope of this paper, the following sections will focus only on the content related to 3d printing technology. When selecting the printing devices, it was aimed to introduce different 3D printing technologies to students. There are five different printers in three different technologies within the DLab including two *Zortrax M200* and one *Makerbot Replicator plus* with FDM technology, one *Stratasys Objet24* with Polyjet technology and one *3D Systems Projet 1200* with SLA technology (Figure 5.). Thanks to the diversity of printing technology, DLAB has the ability to meet a wide range of design needs.



Figure 5. 3D printers

3D printers with FDM technology was the most preferred type in DLAB because the cost of printing is very low compared to other technologies and the raw materials are easily accessible and cheap. While *Zortrax M200* uses ABS material extensively, *Makerbot Replicator Plus* uses PLA, a bio-plastic. Thus, students are able to work with two commonly used material types. *Stratasys Objet24* with Polyjet technology enables multi-part printing in complex forms thanks to its high surface accuracy and gel-like support material. *3D Systems Projet 1200* with SLA technology is preferred to be used in projects requiring very small details to be developed in several elective courses like jewelry-accessory design.

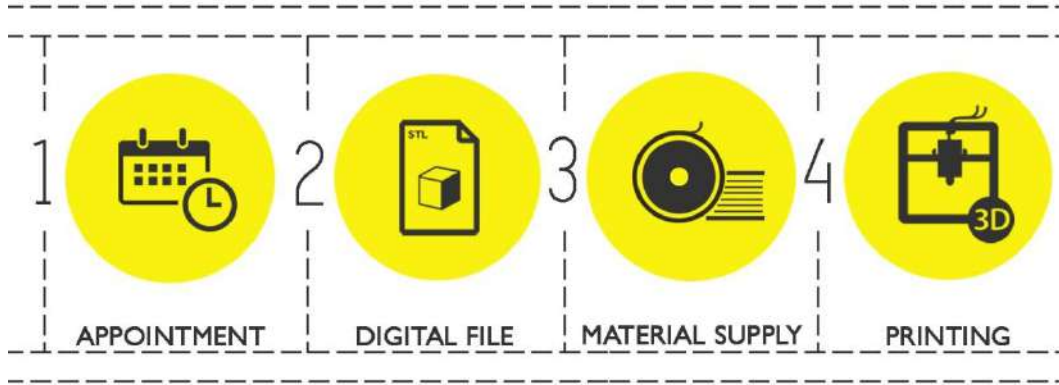


Figure 6. 3D printing procedure of DLAB

As explained in Figure 6., the printing process consists of 4 steps: making an appointment, preparing the solid CAD file and converting it to STL format, supplying appropriate material by students, printing and delivery.

3.1. DLAB'S INTEGRATION INTO DESIGN EDUCATION

A great number of model/prototype making processes within the scope of studio projects or individual projects have been supported by the DLAB which started to serve in the fall semester of 2016-1017. 3d printing was first introduced in the scope of the final assignment of the CAD I (Computer Aided Design I) course that students take in the first semester of the second year. The product prototypes developed by the second, third and fourth year undergraduate students in their studio courses were 3d-printed in DLAB. The model making support had been provided to the students who want to take 3d printing outside the scope of any course. Besides supporting model making applications, some academic studies are being carried out by taking advantage of facilities of DLAB.

A few different prototype examples designed within the scope of 2nd and 3rd grade studio projects are given below. After a brief description of each project, DLAB's contribution to the design projects will be evaluated through the 3d outputs according to the course instructors.

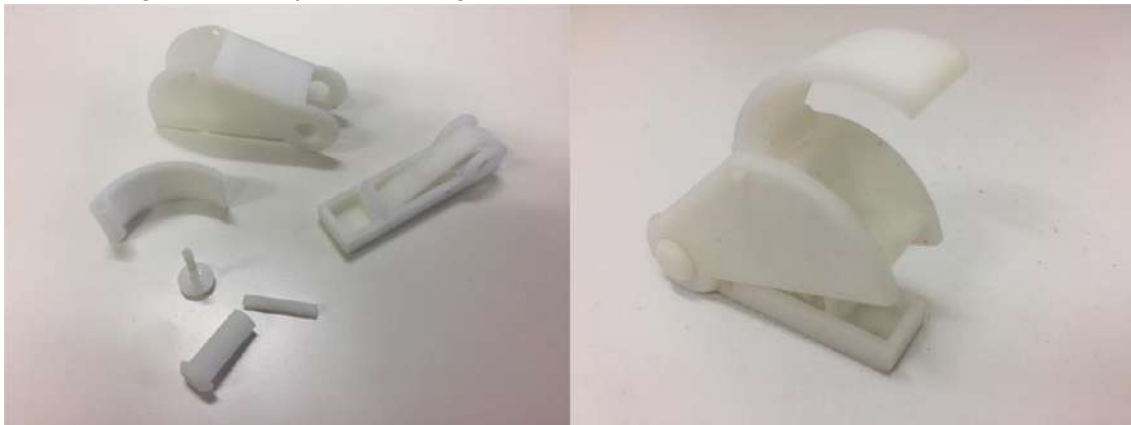


Figure 7. Second grade studio project/Mechanical kitchen appliances project/Cube sugar crusher
Figure 7. represents the cube sugar crusher working prototype designed as a mechanical kitchen appliance by a second grade student. The product consists of 6 parts printed with FDM technology and combined after printing.

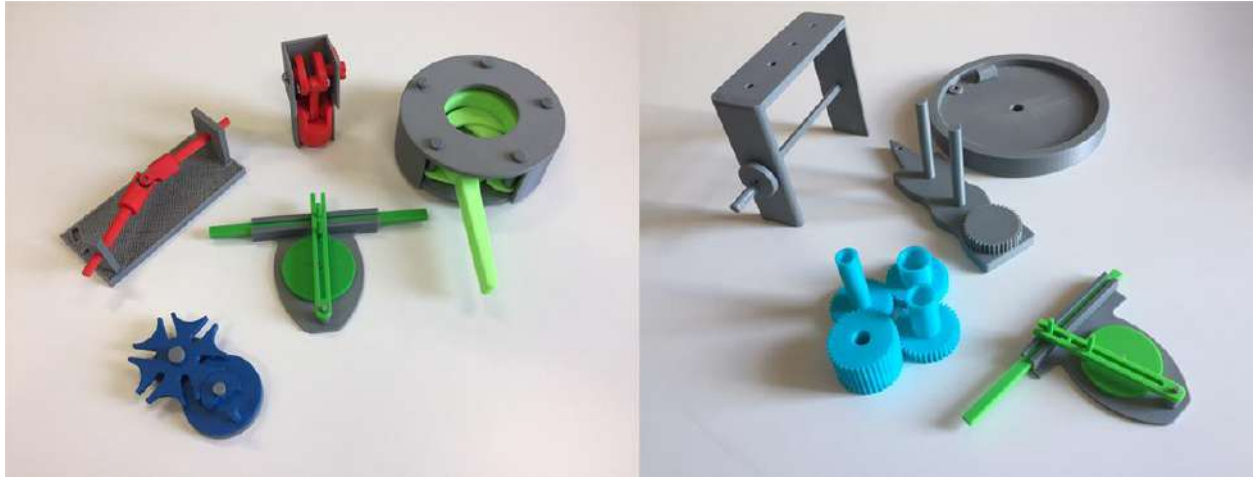


Figure 8. Second grade studio project/Working mechanism project examples

The second grade studio course tutors observed that there are some difficulties experienced by students in transferring the theoretical knowledge they learned in some courses (such as materials, mechanism and details, statics) to practice. Considering this, a two-stage project was developed. In the first phase of the project, students were asked to analyze an existing mechanism and to produce a working physical prototype then they were asked to design a game or toy using these mechanisms. Several examples of working mechanism prototypes can be seen in Figure 8.



Figure 9. Third grade studio project/Chocolate design examples

In the chocolate design project, third grade design students were asked to design chocolates to be produced by industrial methods. The project heavily focused on form generation rather than function or innovation. Each one of the final designs was modeled and printed as blocks (Figure9).

Surprise egg toys was another example of third grade studio project. Students were asked to design a product which is small enough to fit a surprise egg, has multiple and mechanically connected parts. Five different design solutions can be seen in the Figure 10.



Figure 10. Third grade studio project/Surprise egg toy examples

In order to understand their evaluation, a mini interview was conducted with both second and third grade design studio tutors. After asking for a brief explanation of the projects that they used rapid prototyping, the following kinds of questions were asked; How did you integrate 3d printing technologies into the studio courses? What were the effects of using these technologies in the project? Was this effective to have this opportunity during determining design briefs?

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results of the interview revealed some important points that will be highlighted in this section. According to the answers based on their experience and observations, the following interpretations were reached:

- Students had to manage the design process in terms of time planning and decision-making in a more professional manner. In the project where the traditional methods were used, jerry-built models were made at the night before the jury by the student. With the use of rapid prototyping in model making, the need to set a different deadline for model making affected students' time planning skills in a positive way.
- It was indicated that using rapid prototyping technologies allow determining project definitions or some project requirements that will not be possible to build models by hand. Second grade working mechanism project (Figure 8.) and third grade surprise egg toy project (Figure 10.) can be given as examples of such projects. It was stated that when determining the design requirements of these two projects, students' access to technology through the presence of DLAB was effective.
- It was observed that the 3d modeling ability of students became more important. In order to print working models, students needed to make 3d CAD modeling more professionally by taking into consideration several factors such as wall thickness, connection details, and tolerance. In some cases, it was observed that students had a tendency to avoid complex geometries due to the lack of 3d modeling capabilities (Figure 9.)
- It was concluded that it has a positive effect on the communication between the student and jury members during product evaluation. Students can be more easily persuaded about the product criticisms about a hand-held, working physical prototype.
- It was observed that the self-esteem of the students who were subjected to jury evaluation with working prototypes improved in professional sense.

Given the widespread use of technology in product design applications, the integration of rapid prototyping/3d printing technologies into design education is required in order to prepare students for their professional life. This study aimed to introduce GAZI DLAB, which was founded as a digital design and fabrication laboratory in accordance with this need. The characteristics of DLAB in terms of the way of working, the content and the structure were described. Finally, DLAB's contribution to the design education was tried to be understood through the 3d outputs that was designed within the scope of 2nd and 3rd grade studio projects.

When evaluated the results of the implementation, it was observed that these technologies have increased the diversity of focus in educational projects, have allow product pre-testing during development, and have supported the development of prototypes similar to the final product. When addressed in this context, it can be said that the development and optimal use of such technologies will play an important role in training more powerful designers.

4. ACKNOWLEDGEMENT

We would like to thank Prof. Dr. H. Güçlü Yavuzcan who is the head of our department and also the coordinator of the second grade studio course for his contribution during this study with his valuable comments. We would like to express our gratitude to everyone who has contributed during the establishment of Gazi DLAB. Also, we would like to acknowledge all students, colleagues and tutors who contributed in the process of developing the 3D outputs discussed in the scope of this study.

References

1. Industrial Design Institute. (2014). Industrial design body of knowledge (IDBOK™ Guide). Philadelphia: Industrial Design Institute.
2. Lennings, A. F. (1997). CNC offers RP on the Desktop. *Prototyping Technology International* 1997 annual report. (p. 297-301)
3. Wood, L. (1993). *Rapid Automated Prototyping*, Industrial Press, New York, NY.
4. Evans, M. A. (2002). The integration of rapid prototyping within industrial design practice (Doctoral dissertation, © Mark Andrew Evans).
5. Barnatt, C. (2013). 3-D printing: The next industrial revolution. *ExplainingTheFuture.com*
6. Hopkinson, N., Hague, R., & Dickens, P. (Eds.). (2006). *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*. John Wiley & Sons.
7. Kai, C.C., Fai, L.K. (1997). *Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing*. John Wiley & Sons Ltd, Singapore.
8. Gibson, I., Kvan, T., & Ming, L. W. (2002). Rapid prototyping for architectural models. *Rapid Prototyping Journal*, 8(2), 91-99.
9. Alley, L. G. (1961). Three-dimensional models: How effective? *Journal of Architectural Education*, (1947-1974), 15(4), 19-24.
10. Pei, E., Campbell, I., & Evans, M. (2011). A taxonomic classification of visual design representations used by industrial designers and engineering designers. *The Design Journal*, 14(1), 64-91.
11. <http://www.idsa.org/education/how-they-do-it#field--how-they-do-it-2>
12. Luzadder, W. J. (1975). *Innovative Design*. London: Prentice-Hall.
13. Dickens, P. M. (1995). *Proceedings of the 4th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing* 13 - 15 July 1995, Nottingham: The University of Nottingham
14. <https://www.facebook.com/digitaldesignlab/>

ÜRÜN TASARIMINDA 3 BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİ KULLANIMI ÜZERİNE KEŞFEDİCİ BİR ÇALIŞMA²

Abdullah TOGAY^a, Ebru GEDİK^b

a, b. Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Ankara / TÜRKİYE.

Son yıllarda dijital teknolojilerdeki gelişmelerin hızlanması, endüstri ürünleri tasarımı disiplini üzerinde incelemeye değer değişikliklere yol açacak potansiyele sahiptir. Bilgisayar teknolojileri, dijital araçlar ve özellikle 3 boyutlu (3B) baskı teknolojilerinin gelişimi, tasarımcıyı ve tasarım süreçlerini önemli derecede etkilemektedir. 3B baskı teknolojilerinin gelişimi ile bu teknolojinin ürün tasarım süreçlerinde kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Nitekim, önceleri ürün tasarım sürecinin yalnızca prototipleme evresinde kullanılan bu teknoloji, bugün tasarım sürecinin erken evrelerinden itibaren kullanılmaktadır. Bu doğrultuda 3B baskı teknolojilerinin, ürün tasarım süreci ve ürün kararları üzerine etkilerinin belirlenmesi ve olası potansiyelinin irdelenmesi; akademik çalışmalar, tasarım eğitimi ve tasarımcıların bu teknolojiyi kendi tasarım süreçlerine dâhil etmesi açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada 3B baskı teknolojisinin, ürün tasarım süreci ve ürüne potansiyel etkilerini belirlemek amacıyla 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanarak tasarımcı ortaklığında 3 farklı ürünün tasarım sürecinden oluşan keşfetmeye dayalı durum çalışması yapılmıştır. Durum çalışmaları, kurgulanan yarı yapılandırılmış tasarım süreçlerinin gözlemlenmesi ve analizine dayandırılmıştır. Çalışma sonucunda ürünün form, fonksiyon ve boyut özelliğine bağlı olarak, 3B baskının sürece ve ürün kararlarına etkisinin farklılıklar gösterdiği tespit edilmiş ve bu farklılıkların genel tasarım sürecine etkilerine ilişkin çıkarımlar aktarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu Baskı Teknolojisi, Ürün Tasarımı, Tasarım Süreci.

AN EXPLORATORY STUDY ON THE USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY IN PRODUCT DESIGN

Abdullah TOGAY^a, Ebru GEDİK^b

a, b. Gazi University, Faculty of Architecture, Department of Industrial Design, Ankara / TURKEY.

Recent major developments in digital technologies have the potential to lead to significant changes in the discipline of industrial design. Computer technologies, digital tools, and especially 3D printing technology, have a significant impact on designers and design processes. The use of 3D printing systems in product design processes are widespread regarding technological developments. This technology, which is predominantly used in the prototype stage of the product design process, has been in use since the early stages of the design process today. In this respect, determining the effects of 3d printing technologies on product design process is important for the academicians, designers and students in this field to understand the potential of the technology and to incorporate it into their processes.

In this study, three small scale expolatory case studies were conducted to investigate the effects of 3D printing technology on product design process and product. In case studies, the applied semi-structured design process is observed. As a result of the study, it was determined that the effects of 3D printing on the process and decisions differ depending on the form, function and dimension of the product, and these differences were tried to be revealed and observations about the effects on the general design process were reported.

Keywords: 3d Printing Technology, Product Design, Design Proces

1. GİRİŞ

² Bu Çalışma, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Ürünleri Tasarımı Anabilim Dalında Ebru Gedik tarafından yürütülmekte olan tezin ön araştırmasından üretilmiştir.

Tarihsel süreç boyunca teknolojik gelişmeler, üretme ve tasarlama biçimlerimizi değiştirerek toplumsal dönüşümlerde etkili olmuş, buharlı makineler, montaj hattı, internet ve 20. yüzyılın başlarından itibaren bilgi teknolojilerindeki gelişmeler ile dijitalleşme kavramı önem kazanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım (Computer-aided design) ve bilgisayar destekli üretim (Computer-aided Manufacturing) ile birlikte geleneksel üretim yöntemlerinin yerini dijital fabrikasyon teknolojileri almaya başlamıştır [1]. Dijital fabrikasyon; nesneleri imal etmek için bilgisayar kontrollü makinelerin kullanıldığı üretim süreçleridir. Dijital fabrikasyon yöntemleri geleneksel üretimin (formative) aksine eklemeli (additive) ve eksiltmeli (subtractive) olmak üzere 2 ana başlık altında toplanmaktadır [2]. Eklemeli veya eksiltmeli üretim prensiplerini kullanan dijital üretim araçlarının en geniş beceriye sahip örnekleri; lazer kesiciler, CNC frezeler ve 3B yazıcılarıdır [3]. 1980'li yıllarda kullanılmaya başlayan 3B baskı teknolojilerinin üretim, ekonomi, tasarım, eğitim gibi pek çok alanda yaratacağı öngörülen büyük değişimler sonucunda 3. endüstri devrimi olabileceği tartışılmaktadır. Buharlı makineler, montaj hattı, internet, bilgisayar gibi her devrimsel teknolojiye olduğu gibi, katmanlı imalat teknolojilerinin endüstriyel ve kişisel düzeyde yaygınlaşması, yaşam biçimlerimizi değiştirecektir [4]. Diğer yandan üretim teknolojilerindeki bu gelişmeler tasarımcının rolünü büyük ölçüde değiştirebilme potansiyeline sahiptir [5]. Bu doğrultuda endüstri ürünleri tasarımı disiplini, 3 boyutlu baskı teknolojilerinin potansiyelinin anlaşılmasında ve etkilerinin araştırılmasına irdelenmeye değer bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

2. Üç Boyutlu Baskı Teknolojileri ve Ürün Tasarımında Kullanımı

Üç boyutlu baskı, diğer adıyla katmanlı imalat (additive manufacturing), farklı metaryellerin ince katmanlar halinde birbiri üstüne inşa edilerek 3 boyutlu nesneler imal edildiği bir süreçtir. 3 boyutlu baskı teknolojileri çalışma prensiplerine göre malzeme ekstrüzyonu (Material Extrusion 3d Printing), fotopolimerizasyon (Photopolymerization) ve toz Zeminde Füzyon (Granular Material Binding) olmak üzere 3 ana başlık altında toplanmaktadır [6]. 3B baskının genel işleyişi bilgisayar destekli tasarım programları veya 3 boyutlu tarama ile objenin 3 boyutlu modelinin hazırlanması, hazırlanan modelin 3B yazıcının işleyebileceği bir format olan STL formatına dönüştürülmesi ve üretim aşamasından oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. 3 Boyutlu Baskının Genel İşleyişi [7].

3 boyutlu baskı kullanımının gelişim süreci hızlı prototipleme, son ürün üretimi ve son olarak da bugün kullandığımız masaüstü yazıcılar gibi son tüketiciye ulaşarak evlerde kullanımı olmak üzere 3 aşama içermektedir [8]. Yaklaşık 20 yılı aşkın süredir kullanılan 3B baskı teknolojilerinin ilk ve en yaygın kullanımı hızlı prototiplemedir. Bu nedenle yaygın olarak hızlı prototipleme (rapid prototyping) adıyla da bilinmektedir.

Endüstriyel tasarım, fiziksel bir nesne veya hizmetin fikir üretme, konsept geliştirme, test etme ve üretimi veya uygulaması olarak tanımlanabilir [9]. Endüstri ürünleri tasarımında, tasarım sürecinin aşamalarını gösteren pek çok model bulunmaktadır. Bununla birlikte bu modellerde konsept üretme, tasarım geliştirme ve

detaylandırma olmak üzere tasarım sürecinde yürütülen 3 ana aktiviteden söz etmek mümkündür [10]. 3B baskı teknolojilerinin gelişimi ile beraber ürün tasarım sürecinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Başlangıçta ürün tasarım sürecinde yalnızca prototipleme amacıyla kullanılan bu teknoloji, son yıllarda tasarım sürecinin erken evrelerinden itibaren kullanılmaya başlamıştır. Hızlı prototipleme, ürün tasarımcıları için tasarım üretiminde önemli bir kolaylaştırıcı hale gelmektedir. Genellikle, sürecin her aşamasında ürünleri görmek için kullanılan hızlı prototipleme, bir ürünün fonksiyonel ve ergonomik özelliklerini göstermek için kullanılabilir [11]. 3B baskı teknolojilerinin tasarım süreçlerine dahil olması ile birlikte tasarım pratiğine olan etkileri kaçınılmazdır. Bu etkilerin neler olduğunun belirlenmesi, alandaki tasarımcı, akademisyen ve öğrencilerin teknolojinin potansiyeli anlayarak süreçlerine dahil etmesi açısından önem arz etmektedir.

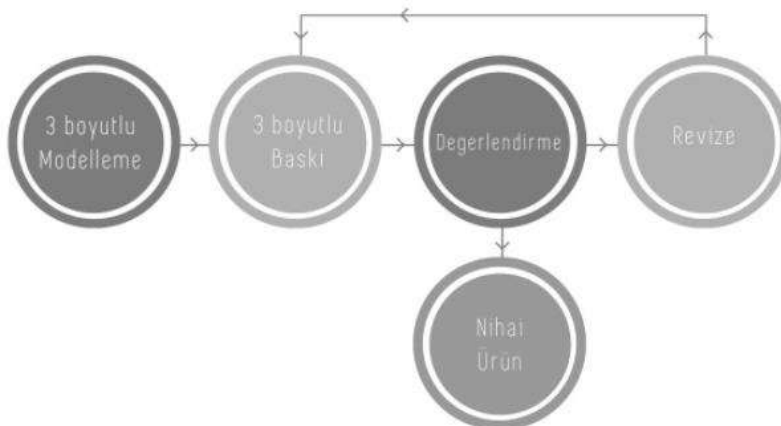
3. METOT

Bu çalışmanın amacı; ürün tasarım sürecinde 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımının ürüne ve sürece potansiyel etkilerini keşfetmektir. Çalışmanın veri toplama yöntemi 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanarak tasarımcı ortaklığında gerçekleştirilen ve 3 farklı ürünün tasarım sürecinden oluşan keşfetmeye dayalı durum çalışmasıdır. Bu amaç doğrultusunda yapılacak çalışmalar ile cevaplanması hedeflenen başlıklar şunlardır:

- Bir ürünün geliştirilme sürecinde 3 boyutlu baskı teknolojisi hangi amaçlarla kullanılabilir?
- Bir ürünün geliştirilme sürecinde 3 boyutlu baskı teknolojisinin kullanımı ürünle ilgili hangi kararlar üzerinde etkili olabilir?
- Farklı özellikteki (form/fonksiyon vb.) ürünlerin tasarım sürecinde 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımı, amaçları ve etkileri bakımından farklılık gösterir mi?
- Bir ürünün geliştirme sürecinde, farklı tasarım süreci evrelerinde 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımı, amaçları ve etkileri bakımından farklılık gösterir mi?

3.1. Durum Çalışması

Çalışma kapsamında 3 boyutlu baskı teknolojisinin ürün tasarım sürecine ve ürüne etkilerini keşfetmek amacıyla 3 farklı ürünün kurgulanan yarı yapılandırılmış tasarım süreci ile durum çalışması yapılmıştır. Yapılan küçük ölçekli ürün tasarımlarında, tasarım sürecinin konsept geliştirme evresinden sonra ürün geliştirme evresinde bilgisayar destekli tasarım programları ile 3 boyutlu modeli hazırlanmış ve tasarım süreci hazırlanan ilk modelden itibaren 3 boyutlu baskı alınması, alınan baskı üzerinden değerlendirme yapılması, 3 boyutlu modelin revize edilmesi ve tekrar 3 boyutlu baskı alınması şeklinde tekrar edecek şekilde yapılandırılarak ürünler nihai sonuçlarına ulaşmıştır (Şekil 2). Durum çalışması için ürünlerin seçiminde boyutun küçük tutularak baskı sürecinin hızlandırılması, bu sayede süreç içerisinde alınan baskı sayısının artırılarak deneme yapılabilmesi, hem form hem de fonksiyon odaklı olmak üzere farklı ürünler olması ve kullanım denemelerinin tarafımızdan yapılabilmesi kriter olarak alınmıştır. Bu doğrultuda durum çalışması için tasarlanan ürünler iğne yaparken acı azaltıcı aparat, tatlı ambalajı ve fıstık açacağıdır.



Şekil 2. Durum çalışması için yarı yapılandırılmış tasarım süreci

3.1.1 Çalışmanın Yürütülmesi

Çalışma, Gazi Üniversitesi Dijital Tasarım Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Gazi Üniversitesi Dijital Tasarım Laboratuvarı(dlab); dijital çizim tabletleri, 3 boyutlu baskı cihazları, 3 boyutlu tarama ve artırılmış gerçeklik gözlükleri olmak üzere dijital tasarım ve üretim teknolojilerinin yer aldığı bir laboratuvardır. Dlab bünyesinde 2 adet Zortrax M200 ve 1 adet Makerbot Replicator plus FDM teknoloji 3 boyutlu yazıcı, 1 adet Stratasys Objet24 Polyjet teknoloji 3 boyutlu yazıcı ve 1 adet 3Dmest Projet 1200 SLA teknoloji 3 boyutlu yazıcı bulunmaktadır. Durum çalışmalarında baskı yapılacak cihaz kararı baskı maliyeti, baskı boyutları, baskı süresi ve baskı alınacak ürün özellikleri (mekanik, yüzey vb.) değerlendirilerek verilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda baskılar Zortrax M200 FDM teknoloji 3 boyutlu yazıcı ile ABS filament kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3. Gazi Üniversitesi Dijital Tasarım Laboratuvarı Genel Görünüş

Durum çalışmasında tasarlanan ürün 1, iğne yaparken acı azaltıcı aparattır (Şekil 4). Ürünün amacı, şeker hastaları gibi sürekli iğne olması gereken kişilerin-özellikle hastalığın başlangıç sürecinde olan çocukların-kendi kendilerine iğne yapmalarını kolaylaştırmak ve yaparken acı hissetmesini engellemektir. Ürünün konsept geliştirme evresinde, ürünün hem farklı boyuttaki parmaklarda hem de karından yapılan iğne sırasında kullanılması ve acı hissini engellemek amacıyla ince/plastik çıkıntıların iğne yapılan bölgeye baskı yapması öngörülmüştür. Alınan ilk baskıdan sonra öngörülen karından kullanımın uygun olmadığı görülerek, yalnızca parmak için kullanılabilen bir ürün olmasına karar verilmiştir. Bu kararla birlikte ürünün ölçü-boyut kararları değişmiştir. Sonraki süreçte farklı ölçülerde baskılar denenerek uygun ölçüye karar verilmiştir. Ürünün acı hissini azaltma işlevi için öngörülen ince/plastik çıkıntıların acı hissini azaltıp azaltmadığını test etmek amacıyla detay baskıları alınarak denemeler yapılmış ve çıkıntıların formu/kesiti/kalınlığı değiştirilmiştir. Ürünü kullanırken tutucu parmakların kaymaması için form üzerinde yüzeyler oluşturulmuştur. Ürünün renk kararı baskı sürecinde alınan renkli baskıdan değerlendirilerek verilmiştir.



Şekil 4. İğne yaparken acı azaltıcı aparatın tasarım süreci

Durum çalışmasında tasarlanan ürün 2, tatlı ambalajıdır (Şekil 5). Ürün; markette satılacak ve içinde toz şerbet ambalajı bulunacak kuru antep baklavası ambalajıdır. Alınan ilk baskıdan sonra baskının içine kuru baklava ve şerbet paketi yerleştirilmiş ve sonrasında ürünün ölçü/boyut kararı değiştirilmiştir. Sonraki süreçte baskı üzerinden ürünün üretim yöntemi düşünülerek kalıp açılırları değerlendirilmiş ve form revize edilmiştir.



Şekil 5. Tatlı ambalajının tasarım süreci

Durum çalışmasında tasarlanan ürün 3, fıstık açacağıdır (Şekil 6). Ürün; antep fıstığı ambalajının içinden çıkacak ve antep fıstığını kolay açmaya yarayacak fıstık açacağıdır. Ürünün konsept geliştirme evresinde ürünün ucundaki kabuk formuna uyumlu çıkıntının antep fıstığının içine tamamen girerek açması öngörülmüştür. Alınan ilk baskıdan sonra antep fıstığını açma işlevini test etmek amacıyla denemeler yapılmıştır. Denemelerde ağız çok açık olmayan fıstıklarda öngörülen açma şeklinin kullanımı zorlaştırdığı ve uzun süreli kullanımda açma ucunda bükülme gerçekleştiği görülmüştür. Sonraki süreçte alınan baskılarla yapılan denemelerde çıkıntı kısmının fıstık içine tamamen girmeden ağız kısmında yapılan dönme hareketiyle fıstığın daha kolay açıldığı ve ağız çok açık olmayan fıstıklarda da etkili olduğu görülmüştür. Yine baskı sürecinde uç kısmındaki bükülmeyi engellemek amacıyla çıkıntının uzunluğu azaltılmış ve gövde ile birleşim noktası güçlendirilerek form revize edilmiştir.



Şekil 6. Fıstık açacağının tasarım süreci

3.1.2. Çalışmanın Analizi

Durum çalışmalarında gözlemlenen 3 farklı ürünün yarı yapılandırılmış tasarım süreci, ürünün özelliği göz önünde bulundurularak tasarımcı tarafından 3 boyutlu baskının etkisi ekseninde değerlendirilmiştir (Çizelge 1). Ürün tasarım sürecinde 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımının etkinliğini değerlendirmek amacıyla 5'li likert ölçeği kullanılmıştır.

Çizelge 1. Ürün tasarım sürecinde 3 boyutlu baskı etkisinin tasarımcı tarafından değerlendirilmesi

Etkinlik Derecesi		Hiç	Az	Orta	Çok	Fazlasıyla
Yanıtların Puanlaması		0	1	2	3	4
KRİTERLER		ÜRÜN1	ÜRÜN2	ÜRÜN3		
ÜRÜN KARARLARI	Form estetik değerlendirme	3	4	2		
	Ölçü-boyut belirleme	4	4	3		
	Renk kararı	2	1	0		
	Kullanım senaryosu/ürünün kullanımı	4	1	4		
	Mekanik özellikler	4	1	4		
TASARIM SÜRECİ	Ürün geliştirme evresinde kullanımı	4	3	4		
	Detaylandırma evresinde kullanımı	4	2	3		
GENEL ETKİLER	Kullanım denemelerini kolaylaştırma	3	2	4		
	Revizyon geribildirimini kolaylaştırma	4	3	4		
	Mekanik özellikleri değerlendirebilme	3	1	4		
	Fonksiyonel özellikleri değerlendirebilme	4	1	4		
	Üretim kararlarını destekleme	3	4	3		
	Nihai kararlara erişimi kolaylaştırma	4	3	4		
	Tasarım sürecini kısaltma	4	3	3		
	Final ürün kalitesini artırma	4	3	3		
ORTALAMA		3,6	2,4	3,3		

Tasarımcı tarafından yapılan değerlendirmelere göre 3 boyutlu baskı teknolojisi;

- En etkin olarak iğne aparatının tasarım sürecinde kullanılmıştır.
- İğne aparatı ve fıstık ağacının tasarım sürecinde kullanım senaryosu ve mekanik özellikler ile ilgili kararlarda daha etkin, tatlı ambalajında form estetik değerlendirme ve ölçü-boyut belirlemede etkin olmuştur.
- Tüm ürünlerin tasarım sürecinde renk kararı vermekte düşük etkinliktedir.
- Tüm ürünlerin tasarım sürecinde üretim kararlarını desteklemede etkindir.
- İğne aparatının tasarım sürecinde detaylandırma evresinde etkin olarak kullanılırken, tatlı ambalajında bu evredeki etkinliği düşüktür.
- İğne aparatı ve fıstık ağacının tasarım sürecinde, mekanik ve fonksiyonel özellikleri değerlendirebilmede ve kullanım denemelerini kolaylaştırmada daha etkindir.
- Tüm ürünlerin tasarım sürecinde revizyon geri bildirimini ve nihai kararlara erişimi kolaylaştırmış, tasarım sürecini kısaltmış ve final ürün kalitesini arttırmıştır.

Üç ürünün yarı yapılandırılmış tasarım sürecindeki gözlemler şunlardır:

- Ürünün boyutunun büyümesi ile baskı süresini arttırması, tasarımın bitirilmesi için zamanın kısıtına bağlı olarak alınan baskı sayısını düşürmüştür.

- Özellikle küçük detayların tasarımında CAD modeldeki yanlışlar alınan baskı ile farkedilmiştir.
- Baskı malzemesinin son ürün malzemesi ile aynı olması mekanik özellikleri değerlendirme ve üretim kararlarını vermede tasarımcının öngöründe bulunmasını kolaylaştırmıştır.
- Tatlı ambalajının form odaklı bir ürün olması sebebi ile tasarım sürecinde 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımının etkinliği fonksiyonel olan diğer 2 ürüne göre düşük olmuştur.
- Alınan 3 boyutlu baskılar tasarımcının konsept evresindeki öngörülerini test ederek yanlışlarını erken evrede fark etmesini sağlamıştır.
- Konsept geliştirme evresinden sonra 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımı ürünün erken fizikileşmesini sağladığından tasarımcının nihai kararlara erişimini kolaylaştırmıştır.

4. SONUÇ

Çalışmanın sonuçları, 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımının ürün kararları ve tasarım süreci üzerindeki etkilerini belirlemeye yönelik geliştirilen ve her bir durum çalışması için tasarımcıya uygulanan değerlendirme ölçeğinden ve veri toplamak amacı ile süreç içerisinde yapılan gözlemlerden elde edilmiştir. Yapılan keşfedici çalışma ile 3 boyutlu baskı teknolojisinin ürün tasarım sürecinde kullanımının ürün ve süreç üzerindeki potansiyel etki alanları ve bu etkilerin ürünün form, fonksiyon, boyut özelliğine bağlı olarak amaçları ve etkileri bakımından farklılaşma noktaları ortaya konmuştur. Sonuç olarak yapılan keşfedici durum çalışması ile 3 boyutlu baskı teknolojisinin ürün tasarım sürecinde kullanımı ile ilgili yapılan çıkarımlar şunlardır:

- 3B baskı teknolojisi tasarım sürecinin konsept geliştirme evresinde öngörülen alternatifleri değerlendirmek amacıyla kullanılabilir.
- Ürün tasarım sürecinin erken evrelerinde 3B baskı teknolojisi kullanımı, ürünü erken fizikileştirerek tasarım sürecindeki yanlışları azaltabilir, buna bağlı olarak final ürün kalitesini arttırabilir.
- 3B baskı teknolojisi tasarım sürecinde detay geliştirmede daha etkin kullanılabilir.
- Tasarım sürecinde 3B baskı teknolojisi kullanımı, kullanıcıyı erken evrede sürece dahil ederek geri bildirim almayı kolaylaştırabilir.
- Ürünün boyutu tasarım sürecinde baskı alma kararını/ alınan baskı sayısını etkileyebilir.
- 3B baskı teknolojisi fonksiyon odaklı ürünlerin tasarım sürecinde form odaklı ürünlere göre daha etkin kullanılabilir.
- 3B baskı teknolojisi ürünün üretimi ile ilgili kararları desteklemede etkili olabilir.
- 3B baskı teknolojisi CAD modeli doğrulamada etkili olabilir.
- Son ürün malzemesi ile baskı malzemesi arasındaki yapısal benzerlik 3B baskı teknolojisi kullanımının etkinliğini arttırabilir.

Referanslar

1. Lim, C. K. (2006). Towards a Framework for Digital Design Process. *Proceedings of CAADRIA-2006, Kumamoto, Japón*, 245-252.
2. Jacobs, J. J. M. (2013). Algorithmic craft: the synthesis of computational design, digital fabrication, and hand craft, Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
3. Mota, C. (2011). The rise of personal fabrication. In *Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition*, 279-288.
4. Prince, J. D. (2014). 3D printing: An industrial revolution. *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, 11(1), 39-45.
5. Morris, J. A. (2007). Personal fabrication and the future of industrial design. In *CSID/IDSA International Education Conference Proceedings*.
6. Barnat, C. (2013). 3-D printing: The next industrial revolution. *ExplainingTheFuture.com*.
7. TSKB Ekonomik Araştırmalar (2014), 3. Endüstri Devrimi? 3 Boyutlu Baskı ve Masaüstü İmalat.
8. Berman, B.(2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155- 162.
9. Ulrich, K. T. (2003). *Product design and development*. Tata McGraw-Hill Education.
10. Pahl, G. , Beitz, W. (1996). *Engineering design: a systematic approach*, London; NewYork, Springer.
11. Sass, L., & Oxman, R. (2006). Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. *Design Studies*, 27(3), 325-355.

Dairesel Zimba Katlanabilir Anvilinin Tasarım ve Prototiplenmesinde 3D Baskı Teknolojilerinin Uygulanması

Mahmut Arıkan¹, Ahmet Can², Ahmet Samancı³, Serdar Nuhoğlu¹, Hüseyin Yılmaz⁴ Mustafa Şahin⁴

1.Necmettin Erbakan University, Graduate School of Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

2.Necmettin Erbakan University, , Faculty of Engineering, Department of Industrial Design

3. Necmettin Erbakan University, Faculty of Aeronautics and Astronautics

4. Selçuk University, Faculty of Medicine, Department of General Surgery

Özet

Sirküler staplerler (Dairesel Zimba) laparoskopik cerrahide kullanılan, bir ana gövde ve bu gövdenin ucuna takılan anvil parçasından oluşmaktadır. Bu çalışmada sirküler staplerlerin medical sektöründeki kullanımını artırmaya yönelik olarak anvil parçasının operasyon esnasındaki çalışma capında %45 küçültme hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, kendi üzerine bir mekanizma yardımıyla katlanabilen anvil tasarımı ve seri üretime yönelik imalat öncesi prototip çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve optimizasyon süreçlerinde, günümüzde tersine mühendislik ve hızlı prototipleme alanlarında sıklıkla tercih edilen 3D optik tarama ile nokta bulutu oluşturulmuş ve 3D baskı teknolojilerini (FDM, SLS, SLA) kullanarak katlanabilir anvil prototipi imal edilmiştir. Sektörde ticari olarak bulunan ürünler üzerine doğrudan entegre edilebilir katlanabilir anvil prototip çalışmalarında; hassas dökülmek üzere mum modellerin imalatı 3D printer teknolojisi kullanılarak tamamlanmıştır. Ayrıca, metal tozların sinterlenerek katmanlar şeklinde basılması ile gerçekçi prototip imal edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gastrointestinal operasyonlar, sirküler stapler, hızlı prototipleme

THE APPLYING OF 3D PRINTING TECHNOLOGY ON DESIGN AND PROTOTYPING OF A CIRCULAR STAPLER FOLDABLE ANVIL

Abstract

Circular stapler has been formed by the main body and by the anvil piece which is settled to the body nowadays. The aim of this study was to increase the security of anastomosis which has done by stapler, was apply easier for decreasing 45 % ratio with the folded mechanism over it by the diameter of anvil. The design procedure began to scan commercially available anvils by using a 3D laser scanner. In this way, design limitations were determined appropriately to the surgical equipment design specifications. Foldable anvils prototyping process covered various rapid prototyping tools such as a 3D printer which uses wax mold material and metal particles. Besides, every step of design procedure was included traditionally used 3D printing technology by a plastic material to update design errors. The reverse engineering (Optic Scanning) and the 3D printing technologies (FDM, SLS, SLA) were successfully applied to design and optimization process of a foldable anvil. The obtained prototype anvil was successfully used in live animal test.

Key Words: Gastro-intestinal surgery, circular staplers, rapid prototyping, 3D scanning

1. Giriş

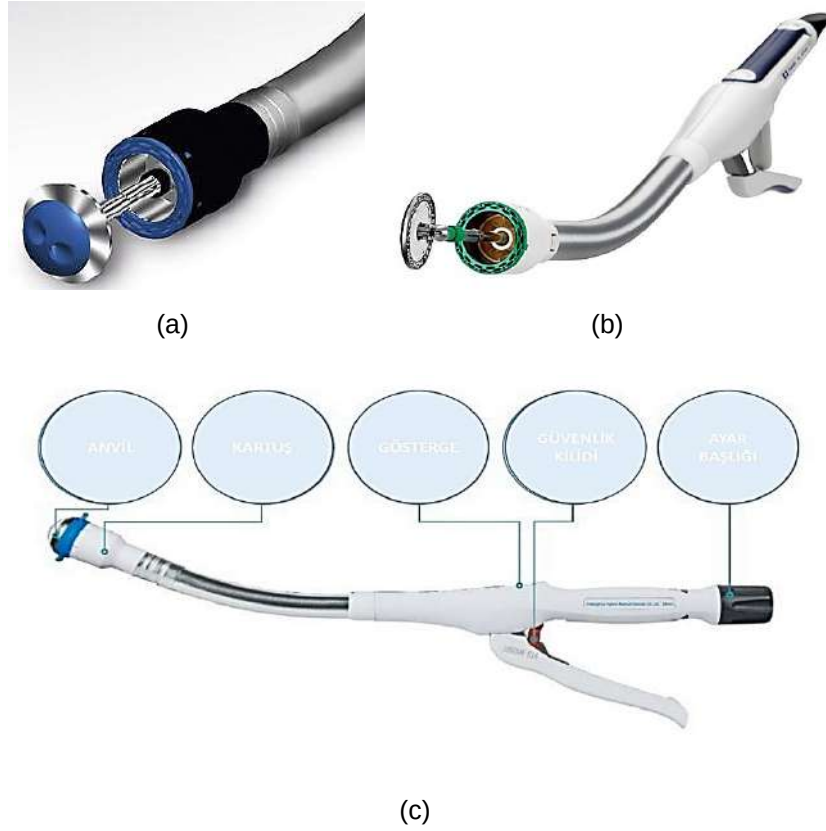
Sirküler stapler kullanımı cerrahi anastomoz işlemini kolaylaştırmasına rağmen özellikle yemek borusu ameliyatlarında anvilin yerleştirilmesi esnasında yemek borusunda hasarlanmaya neden olmakta bunun sonucu da ameliyat sonrası uzun dönemde yemek borusunda darlık gelişmesine neden olmaktadır. Bu darlık yeniden cerrahi girişim gerektirmekte tedavi maliyetini belirgin olarak artırmakta ve komplikasyon oranlarını artırarak hasta hayatını riske sokmaktadır [1].

Anastomoz kaçakları cerrahi operasyonların en ciddi istenmeyen sonuçlarından biridir. Anastomoz kaçak ihtimalini en aza indirmek için anastomoz özellikle yemek borusu ameliyatlarında mukoza, submukoza ve kas tabakasının dahi edilmesi gerekmektedir. Bunun sağlanması için yemek borusunun serbestlenmesi gerekmekte buda ameliyat sonrası %3,3 oranında anastomoz kaçağına ve anastomoz darlığına sebep olmaktadır [2].

Özellikle mide ve yemek borusuna yönelik cerrahi işlemlerden sonra anastomoz için standart sirküler stapler kullanılmakta ve anvil kısmı yemek borusuna yerleştirildikten sonra bu kısmın çevre dikişleri ile büzülmesi gerekmektedir. Bu laparoskopik olarak beceri gerektirmekte veya bu işlem için tasarlanmış özel çevre sütür atıcı aletler kullanılmaktadır [3].

Laparoskopik cerrahide sirküler stapler kullanımı ile yapılan anastomozlarda, anvil yerleştirilmesi (özellikle kalın bağırsak ameliyatlarında) bağırsak batın dışıya alınarak kolay bir şekilde yapılabilir. Ancak mide ve yemek borusu ameliyatlarında batın dışında anvil yerleştirme ihtimali yoktur. Geliştirilmesi planlanan yeni tip katlanabilir anvil ile hem açık hem de laparoskopik cerrahide anvil uyulanımı literatürde örneği olmayan bir şekilde kolayca uygulanabilecektir. Anvil yerleştirildikten sonra bazı durumlarda ikinci kesi yapılarak batın içerisine girilmekte ve çevre sütürü yardımı ile anvil etrafı büzülmektedir [4]. Bu işlemler hem operasyon süresini uzatmakta hem de farklı aletler kullanımı gerektirdiği için operasyon maliyetlerini artırmaktadır.

Sirküler stapler temel olarak anvil parçası ve ana gövdeden oluşmaktadır. Anastomoz operasyonu esnasında anvili longitudinal eksende hareket ettirmeye yarayan ana gövde sayesinde, dikme ve dairesel kesme işlemleri anvil tarafından gerçekleştirilmiş olur (Şekil 1c). Bu işlemleri el ile uygulanmış mekanik kuvveti artırmaya yarayan mekanizması sayesinde anvile ileterek dikme ve kesme işlemini aynı anda tamamlar. Ana gövde üzerinde sabit şekilde bulunan kartuş ise zımba telleri ve dairesel kesme işlemini gerçekleştiren bıçağı barındırmaktadır (Şekil 2b). Anvil ile kartuş arasına sıkıştırılan ve dairesel kesitte dikilecek olan dokular ana gövde üzerinde bulunan tetiğe kuvvet uygulanması sonucu birbirlerine dikilir. Anvil parçası farklı standart ve sabit çaplarda (25mm, 28mm, 30mm, 32mm) ana gövdesi ile birlikte ve tek kullanım şeklinde sağlık sektöründe mevcuttur. Anastomoz operasyonlarında sirküler stapler kullanımında verimliliği artırıcı yönde sektörde seri imal edilen ürünler yetersiz kalmaktadır. Sabit çapta hareketsiz (Şekil 1a) ve sağ yana katlanabilen (Şekil 1b) anvil çeşitleri açık ve kapalı gerçekleştirilen anastomozlarda avantajlarını koruyamamaktadırlar. Hâlihazırda kullanılan sirküler stapler anvilleri ile kıyaslandığında cerrahi açıdan avantajlı olduğuna inandığımız katlanabilir anvil halen sağlık sektöründe geliştirilmekte olan güncel bir konudur.



Şekil 1. Sabit çapa sahip anvil (a) yana katlanabilir anvil (b) sirküler stapler ana gövdesi ve komponentleri (c).

Anvil dairesel olarak dikilecek dokulara düzgün kesme yüzeyi sağlarken aynı zamanda zımba tellerinin istenilen ölçüde bükülmesinden sorumludur. Zımba tellerini bükten cepler anvil üzerinde eşit aralıklarla ve çift hücre olarak toplamda 26 adettir. Bu cepler sirküler staplerin kartuş kısmındaki zımba telleri ile karşılıklı olarak pozisyon almadıkları takdirde zımbalamanın anastomozu riske sokacağı bilinmektedir.

Geleneksel anvillerden farklı olarak kendi üzerine katlanabilen anvili hâlihazırda kullanılmakta olan sirküler stapler ana gövdesine (ve kartuşa) entegre edilebilir yetenekte anvil tasarlayarak seri üretime hazır edecek prototip çalışmaları (fikri ve sınai haklar çerçevesinde) gerçekleştirilmiştir. Kendi üzerine katlanabilir anvil tasarımı olarak kabul edilecek standart anvil çapı 28 mm'dir. Anvil kendi üzerinde katlanabildiği takdirde 10-12 mm mertebesinde katlı pozisyon anvil çapına ulaşılması hedeflenmiştir.

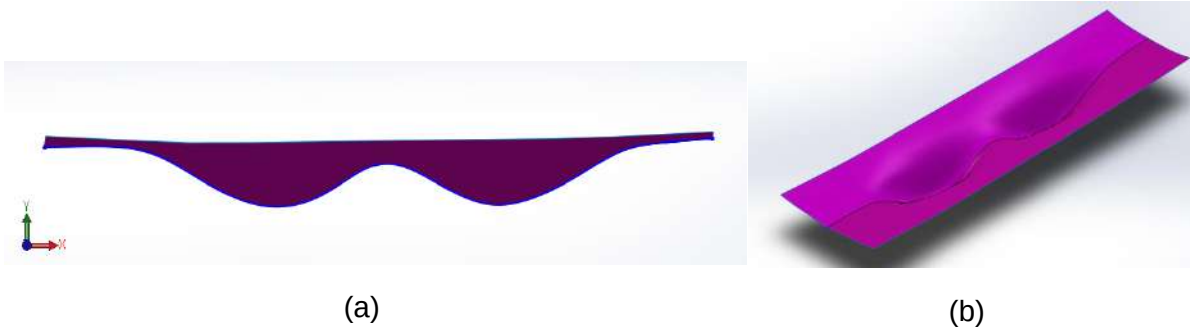
Bu çalışmada, anastomoz operasyonlarında kullanılmak üzere kendi üzerinde katlanabilen iki ve daha fazla sayıda birbiri ile paralel parçalara bölünmüş katlanma mekanizmasına sahip anvilin katlı pozisyon çapında %65 oranında küçültme hedeflenmiştir. Bu sayede açık ve kapalı anastomoz operasyonlarında kullanılan sirküler staplerin etkinliğinde artış olacağına inanılmaktadır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Tersine Mühendislik Uygulamaları

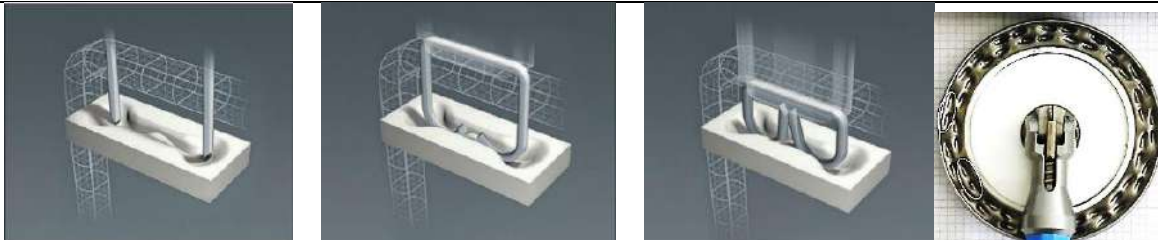
Tersine mühendislik uygulamalarında tercih edilen üç-boyutlu optik tarama teknolojisini kullanıştır. Sektörde ticari olarak bulunan Covidien (Covidien LLC, Mansfield, MA U.S.), DST serisi, 28mm sabit çapta ve 4.8mm zımba teli boyunda anvili referans olarak tasarım çalışmalarımızda kullanılmıştır. Artec Eva optik tarama cihazı ile taraması tamamlanan anvilin nokta bulutunu referans olarak üç-boyutlu katı geometrik modelleme tamamlanmıştır. Lazer tarama ile elde edilen katı model üzerinden detay tasarımda dikkate alınacak zımba yuvası geometrik ölçülerini ve zımbaların hangi aralıkta konumlandırıldığı tespit edilmiştir. (Şekil 2)

Zımba tellerinin doğru açı ile bükülerek dikme işlemini gerçekleştirmesi için zımba yuvasının geometrik ölçüleri yani radius çapı, genişliği, boyu ve derinliği zımba telinin istenilen formu alması açısından önem arz etmektedir. Milimetrenin yüzde biri oranında hata ile tespit edilen bu ölçüleri detay tasarımda kullanarak zımbanın büküleceği yüzeyler modellenmiştir.



Şekil 2. Zımba yüzeyi formu katı modeli. Kesit görünüş (a) izometrik görünüş (b).

Zımbalama esnasında zımba tellerinin U formundan B formuna geçişinde kılavuzluk yapan zımba yuvalarını modelleyerek tasarım çalışmalarımıza dâhil edildi (Şekil 3). Zımba tellerinin istenilen geometride kıvrılarak ayırık iki dokuyu dairesel olarak zımbalaması anastomoz güvenliği açısından oldukça önemlidir. Lazer tarama datalarını dikkate alarak modellenen zımba kılavuzu sayısı numune olarak kullanılan 28mm çapındaki anvil yüzeyinden tespit ederek tasarım çalışmalarında kullanılmıştır (Şekil 3). Zımba kılavuzunun düzgün olmayan geometrisi nedeniyle hâlihazırda imal edilemeyeceğini düşünerek tasarım üzerinde gerekli modifikasyonlar yapılmıştır. Zımba telinin açık ve kapalı ölçüleri Covidien DST serisi 4,8 mm olarak seçildi ve literatürdeki çalışmalar doğrultusunda tasarlanmıştır [5].



Şekil 3. Zımba telinin U formundan zımba yuvası içinde bükülmesi sonucu B formuna dönüşünün illüstrasyonu [5].

2.2. Tasarım ve Optimizasyon Çalışmaları

2.2.1. Geometrik Optimizasyon Çalışmaları

Bu aşamada tasarım taslağı üzerinde, değişken ölçüler belirlenerek katlanmış pozisyon anvil çapı ile ilişkilendirilmiştir. Detay tasarım çalışmalarından bir önceki kilometre taşı olarak nitelediğimiz bölüntüleme açısı, menteşe yüksekliği ve orta parça genişliği gibi tasarımın başında belirlenen parametreler, bölüntüleme açısının optimum değerini tespit etmede kullanılmıştır. Değişkenlere atanacak değer aralıkları belirlenmiş ve her bir değişkenin aldığı değer sonucunda anvil çapındaki küçülme oranı SolidWorks ve MS Excel birlikte kullanılarak hesaplanmıştır. Detay tasarımda kullanılacak değerler menteşe dönme eksen yüksekliği sabit tutularak orta parça genişliği ve artan açı değeri altında final çapındaki yüzde küçülme oranları tespit edilmiştir. Projenin başarı ölçütü katlı pozisyon anvil çapının sabit 28 mm çapa oranla %65 azaltılmasıdır. Tasarım çalışmalarında katlı pozisyon anvil çapının minimum değeri 15.5 mm'ye düşürülerek çapta %45 oranında küçülme elde edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Üç parçalı katlanabilir anvil detay tasarımı

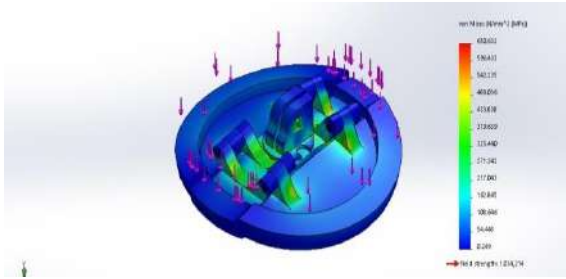
Şaft parçasının 85 derecelik dönme hareketini engellemeyecek şekilde tasarladığımız katlanabilir anvil için SolidWorks katı modelleme yazılımını kullanarak hareket analizleri yapılmıştır. Katlı pozisyon anvil çapını doğrudan etkileyen en önemli parametre kanatların birbirleri üzerine katlanmaları ve katlı pozisyonda şaft parçasına dayandığı konfigürasyon tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak katlanma mekanizması; menteşelerin düzgün çalışması ve şaft parçasının dönme hareketi ile ilişkisi katı model ortamında modellenmiştir. (Şekil 5).



Şekil 5. Şaft hareketi ve katlanma hareketlerinin uyum içerisinde gerçekleşmesi

2.2.2. Sonlu Elemanlar (SE) Analizi

Detay tasarımı tamamlanan katlanabilir anvil sonlu elemanlar metodu kullanılarak prototip ve test çalışmaları öncesinde statik yükler altında yapısal analizini gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizin gerçek çalışma şartlarını sağlayabilmesi için basma testinden elde edilen maksimumum yük değeri ve XRF malzeme analizi ile tespit edilen malzemelerin malzeme elastik verileri ANSYS Mechanic analiz yazılımına sınır şartı olarak girildi ve hesaplamalar çözdürülmüştür. Analiz sonuçları neticesinde malzeme tespiti ve menteşe kalınlığını optimize ederek prototip öncesi tasarım çalışmaları tamamlanmıştır. Yapısal statik analiz sonuçları neticesinde özellikle orta parça üzerinde keskin kenarlarda stress yığılması tespit edilmiştir. Yapılan modifikasyonla detay tasarım güncellenerek prototip çalışmalarına geçilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Statik yükleme altındaki anvil üzerinde oluşan stress dağılımı ve modifiye edilmiş tasarım.

3. 3D printer ile Prototip Çalışmaları

3.1. İmalat Yöntemlerinin Belirlenmesi

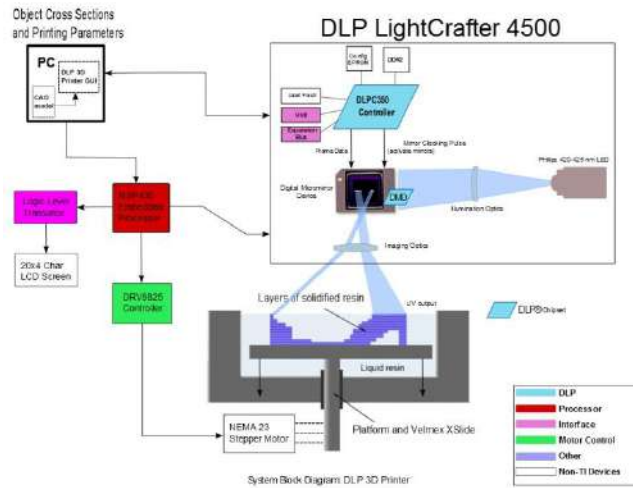
Patent çalışmaları kapsamında halihazırda tamamlanmış öncül 6 kat büyütülmüş prototip (ABS, sert plastik) ile başlayan tasarım çalışmaları geliştirilerek yerli imalata uygun anvil tasarlanmıştır. Tasarımın düşük maliyet ile gerçeğe en yakın şekliyle test edilip güncellenebilmesi için prototipleme çalışmalarında öncelik olarak SLS üç-boyutlu baskı teknolojisi tercih edilmiştir. SLS teknolojisinde toz halinde bulunan metalik malzeme nümerik kontrollü bir sistme ile hareket eden lazer ışınıyla taranır. Taranan bölgelerdeki malzeme sinterlenerek veya eriyerek birbirine kaynaşır ve parçanın ilk katmanı oluşur. İkinci toz katmanı ilkinin üzerine sıvanır ve sinterleme işlemi sırasıyla devam ederek parçanın üretilmesi sağlanır. Katmanlar tamamlandıktan sonra parça toz havuzundan çıkarılır. Bu teknolojiye destek yapısı kullanılmaz.

Katlanabilir anvilin prototip çalışmaları beş parçalı tasarımın 3-boyutlu yazıcıda toz sinterleme yöntemi kullanılarak imal edilmesi ile başlamıştır. Paslanmaz çelik tozlarının 3-boyutlu yazıcı ile GATA-METUM Medikal Araştırma ve Üretim Merkezi bünyesinde bulunan (SLS) üç-boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Bu yöntem toz partikülü şeklindeki metal parçacıkların katmanlar halinde 3-boyutlu yazıda basıldıktan sonra sinterlenerek imal edilmesi işlemelerini kapsamaktadır. Katlanabilir anvil milimetre mertebesinde hassasiyet gerektirdiğinden ve tasarlanan menteşelilerin girinti-çıkıntıları nispeten küçük olduğundan diğer imalat yöntemlerinden önce toz metalürjisi yöntemi denenmiştir. Fakat bu yöntemle elde edilen prototip gerekli yüzey hassasiyetini karşılamayıp, uygulanan mekanik yüklere dayanımı yeterli düzeyde olmadığından prototip çalışmalarında farklı bir imalat yöntemi arayışına gidilmesine yönlendirmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. SLS 3D printer ile üretilen 5 parçalı katlanabilir anvil

Metal tozların sinterlemesi yöntemi kullanılarak imal edilen ilk örnek üzerinde kanat sayısı ve malzeme açısından katlanabilir anvilin stabil olmadığı görülerek beş kanatlı tasarım üç kanatlı olarak değiştirildi. Bununla beraber ikinci prototip için hassas döküm imalat yöntemi denendi. Hassas döküm yönteminin uygulanması için mum modellerin 3-boyutlu yazıcı ile oluşturulması, oluşturulan mum modellerin seramik ile kaplanması ve seramik boşluk kalıp içerisine ergimiş metalin dökülmesini kapsamaktadır. Mum modeller için kuyumculuk sektöründe imalat yapan firmalardan destek alınarak hassas mum modeller elde edilmiştir. Ardından mum modeller döküm firmalarıyla görüşülerek hassas dökümde kullanılmış ve nihai prototip elde edilmiştir. Mum modeller DLP teknolojisine sahip üç-boyutlu Neonnix marka yazıcı kullanılarak basılmıştır. DLP teknolojisinde temel prensip ışığın çok sayıda ayna tarafından yansıtılarak kırılmasına dayanmaktadır (Şekil 8). Bu yöntemle elde edilen mum model ve dökülen hassas döküm prototipi Şekil 9 da veilmiştir.



Şekil 8. DLP teknolojisi çalışma prensibi şematik görünüm (<http://www.ti.com/tool/TIDA>)



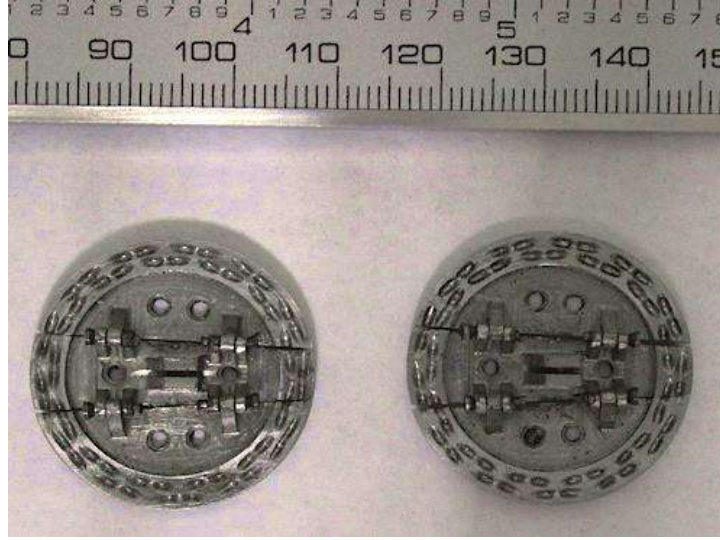
(a) Mum Model



(b) HassasDökülmüş Anvil

Şekil 9. (a) Hassas döküm için 3B yazıcıda basılmış mum model, (b) hassas döküm yöntemi ile imal edilmiş prototip.

Her ne kadar mum model tasarımı kusursuz bir şekilde temsil etse de hassas paslanmaz çelik döküm ile elde edilen prototiplerin boşluklar ve kusurlar ihtiva ettiği çok iyi bir polisaj ve yan delikler için extra talaşlı imalat gerektirdiği anlaşılmıştır. Talaşlı imalat yardımı ile çalışan ön prototipler elde edilmiştir (Şekil 10).Talaşlı imalat ile katlanabilir anvilin her bir kanadı ayrı ayrı dik CNC işleme merkezinde gerekli yüzey hassasiyetini sağlayacak takımlarla işlenerek elde edilmiştir. Talaşlı imalat yöntemi kullanılarak imal edilmiş prototiplerin mekanik testleri neticesinde zımbaları bükmeye yarayan zımba yuvalarının eksenlerinde kaçıklık olduğu görülmüş ve gerekli düzeltmeler yapılarak canlı hayvan deneylerinde kullanılmak üzere yeterli miktarda üç parçalı katlanabilir anvil üretilmiştir. Zımba yuvaları ve menteşe üzerindeki pim deliklerinin gerekli hassasiyeti karşıladığı görülmüştür. Seri imalat öncesi prototip çalışmalarından elde edilen sonuçtan hareketle talaşlı imalat yönteminin katlanabilir anvil için en uygun imalat yöntemi olduğu görülmüştür.

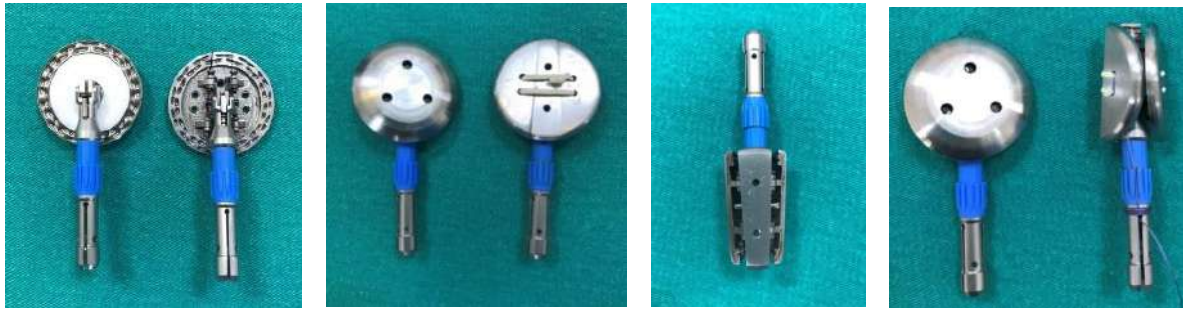


Şekil 10. Talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiş katlanabilir anvil.

3.2. Mekanik Test Uygulamaları

Çeşitli imalat yöntemi denemelerinden sonra nihai ürün niteliği taşıyan katlanabilir anvilin talaşlı imalat yöntemi ile üretilmesine karar verdikten sonra mekanik test uygulamaları ve canlı hayvan deneylerinde kullanılmak üzere toplamda 3 takım katlanabilir anvil imal edilmiştir. Sirküler staplerin kartuş parçası ve anvile bağlanan şaft parçasına doğrudan entegre edilmesiyle zımba tellerinin istenilen şekilde bükülerek dikme işleminin gerçekleşmesini test edildi. Mekanik testlerde kullanılan zımba tellerinin piyasada sirküler stapler tabancasından ayrı bir ürün olarak bulunmamasından dolayı testlerde kullandığımız telleri tel bükme aparatı yardımı ile U şeklinde bükerek mekanik testleri gerçekleştirilmiştir.

Mekanik test uygulamalarından elde edilen sonuçlarla tasarımı güncelleyerek 3 takım katlanabilir anvil imal edildi. Covidien 28 mm sirküler stapler ana gövdesine direkt olarak entegre edilip kullanılabilen katlanabilir anvil seri imalata hazır hale getirildi. Operasyon esnasında katlı pozisyonda dairesel kesilip zımbalanacak dokuya yerleştirildikten sonra açılarak zımbalama ve kesme işlemleri için düz bir yüzey oluşturan anvil, bu işlemleri sütür yardımı ile yaparak operasyon zamanını ciddi ölçüde azaltmaktadır. Sonraki aşamada nihai ürün canlı hayvan deneyleri ile test edilerek proje sonlandırılmıştır. Katlanabilir anvilin standart 28 mm çapa sahip anvil ile karşılaştırması için şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Sabit çapa sahip Covidien anvil ile üç parçalı katlanabilir anvil. Sütür yardımı ile katlı pozisyonu sağlanmış anvil.

4. Sonuçlar

Tersine mühendislik ve 3d printer teknolojisi kullanılarak katlanabilir anvilin tasarımı prototip üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen Tasarım FLD tekniği ile 6X boyutunda ön prototip olarak imal edilmiş ve inceleme ve gerekli revizyonlar yapılmıştır. Toz metal sinterleme (SLS) ile elde edilen parçaların ana gövdelerinin bir polisaj işlemiyle rahatlıkla kullanılabileceği görülmüş fakat zımba yuvalarının 0.3 mm gibi genişlik ihtiva ettiğinden bu bölgelerin extra işlemeye ihtiyaç duyduğu gözlenmiştir. DLP tekniği ile elde edilen mum modellerin katı modeli kusursuz bir şekilde temsil ettiği 0.25 mm lik aralıkların ve 0.3 mm genişliğinde eğrisel yüzeyli boşlukların başarıyla modele aktarıldığı görülmüştür. DLP ile Elde edilen mum modelin seramik kaplama ve hassas döküm adımları başarıyla tamamlanmış ve mum model döküme kolaylıkla hazırlanmıştır. Her ne kadar mum model tasarımı kusursuz bir şekilde temsil etse de hassas paslanmaz çelik döküm ile elde edilen prototipler talaşlı imalat ile ancak kullanılabılır olduğu anlaşılmıştır. Talaşlı imalat yardımı ile çalışan ön prototipler elde edilmiştir. Gerçekleştirilen tasarım ve prototip çalışmaları ile istenilen düzeyde katlanabilir anvil seri imalata uygun üretilmiştir. Böylelikle laparoskopik cerrahilerde 28 mm lik bir kesi açmak yerine 15 mm lik bir kesiden, katlanabilir anvil yerleştirilebilecek olup daha hastanın iyileşme süreci kısılacaktır. Canlı hayvan deneylerinde elde edilen veriler son derece başarılı kabul edilmiştir. Tasarlanan anvil için patent başvurusu kabul edilmiş olup ulusal ve ulusları olarak patentlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu bildiri TUBITAK tarafından 1005 Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı SBAG 115S235 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1]. Chekan E1, Whelan RL2. Surgical stapling device-tissue interactions: what surgeons need to know to improve patient outcomes. Med Devices (Auckl). 2014 Sep 12;7:305-18. doi: 10.2147/MDER.S67338. eCollection 2014.
- [2]. Cuk V1, Atanasijević T, Ignjatović D, Ignjatović M. Comparative analysis of sutured and stapled colorectal anastomoses. Vojnosanit Pregl. 1994 Nov-Dec;51(6):492-5.
- [3]. M. G. Sarr, Y. Fong, & M. Miyazaki (Eds.), Atlas of Upper Gastrointestinal and Hepato-Pancreato-Biliary Surgery (pp. 25–28). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [4]. Najah H1, Chéreau N1, Menegaux F1, Trésallet C2. Circular stapling for Roux-en-Y esophagojejunal anastomosis using a transorally-inserted anvil. J Visc Surg. 2015 Dec;152(6):379-83.
- [5]. Nováček V1, Tran TN, Klinge U, Tolba RH, Staat M, Bronson DG, Miesse AM, Whiffen J, Turquier F. Finite element modelling of stapled colorectal end-to-end anastomosis: advantages of variable height stapler design. J Biomech. 2012 Oct 11;45(15):2693-7.
- [6]. Hench LL1, Polak JM. Third-generation biomedical materials. Science. 2002 Feb 8;295(5557):1014-7.
- [7]. Hin, T. S. Engineering Materials for Biomedical Applications. Biomaterials Engineering and Processing. World Scientific Publishing Co. (2004).
- [8]. McGuire, J. Contributions to the Design of Circular Surgical Staplers for Minimally Invasive Therapy. Loughborough University. (1999).
- [9]. Kisli E1, Ozdemir H, Kösem M, Sürer H, Ciftçi A, Kanter M. Effect of Ginkgo biloba extract (EGb 761) on the healing of left colonic anastomoses in rat. World J Surg. 2007 Aug;31(8):1652-7.
- [10]. Switzer BR, Summer GK. Improved method for hydroxyproline analysis in tissue hydrolyzates. Anal Biochem. 1971 Feb;39(2):487-91.
- [11]. Covidien. "DST Series™ EEA™ circular stapler". Product Brochure. <http://www.medtronic.com/content/dam/covidien/library/us/en/product/surgical-stapling/dst-series-eea-staplers-orvil-devices-brochure.pdf> (ET:1Ekim2016)

Kemik Doku Mühendisliği Uygulamalarında Kullanılabilecek Doğal Polimer-Seramik Temelli Kompozit Biyo Mürekkebin 3B Biyo-Basımı

¹L. Aydın, ²N. Demirkol, ³H. Kenar

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği ABD, Kocaeli Üniversitesi, 41380, Türkiye

²Değirmendere Ali Özbay MYO, Teknik Programlar, Seramik Cam ve Çinicilik Programı, Kocaeli Üniversitesi, 41950, Türkiye

³DeneySEL ve Klinik Araştırmalar Merkezi, Tıp Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, 41380, Türkiye

¹146162002@kocaeli.edu.tr, ²nermin.demirkol@kocaeli.edu.tr, ³halime.kenar@kocaeli.edu.tr

Özet

Kemik doku yenilenebilir olmasına rağmen büyük kemik defektleri tam bir iyileşme için ek işlemler gerektirmektedir. Genellikle otogreft ve allogreftler yaygın bir şekilde tedavi amaçlı kullanılmaktadır. Polimer kompozitler (genellikle trikalsiyum fosfat, hidroksiapatit, polikaprolakton, polilaktik asit ve nişasta temelli) de ayrıca kemik doku replasman malzemeleri olarak çalışılmaktadır. Biyomalzeme özellikleri ve hücreSEL yanıtlar da hastaya özgü geometride bir yapının oluşturulması kadar önemlidir. Günümüzde katkılı üretim teknolojileri hemen hemen her şeyin sayısal fabrikasyonunda kullanılmaktadır. Özellikle doku mühendisliğinde biyo-basım ile 3B işlevSEL doku yapıları elde edilebilmektedir. Biyo-basım esnasında canlı hücreler doğrudan hidrojel biyo mürekkepler ya da diğer biyomalzemeler ile birlikte kullanılarak konumlandırılır. Bu çalışmada amaç, 3B işlevSEL kemik doku iskelelerinin eldesi için doğal polimer-seramik kompozit biyo mürekkep geliştirilmesi ve biyo-basım parametrelerinin optimizasyonunun gerçekleştirilmesidir. Hücre kültürü besiyeri, gliserol, jelatin, aljinat ve cam katkılı hidroksiapatit farklı oranlarda karıştırılarak biyo basılabilirliğe uygun hale getirilmiştir. Sıcaklık, pH, filtrasyon ve kimyasal katalizör madde eklenilmesinin biyo basılabilirliğe etkileri değerlendirilmiştir. 3B iskelelerin biyoyumluluğu adipoz doku kaynaklı kök hücreler kullanılarak laboratuvar koşullarında incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B Biyo-Basım, Kompozit Biyo Mürekkep, Kemik Doku Mühendisliği

3D Bioprinting of a Natural Polymer-Ceramic based composite Bio-Ink for Bone Tissue Engineering Applications

¹Levent Aydın, ²Nermin Demirkol, ³Halime Kenar

¹Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Biomedical Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey

²Ceramic,Glass&Tile Prog., Vocational School of Degirmendere Ali Ozbay, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey

³Experimental and Clinical Research Center, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey.

Abstract

Despite the bone tissue's healing ability, large-scale bone defects require additional processes for complete restoration. In general, autografts or allografts are widely used during their treatment. Polymer composites (generally based on tricalcium phosphate, hydroxyapatite, polycaprolactone, poly-L-lactic acid and starch) are also studied as bone replacement materials. Biomaterial characteristics and cellular response are as important as obtaining the final construct in a patient-specific geometry. Nowadays additive manufacturing technologies are applied for digitized fabrication of almost everything. Especially in tissue engineering, functional three-dimensional (3D) tissue constructs can be obtained by means of bioprinting. Living cells can be directly incorporated in the hydrogel bio-inks or can be positioned among other biomaterials during bioprin-

ting. The aim of this study was development of a natural polymer-ceramic based bio-ink and optimization of its bioprinting parameters to obtain 3D scaffolds for bone tissue engineering applications. Cell culture medium, glycerol, gelatin, alginate and glass reinforced hydroxyapatite were blended in different amounts to obtain the composite most suitable for printing. Effects of temperature, pH, filtering and use of chemical catalysts on printability of the bio-inks were evaluated. Biocompatibility of the 3D printed scaffolds was studied in vitro with human adipose tissue derived stem cells.

Keywords: 3D Bioprinting, Composite Bio-Ink, Bone Tissue Engineering

MR GÖRÜNTÜLERİNDEN BEYİN DAMARININ MODELLENMESİ VE 3 BOYUTLU BASKISI

Mustafa Kürşat ERBAŞ^a, Gözde Rabia AKTAŞ^b, Sevdâ ŞANVER^c, Eylül DEMİR^d, İhsan TOKTAŞ^e, Oktay ALGIN^f, Hakan OFLAZ^g

a,b, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara/TÜRKİYE,

E-posta: kursaterbas@gmail.com, gozderabia06@gmail.com, sevdasanver@hotmail.com

d,e, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara/ TÜRKİYE,

E-posta: edemir@ybu.edu.tr, itoktas@ybu.edu.tr,

f, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Atatürk Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Radyoloji Kliniği, Ankara/TÜRKİYE,

E-posta: droktayalgin@gmail.com

g, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İzmir/ TÜRKİYE,

E-posta: hakanoflaz@gmail.com

Özet

Tasarımcılar ve mühendisler tasarım sürecini hızlandırmak, ürün tasarımı yapmak ve konsept geliştirmek için eklemeli üretim teknolojilerini kullanmaktadırlar. Tasarımda serbestlik, ucuz maliyetle karmaşık tasarımların elde edilmesi, takım, fişstür ve soğutucu gibi ihtiyaçların ortadan kalkması, minimum israf, çevre dostu olması ve klasik imalat yöntemlerinin bir çok aşamasına gerek duyulmadan tek seferde nihai ürün elde edilmesi en önemli avantajlarındandır.

Beyin damarının 3B modeli yumuşak doku görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılan MR (Magnetic Resonance) görüntülerinden Mimics 17.0 programında çıkarılmış ve 3B baskı makinesinde baskısı yapılmıştır. Bu model operasyon öncesi ve sonrasında cerrahlara beyin damarının karmaşık anatomik yapısını anlamamanın yanı sıra, yer tespiti oldukça zor yapılan beyin tümörleri üzerine çalışma yapmak ve tedavi yöntemi üretmek açısından da büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda tıp ve sağlık bilimleri alanındaki laboratuvar uygulamalarında da, öğrenciye görsel birebir gerçek bir hastadan alınmış modelde anatomiye kolay kavrama ve uygun tedavi stratejisi geliştirme imkânı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Manyetik rezonans görüntüleme, anatomik yapıların modellenmesi, beyin damarı, 3 boyutlu baskı.

MODELING OF BRAIN VESSEL FROM MR IMAGES AND 3D PRINTING

Mustafa Kürşat ERBAŞ^a, Gözde Rabia AKTAŞ^b, Sevdâ ŞANVER^c, Eylül DEMİR^d, İhsan TOKTAŞ^e, Oktay ALGIN^f, Hakan OFLAZ^g

a,b, Yıldırım Beyazıt University, Institute of Natural and Applied Sciences, Ankara/TÜRKİYE,

E-mail: kursaterbas@gmail.com, gozderabia06@gmail.com, sevdasanver@hotmail.com

d,e, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Mechanical Engineering Department, Ankara/ TÜRKİYE,

E-mail: edemir@ybu.edu.tr, itoktas@ybu.edu.tr,

f, Yıldırım Beyazıt University, Ankara Atatürk Training and Research Hospital, Radiology Clinic, Ankara/TÜRKİYE,

E-mail: droktayalgin@gmail.com

g, İzmir Katip Çelebi University, Faculty Of Engineering And Architecture, Biomedical Engineering Department, İzmir/ TÜRKİYE,

E-mail: hakanoflaz@gmail.com

Abstract

Designers and engineers use additive manufacturing technology to accelerate the design process, to make designs of products and to develop concepts. Freedom in design, obtaining the complicated parts with cheapest cost, not needed for the tools, fixtures and coolants, minimum waste, being environment friendly and getting the final product at one time without using a number of steps of the traditional manufacturing methods are the most important advantages.

The 3D model of the brain vessel was exported from Mimics software by processing of MR (Magnetic Resonance) images which is commonly used in soft tissue imaging and was printed in a 3D printing machine. This

model is really important not only to make the surgeons understand the complex anatomic structure of the cerebral vessel but also to study and produce treatment methods for brain tumors, which are difficult to locate, before and after the operation. At the same time, in laboratory applications in the field of medicine and health sciences, the students has the opportunity to examine the anatomy easily and to develop appropriate treatment strategy in the model which is taken from an actual patient anatomy.

Key words: Magnetic resonance imaging, modeling of anatomical structures, brain vessel, 3D printing.

1. Introduction

The brain is the body's control center and it controls all functions such as creativity, intelligence, emotion, memory of the body [1]. Brain tumours are one of the most critical diseases of which the treatment is critical for doctors and patients as well [2]. In the field of medicine, doctors can not have an exact information about brain, brain diseases and their treatments, therefore visual modelling and imagining are really important before and after diagnosis. Three dimensional (3D) printing technology is an evolving area and provides manufacturing of body parts from computer models. The application of 3D printing technologies provides Rapid Prototyping (RP) and high efficiency in comparison to the conventional manufacturing techniques. Systems, materials and parts service of Rapid Prototyping and Manufacturing decrease the designing products' time and expenditure. Also it makes direct and indirect manufacturing easy by forming actual pieces directly from digital input, reaching plastic and metal parts and finished assemblies' largest present range. 3D Printing, known as 3D Modelling as well, takes digital input data and then makes a solid body layer by layer. Because it has affordable to have and easy-to-use, 3D Printing is preferred to expedite the designing progress and decrease the time for marketing by different fields such as designers, engineers etc. 3D printing has become reachable for different scale business over time. Nowadays, rapid prototyping is one of the outstanding way and 3D Printers have a big potential in production area. The using of this technology reaches from jewel to automotive. It also uses in architecture, aerospace, dental and medical industries [3]. This study aims to create a 3D printing model of brain vessels from 2D MRI images. This model provides visual presentation for learning the real structure of brain for doctors and trainings of medicine students. Also it can be used for diagnosis before and after operations, therefore doctors can put forward the ideas about the location of tumors.

2. Material and Method

2.1 Magnetic Resonance Imaging (MRI)

A representation of a patient's anatomy are generated by using medical imaging techniques such as Magnetic Resonance Imaging (MRI) and Computerized Tomography (CT). MRI is utilized to image physiological processes of the body in both health and illness. MRI uses a strong magnetic fields, field gradients and pulsing radio waves (Radio Frequency or RF). Datas taken by MRI are constructed as two dimensional images. Black areas of images represent void of water because of that it does not create any image data.

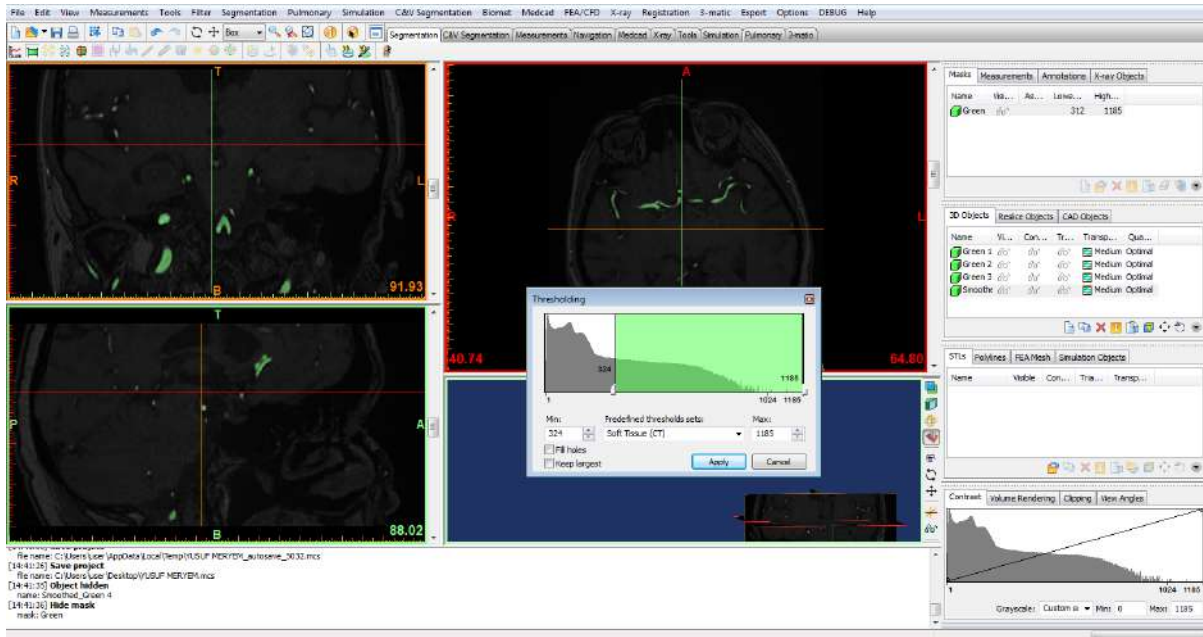
Advantages of MRI;

- Having a Magnetic Resonance scan can be a best option for imaging soft tissue.
- MRI does not utilize ionizing radiation therefore, it is more preferable from CT in children and people who are in need of multiple-imaging examinations. MRI has a greater range of present soft tissue contrast, much more sensitive.
- MRI can be practiced in any imaging plane without moving the patient as physically.
- MRI agents have a significant smaller risk for leading to potential lethal allergic reaction.

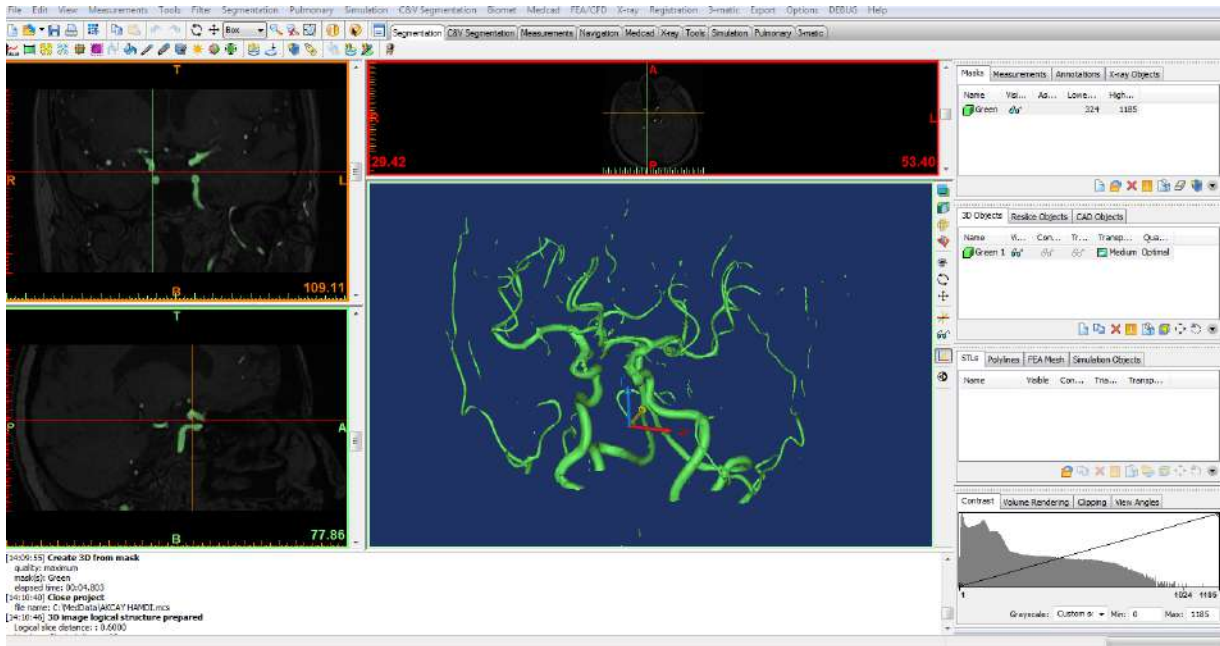
In this project, 3D brain vessels model are created from 2D MR images. Firstly, MR images are imported in DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) format into the software called as Leonardo, Siemens, Germany. In this software, some unwanted parts are deleted in 3D using the *volume rendering technique* in order to obtain good and clear mask in MIMICS, and subsequently exported as DICOM again.

2.2 3D Reconstruction in MIMICS

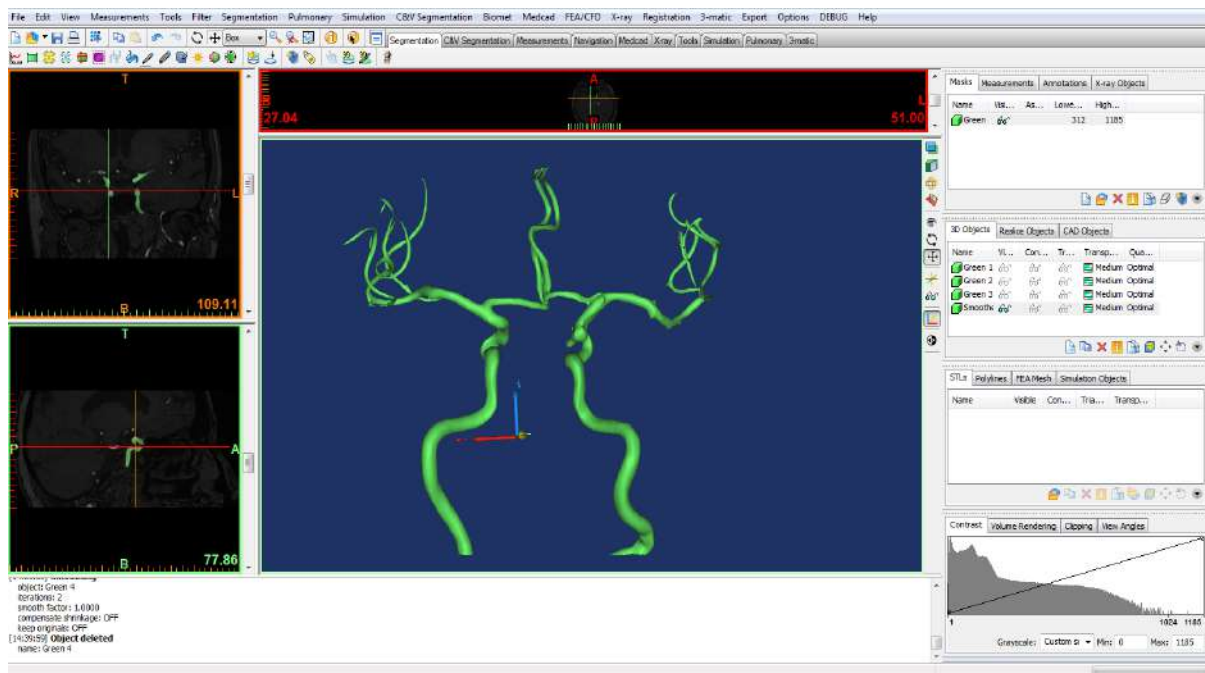
Materialise's Interactive Medical Image Control System (MIMICS) is used for processing of medical images and constructing of 3D models [4]. Also, MIMICS is a software that performs the segmentation of the anatomy through complicated three dimensional images and editing tools [4]. MIMICS uses two dimensional medical images such as MRI and CT to create three dimensional models. MIMICS has many of the segmentation tools which are common in image processing. MIMICS is user-friendly and has a unique 3D editing tool, has powerful tools to analyze data. There are mostly engineers and clinicians among the users of this program. Modules and tools within the software have been designed for needs and requests of them. It is also used in other industries including tissue engineering, anthropology, technical/industrial design, and pulmonary study. Before performing segmentation of the anatomy, the data is loaded into MIMICS by a front-end data input software, MRI-convert. This software translates the data from the MRI scanner into MRI-Modeller's own data format. The image is processed by use of threshold value to differentiate regions of interest. The brain vessel can be separated from soft tissue by setting a fixed threshold value. Typically, algorithms evaluate neighboring voxels to determine whether the differences in their intensities are within specific threshold values. An area of interest is selected by defining sets of voxels whose intensity is above the selected thresholds. Cutting of the 'unnecessary' parts or unwanted noise is achieved with sophisticated dimensional selection and editing tools [5]. 2D images are imported into MIMICS 17.0 in DICOM format. After calculating the soft tissue with thresholding command (Fig. 1(a)), 3D mask is created (Fig. 1(b)). Some corrections of unwanted tissue adhesions or irregularities, also deleting unwanted parts are made by using *edit masks* and *edit masks in 3D* tools. When favourable 3D brain vessel model is obtained (Figure 1(c)).



(a)



(b)



(c)

Figure 1. (a) Thresholding process (b) Creating 3D mask (c) Brain vessel edited

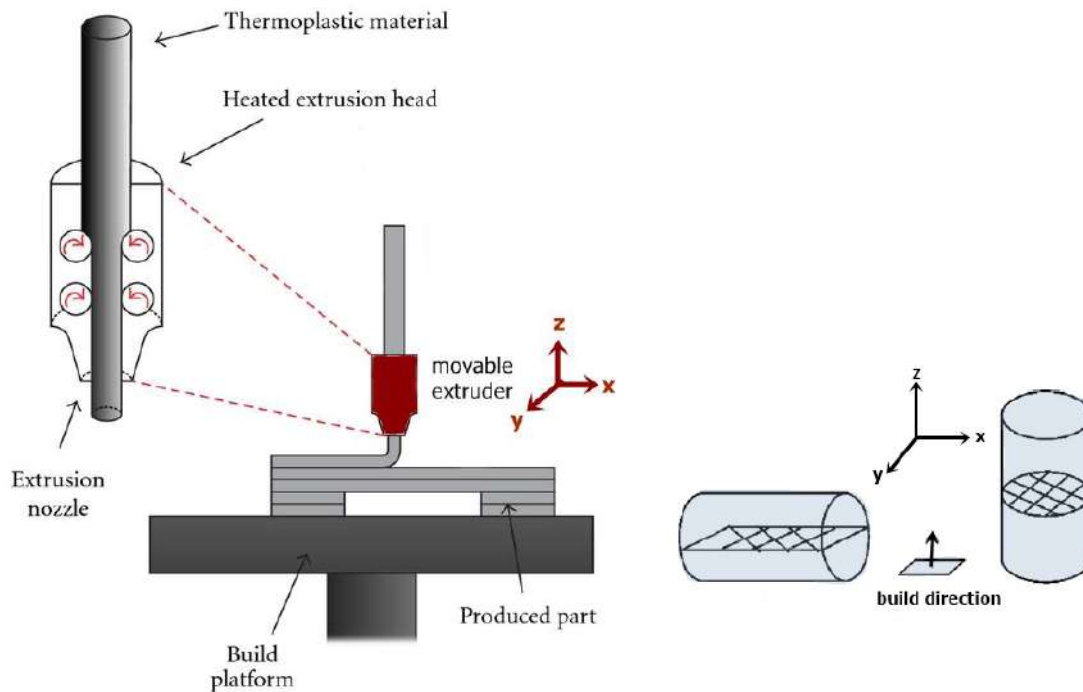
2.3 3D Printing of Brain Vessel

After processing of 2D images in MIMICS, 3D model in standard STL format is exported. Any CAD software can also be used to manipulate STL file. For RP printing, models need to move into zero axis of system [6]. Printing parameters including support shown in Table 1 are determined. Finally, the file is saved in G-CODE format before being sent to the printer.

Table 1. 3D Printing properties

Parameters	Values/types
Nozzle diameter	0,40 mm
Primary layer height	0,20 mm
Outline/perimeter shells	3
Infill Density (Percentage)	%20
Internal fill pattern	Grid
Support Placement	Touching Buildplate
Support Overhang Angle	45°
Support Pattern	Lines
Support Density (Percentage)	%15
Temperature of primary extruder	215°
Bed temperature	60°
Shell (Wall Thickness)	0,80 mm
Shell (Top/Bottom Thickness)	0,80 mm

The printing process is carried out with Ultimaker 2+ Extended printing machine. This printing machine uses the Fused Deposition Modelling (FDM) method to print that FDM is an RP technique that creates the 3D model by depositing layers of thermoplastic material [7]. In this method, material passes through a heated nozzle that makes the material as semi-melted and solidifies on the surface. The extruder head moves around x-y plane and it moves upwards in the z plane to make the another layer (Figure 2).

**Figure 2.** Schematic presentation of FDM principle

After process is complete, the part is removed from the machine. In Figure 3, it is seen appearance of the brain vessel with supporter and cleaning state of brain vessel without supporter of which material is PLA (Polylactic Acid) thermoplastic. This part has complex shape because of this it has many of support. This support is moved away from model for having true model with using some equipment such as craft knife.

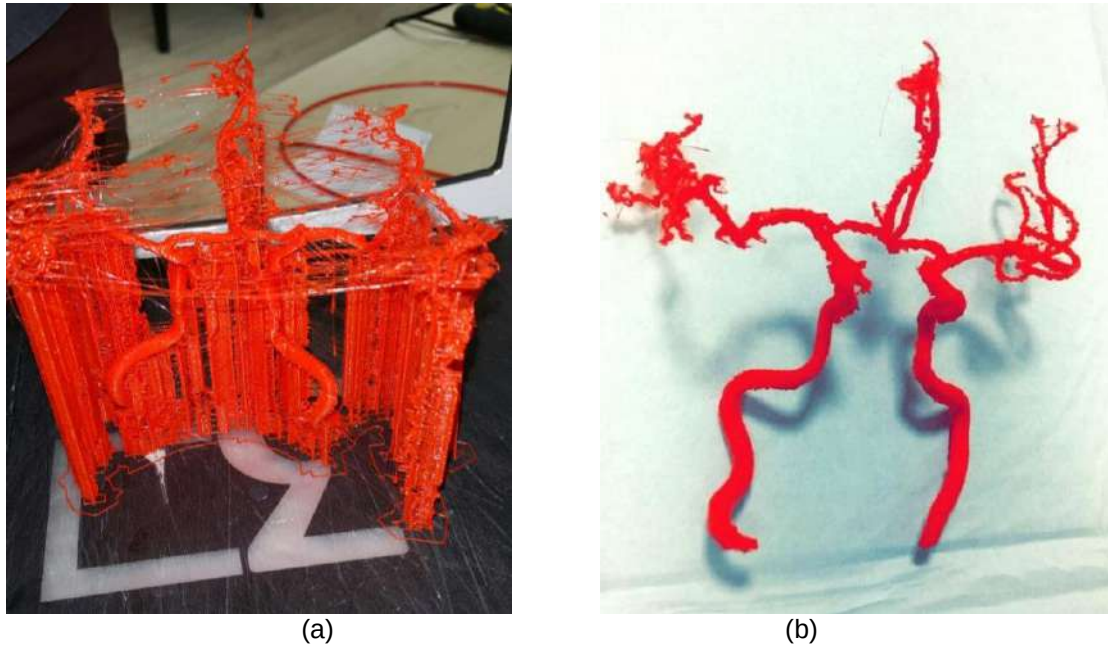


Figure 3. a) Brain vessel with supporter, b) Cleaning state of brain vessel without supporter

3. Conclusions

In this study, 3D modeling of brain vessel are obtained by medical image processing program called as Siemens Leonardo Workstation MRI. MR images are used for creation of brain vessel. 3D printing method provides to save of time, cheap and high quality models of human body parts for the purposes of trainings and help for medical applications. In this study, brain vessels model is tried to print as similar as the real anatomical structure. It is especially aimed to help doctors before and after surgery in the matter of brain diseases. It is also thought that contribution the abilities of solving problems of the students and to provide opportunity to the students in their laboratory experiments are important.

References

1. <https://www.mayfieldclinic.com/PDF/PE-AnatBrain.pdf>
2. The Attention System Of The Human Brain, Steven E. Petersen, Michael L Posner, Annu Rev Neurosci.; 35: 73–89, 2012.
3. Iancu, C., Iancu, D., Stăncioiu, A., From Cad Model To 3d Print Via “Stl” File Format, Fiability & Durability / Fiabilitate si Durabilitate; Issue 1, p73, 2010.
4. Ventola, C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. Pharmacy & Therapeutics, vol. 39, no 10, pp. 704-11, 2014.
5. Carcedo M.G., Anthropometric Characterization of Human Subjects, Master’s Thesis, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2010:53.
6. Baradeswaran A., Joshua Selvakumar L. and Padma Priya R., Reconstruction of Images into 3D Models using CAD Techniques, European Journal of Applied Engineering and Scientific Research, 3 (1):1-8, 2014.
7. Lee, C.S., Kim, S.G., Kim, H.J., Ahn, S.H., Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts, Journal of Materials Processing Technology, vol. 187–188, pp. 627–630, 2007.

AR-GE AMAÇLI DOĞRUDAN METAL LAZER SİNERLEME (DMLS) TEZGÂHI İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

M. Cengiz KAYACAN^a, Burhan DUMAN^b

a, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta/TÜRKİYE, cengizkayacan@sdu.edu.tr

b, Süleyman Demirel Üniversitesi, Uluborlu S.Karasoy MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Isparta/TÜRKİYE, burhanduman@sdu.edu.tr

Özet

Eklemeli imalat teknolojileri 1970 yıllarında, tasarımların numunelerini hızlıca imal etmeyi amaçlayan hızlı prototipleme sistemleri ile başlanmıştır. 80'li yılların başından itibaren numune yerine gerçek parça imalata gündeme gelmeye başlamış ve imalat yönteminin adı Eklemeli İmalat olarak ifade edilmiştir. 90'lı yıllarda da eklemeli imalat sistemlerindeki gelişmelerle metal ve seramikten son kullanım amaçlı doğrudan fonksiyonel parçalar imal etme denemelerine başlanmıştır. En yaygın eklemeli imalat teknikleri; steryolitografi (SLA), ergiterek yığma ile modelleme (FDM), üç boyutlu yazıcı (3DP), seçmeli lazer sinterleme (SLS) ve seçmeli lazer ergitme (SLM), doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), elektron ışınli ergitme (EBM) gibi yöntemlerdir. Bu teknikler ile sıvı reçineden, polimerlerden, polimer tozlarından ve metal tozlarından üç boyutlu fiziksel parçalar imal edilebilmektedir. Günümüzde de Seçmeli Lazer Sinterleme/Ergitme (SLS/E) makineleri ile birçok alanda çeşitli metal tozları kullanılarak klasik imalat yöntemleri ile imal edilemeyecek kadar karmaşık geometride olan parçaların göreceli olarak çok hızlı bir şekilde imalatı yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, Kalkınma bakanlığı destekli proje kapsamında tasarlanıp, ülkemizde ilk olarak imalatı yapılan, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme tezgâhı kullanılmıştır. İşlem parametrelerini belirleme amaçlı bir seri deney yapılmış, elde edilen sonuçlar tartışılmış ve literatürle karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, işlem parametreleri, metal sinterleme tezgâhı

DETERMINING PROCESS PARAMETERS OF DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS) BENCH FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT PURPOSE

Abstract

In 1970s rapid prototyping systems, aimed at producing the samples of design. Since the beginning of 1980s people have started to talk manufacturing real part instead of sampling and they called the method of manufacturing as additive manufacturing. In 1990s with the development of additive manufacturing systems it has been started to manufacture direct end use functional part from metal and ceramic. The most common additive manufacturing technologies are stereo lithography (SLA), fused deposition modelling (FDM), 3 dimensional printer (3DP), selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), direct metal laser sintering (DMLS) and electron beam melting (EBM). By using these technologies 3 dimensional physical parts are able to be manufactured from liquid resin, polymer, polymer powder and metal powder. Nowadays, with SLS machines by using various metal powders the part which has so complex geometry that cannot be manufactured by using conventional methods are able to be manufactured in many fields.

DMLS bench which has first been manufactured in our country and which has been designed within the project supported by ministry of development was used in this study. A series of experiment has been done to determine process parameters and the results have been discussed and compared with literature.

Key Words: Additive manufacturing, metal sintering bench, process parameters

1. Giriş

1970 yıllarında hızlı prototipleme sistemleri, tasarımların numunelerini imal etmeyi amaçlamıştır. 80'li yılların başından itibaren numune yerine gerçek parça imalatı gündeme gelmeye başlamış ve imalat yönteminin adı Eklemeli İmalat olarak ifade edilmiştir. 90'lı yıllarda da eklemeli imalat sistemlerindeki gelişmelerle metal ve seramikten son kullanım amaçlı doğrudan fonksiyonel parçalar üretilmeye başlanmıştır.

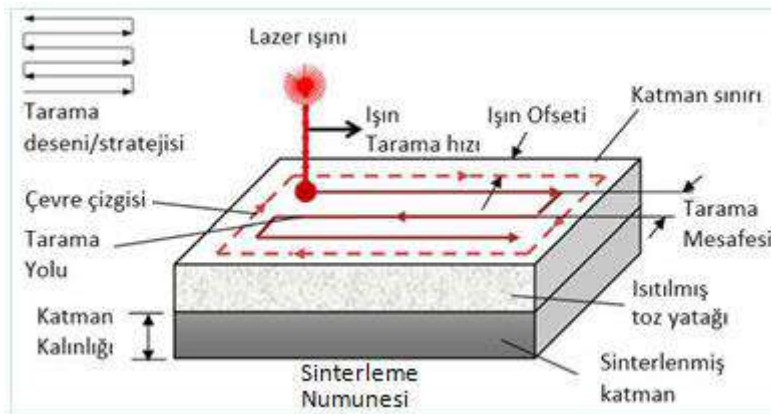
Eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) geometrik verileri kullanarak malzemenin bir biri ardına katman katman eklenmesiyle, karmaşık geometrili fiziksel parçaların hızlı bir şekilde imalatını gerçekleştiren bir imalat tekniğidir. Bu teknikte parça, bilgisayar destekli tasarım (BDT) programları ile çizim, tersine mühendislik (TM), bilgisayarlı tomografi (BT) gibi farklı yöntemlerle elde edilen 3B modelden imal edilir. 3B model çok sayıda ince katmanlara ayrılır (dilimlenir) ve imalat sistemleri, parça tamamlanıncaya kadar her bir katmanı ardışık biçimde imal etmek için bu geometrik veriyi kullanırlar [1-5].

En yaygın eklemeli imalat teknikleri; steryolitografi (SLA), ergiterek yığma ile modelleme (FDM), üç boyutlu yazıcı (3DP), seçmeli lazer sinterleme (SLS) ve seçmeli lazer ergitme (SLM), doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), elektron ışınli ergitme (EBM) gibi yöntemlerdir. Bu teknikler ile sıvı reçineden, polimerlerden, polimer tozlarından ve metal tozlarından üç boyutlu fiziksel parçalar imal edilebilmektedir.

1989-1990 yıllarında Teksas Üniversitesinde Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) için başlayan araştırmalar 1990'ların başlarında pek çok enstitünün bu konuda çalışmaları ile devam etmiştir [6]. 1990'ların başlarında Katolik Leuven Üniversitesinde (Belçika) metal sinterleme makinesi geliştirilmiş [7] ve 1995'de Fraunhofer İmalat Teknolojileri Enstitüsünde de deneysel amaçlı doğrudan metal ergitme yapan lazer sinterleme tipi cihaz imal edilmiştir [8-9].

Özellikle metal parçaların eklemeli imalatında, son kullanıma uygun imalat yöntemlerinin başında Seçmeli Lazer Sinterleme/Ergitme (SLS/E) yöntemi gelmektedir. SLS/E tekniğinde, ısıtıldığında kaynaşabilen toz halindeki bir imalat hammaddesi ince ve düzgün bir tabaka halinde yayılarak yüzeydeki seçilen bölgeler lazer ışınıyla taranır. Işının yüzeye çarptığı noktalarda oluşan sıcaklıkla toz malzeme kısmen eriyerek veya sinterlenerek temas halinde olduğu diğer toz taneleri ile kaynaşır. Bu işlemten sonra imalat zarfının tabanında bulunan platform, bir katman kalınlığı kadar aşağı çekilir. Her katmanın oluşumu için bu işlemler gerektiği kadar (katman sayısına) tekrarlandıktan sonra, imalat süresince doğal bir destek görevi üstlenmiş olan serbest tozlar fırça veya vakumlu emici ile manuel olarak temizlenerek imal edilen parça imalat zarfından alınır [10-13]. SLS/E işleminde lazer enerji kaynağı olarak genellikle Fiber lazer, Karbon dioksit (CO₂) lazer ve Neodimiyum:Yttrium-alüminyum-garnet (Nd:YAG) lazer; inşa kabini içerisindeki atmosferik ortamın sağlanmasında koruyucu gaz olarak da Azot ve Argon kullanılmaktadır [14].

SLS/E ile metal parça imalatında birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler, giriş ve çıkış parametreleri adı altında ikiye ayrılabilir. Giriş parametreleri lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, tarama deseni (stratejisi), katman kalınlığı, imalat atmosferi ve toz karakteristiği olarak belirtilebilir. Çıkış parametreleri ise bağıl yoğunluk, sertlik, yüzey kalitesi, dayanım, metalurjik yapı, şekil ve boyut doğruluğu gibi parametrelerdir [15-16]. Giriş parametrelerinin bazıları şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Giriş parametrelerinin şematik gösterimi [17]'den uyarlama

Çalışmalarda en etkili işlem parametresi olarak, enerji yoğunluğu belirtilmektedir. Enerji yoğunluğu; lazer gücünün, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı parametrelerine oranı ile ifade edilmekte ve Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır [18];

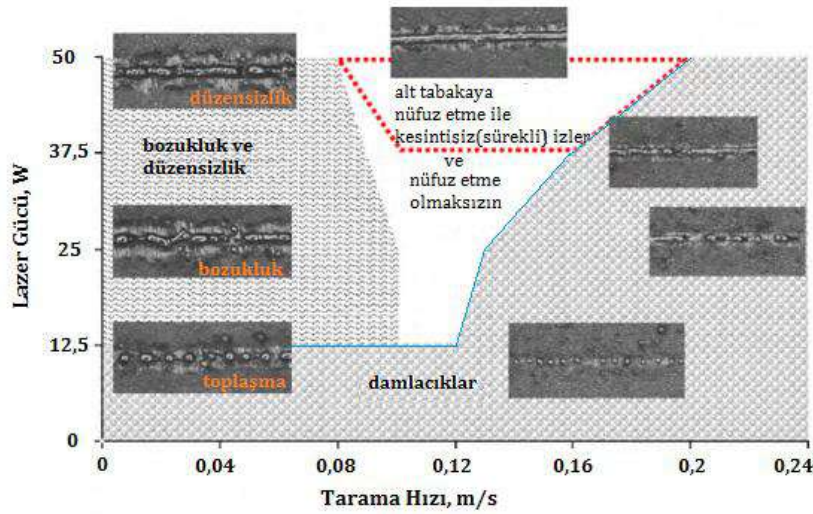
$$E = P / (v \cdot s \cdot t) \quad (1)$$

Eşitlikte; E enerji yoğunluğunu (J/mm^3), P lazer gücünü (Watt), v tarama hızını (mm/s), s tarama mesafesini (mm), t katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

SLS/E süreci ile üretilen bir parçanın performansı sinterleme/ergitme olgusunu ve işlem için gerekli enerji yoğunluğunun miktarını etkileyen parametrelerin tam bir kontrolünü ve optimizasyonunu gerektirmektedir. İşlem parametrelerinin mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk gibi nihai ürün çıkış özellikleri üzerine doğrudan etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, çeşitli toz malzemeler kullanılarak işlem parametrelerini en iyilemeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır [19-23].

Bilindiği gibi DMLS'de fiziksel parça, katmanların üst üste kaynaşmasından (katman katman) meydana gelmektedir. Katmanlar da sinterlenmiş izlerin yan yana kaynaşmasından oluşmaktadır. Sürekli olmayan sinterlenmiş izler, katmanda ve dolayısı ile parçada istenilen nitelikte kaynaşma meydana getiremezler. Bu durum, imal edilen parçanın performansını (mekanik özelliklerini vb.) olumsuz yönde etkiler.

DMLS işleminde bir katmanda, tarama izinin sürekli olduğu yerlerde "kararlı bölgeler" ve bunun dışında "kararsız bölgeler" vardır (Şekil 2). Kararsızlıklar, düşük tarama hızı ile bozukluklar ve düzensizlikler şeklinde gözükür ve tersine, aşırı yüksek hız "toplaşma etkisine" yol açar. Düşük tarama hızında daha düşük lazer gücünde enerji yoğunluğu, alt tabakayı eritmek için yetersizdir ve temas bölgesinin dengeleyici etkisi (alt tabaka içine nüfuz) kaybolur. Enerji yoğunluğunun ergimiş tozu kaynatacak ve buharlaştıracak seviyede olması durumunda, buhar geri tepme basıncı sinterlenmiş izlerin bozulmasını neden olur (Şekil 3.8). Lazer gücünün daha da azaltılması ile, izler damlacık dizisi (toplaşma) haline gelir [24]. Tipik bir seçmeli lazer eritme kusuru olan topaşma olgusu, tarama çizgileri ve katmanlar arası iyi bir birleşim için zararlıdır ve kötü yüzey yapışmasına (ıslatma) neden olarak DMLS işleminin kalitesini bozar [25].



Şekil 2. İlk katman tekli iz proses haritası [24]

Toplaşmanın en önemli nedenlerinden bir tanesi, tek bir lazer izi (çizgisi)'ndeki enerji yoğunluğunun (lazer gücü/tarama hızı) uygun olarak belirlenmemesidir [24]. Joo vd. [26] çalışmalarında düşük tarama hızlarının topaşmaya sebep olduğunu, yüksek tarama hızlarının da zayıf bağlantıya neden olduğunu ve doğrusalılık oranını düşürdüğünü bildirmişlerdir. Bir diğer önemli neden ise imalat kabinindeki oksijen içeriğidir. Oksijen oranının %0.1 daha büyük olması bu soruna yol açar [25]. Bunun dışında katman kalınlığı [27] ve toz malzemenin ısı iletkenliği de topaşmayı etkilemektedir [24]. Topaşma etkisini önlemek için, enerji girdisi ve ısı transferi olaylarının optimum parametrelerinin belirlenmesi ve termal süreçleri stabilize edilmesi gerekmektedir [24]. Yüksek lazer çizgisi enerji yoğunluğu, yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı uygulanarak elde edilebilir ve iyi bir yapışma (ıslatma) özelliği sağlayabilir. Tarama hızının azaltılması ile ergime havuzunun uzunluk-genişlik oranını azaltmak ve alt katman ile temasın genişliğini arttırarak işlemi kararlı hale getirebilir

[28]. Metal toparların ergitme ve ısıtılma sebebiyle yüzey yeniden ergitme işlemleri de, belirli bir ölçüde toplama etkisini hafifletebilir [25].

Bu çalışmada, Ar-Ge amaçlı Doğrudan Metal Lazer Sinterleme tezgâhı ile İşlem parametrelerini belirleme amaçlı bir seri deney yapılmıştır. Deneyler hava ortamında ve azot gazı püskürtme ile tek çizgi sinterleme, çoklu çizgi sinterleme ve tek katman sinterleme olarak gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme Tezgâhı

Kalkınma bakanlığı destekli proje kapsamında tasarlanıp üretilen Ar-Ge amaçlı Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) tezgahı Şekil 3'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan tezgahın en temel donanımları lazer ünitesi, lazer soğutma ünitesi, galvano optik tarayıcı, galvano optik tarayıcı ve lazer kontrol kartı, elektrik motorları ve sürücüleri, toz serme ünitesi, Programlanabilir Mantık Denetleyici (PMD) ve Masaüstü Bilgisayar (MB)'dır. Tezgah, çıkış gücü maksimum 200W, ışın çapı 5 ± 0.7 mm, sürekli veya modülasyonlu çalışabilen su soğutmalı Yb-Fiber lazer ünitesi bulunmaktadır.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan tezgâhın görünümü [29]

2.2. Paslanmaz Çelik Tozu

Çalışmada, 316L paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır. 316L paslanmaz çelik tozu kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilmiştir [30].

Çizelge 1. 316L paslanmaz çelik tozu kimyasal kompozisyonu

Bileşenler	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	N%
Min.		---	---	---	---	10.00	16.00	2.00	---
Mak.	0.030	0.750	2.00	0.045	0.030	14.00	18.00	3.00	0.100

2.3. Deneysel Yöntem

Lazer ergitme ile bir katmanda, çizgisel olarak en iyi toz birleşmesini sağlayacak tezgâh işlem parametrelerini belirlemek için bir dizi deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler; Katman kalınlığı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücüdür. İşlem parametreleri ve değerleri, literatüre [31,24] göre belirlenmiştir. Deneyler hava ortamında ve azot gazı püskürtme ile; tek çizgi sinterleme, çoklu çizgi sinterleme, ve tek katman sinterleme olarak gerçekleştirilmiştir.

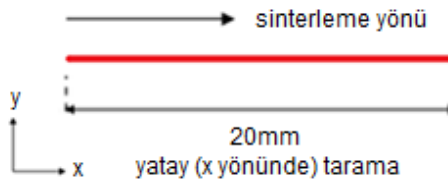
Sinterleme işleminden önce, imal edilecek parçanın geometrik olarak boyut doğruluğu ve bazı mekaniksel özelliklerin uygun bir şekilde sağlanabilmesi için galvano optik tarayıcının odak noktasının ve maksimum tarama alanının bulunması gerekmektedir. Bu sebeple deneysel çalışmadan önce tezgâhın iş tablası üzerindeki çalışma alanı kalibrasyonu yapılmıştır.

SLS/SLE ile imalat işleminde ilk olarak sinterleme çizgileri oluşmakta, sinterleme çizgilerinin yan yana gelmesinden katman, katmanların üst üste birleşmesinden de 3B bir parça elde edilmektedir. Bu sebeple tezgâh üzerindeki deneylere tekli tarama çizgileri ile başlanmış, daha sonra çoklu çizgi tarama ve tek katman oluşturma ile devam edilmiştir.

Deneylerin istenilen kombinasyonlar ile gerçekleştirilmesi amacı ile tezgâh için geliştirilmiş olan yazılım içerisine C# programlama dilinde oluşturulmuş kod parçası eklenmiştir.

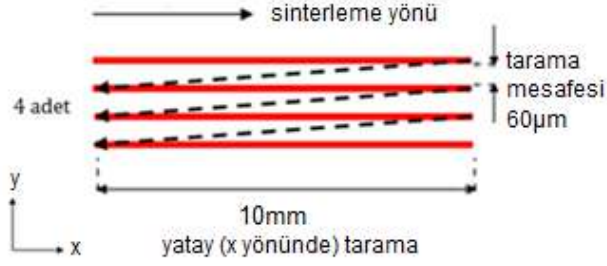
2.3.1. Tek çizgi halinde sinterleme (Tek çizgi tarama)

Sadece bir adet tarama çizgisi farklı parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’de deneylerde kullanılan tek tarama çizgisi ölçüsü ve tarama yöntemi gösterilmiştir.

**Şekil 4.** Tek tarama çizgisi ölçüsü ve tarama yöntemi

2.3.2. Çoklu çizgi halinde sinterleme (Çoklu çizgi tarama)

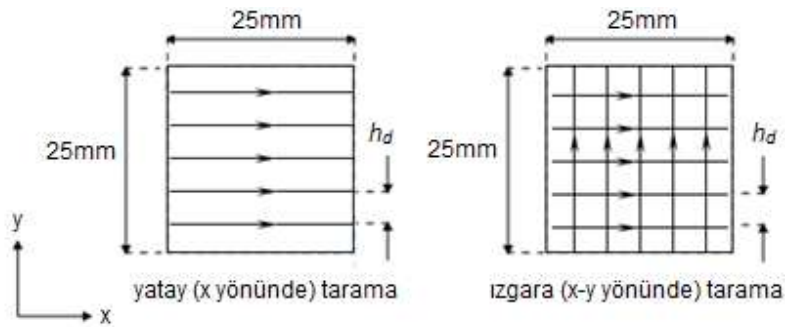
Hava ortamındaki bu deneyler, 6 farklı lazer güç değeri, 11 farklı tarama hızı için yapılmıştır. Tarama çizgileri uzunluğu 10mm olacak şekilde 4 adet yan yana gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığı ve tarama mesafesi 60µm olarak ayarlanmıştır. Şekil 5’de çoklu tarama çizgileri ölçüsü ve tarama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 5. Çoklu tarama çizgileri ölçüsü ve tarama yöntemi

2.3.3. Tek katman olarak sinterleme (Tek katman tarama)

Bu deneyde, tek katman toz serilerek o katmanda 25x25mm ebatlarında kare biçiminde şekil oluşturmak için ergitme işlemi lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi (h_d), katman kalınlığı gibi parametrelerin belli değerleri ile yatay ve ızgara tarama yöntemi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6).



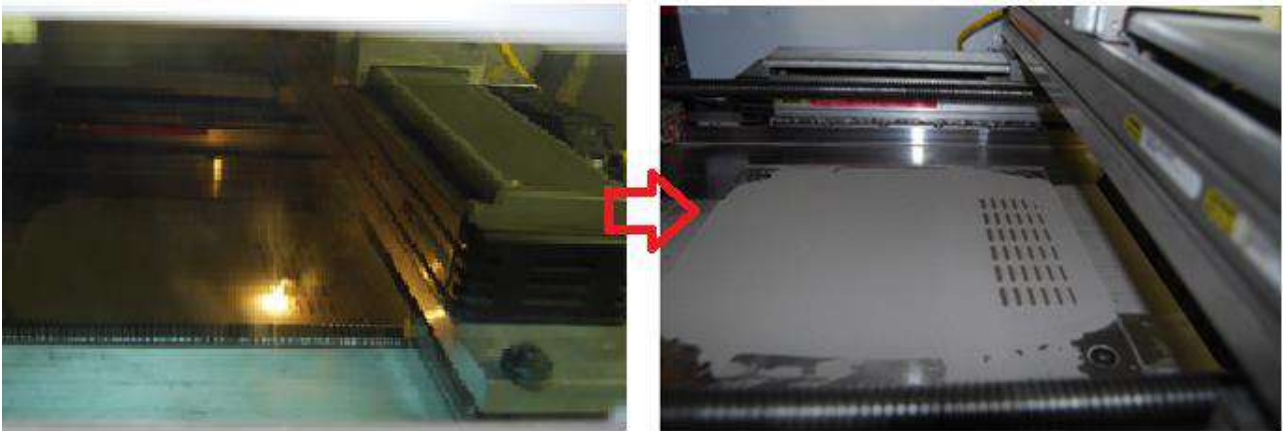
Şekil 6. Tek katman sinterleme test parçası ölçüleri ve tarama yöntemi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde Ar-Ge amaçlı DMLS tezgâhı ile Tekli çizgi, Çoklu çizgi ve Tek katman sinterleme olarak yapılan deneylerin bulguları verilmiştir.

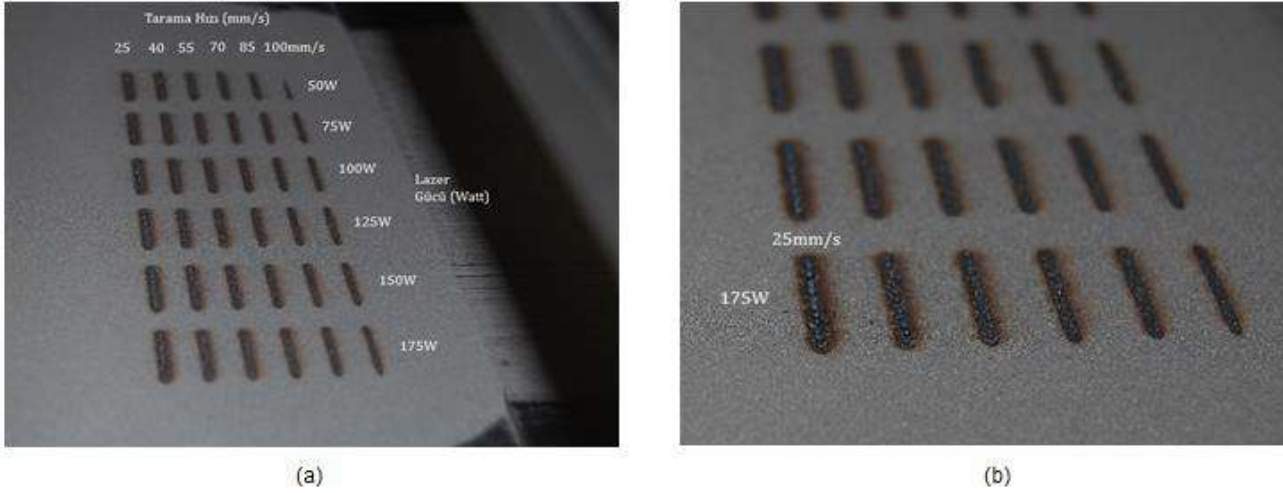
3.1. Tekli çizgi halinde sinterleme

Yapılan deneylerde sadece bir adet tarama çizgisi farklı parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Tek tarama çizgisi denemeleri ile tezgâh kabiniinde sinterleme işleminin oluşumu Şekil 7'de gösterilmiştir.



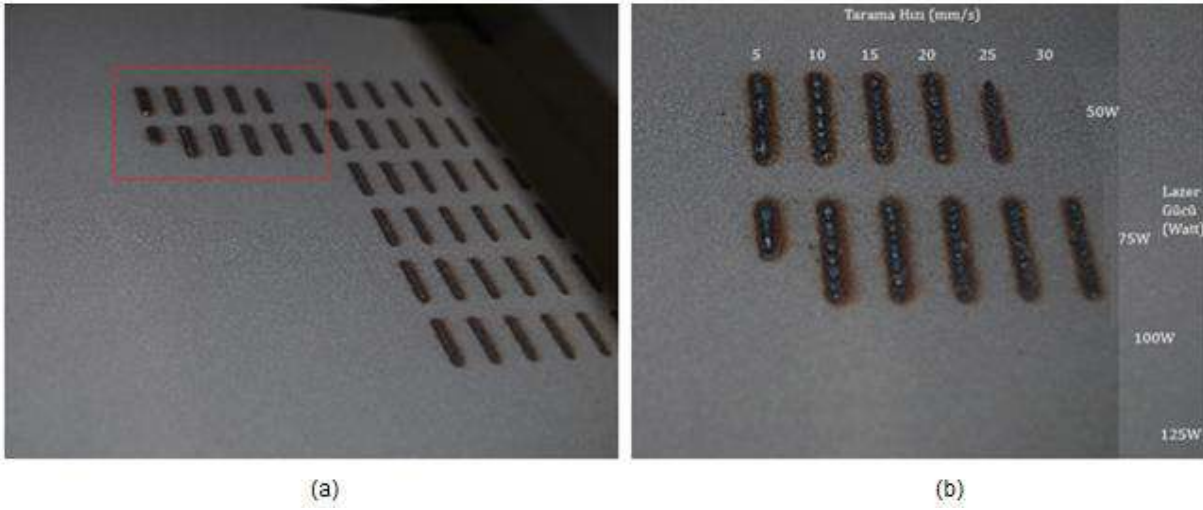
Şekil 8. Tek çizgi halinde sinterleme işlemi

Belirtilen deneyde lazer gücü 50W ile 175W arasında, tarama hızı 100mm/s ile 25mm/s arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Katman kalınlığı ise yaklaşık 300mikron' a ayarlanmıştır. Tarama çizgi uzunlukları 10mm olacak şekilde tarama gerçekleştirilmiş, işlem sonrası görüntü Şekil 8' de verilmiştir.



Şekil 8. Tek çizgi halinde sinterleme işlemi a) tarama hızı:25-100mm/s, lazer gücü:50-175W b) yakınlaştırılmış görüntü

Diğer bir denemede lazer gücü aynı aralıkta bırakılarak, tarama hızı 30mm/s ile 5mm/s arasında 5 birimlik kademelerle değiştirilmiştir. Bu işlemin sonucu Şekil 9' da verilmiştir.



Şekil 9. Tek çizgi halinde sinterleme işlemi a) tarama hızı: 5-30mm/s, lazer gücü: 50-175W b) yakınlaştırılmış görüntü

Lazer ünitesinin arızalı olmasından kaynaklı yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızlarında Sinterleme çizgi-leri oluşmamıştır.

3.2. Çoklu çizgi halinde sinterleme (Çoklu çizgi tarama)

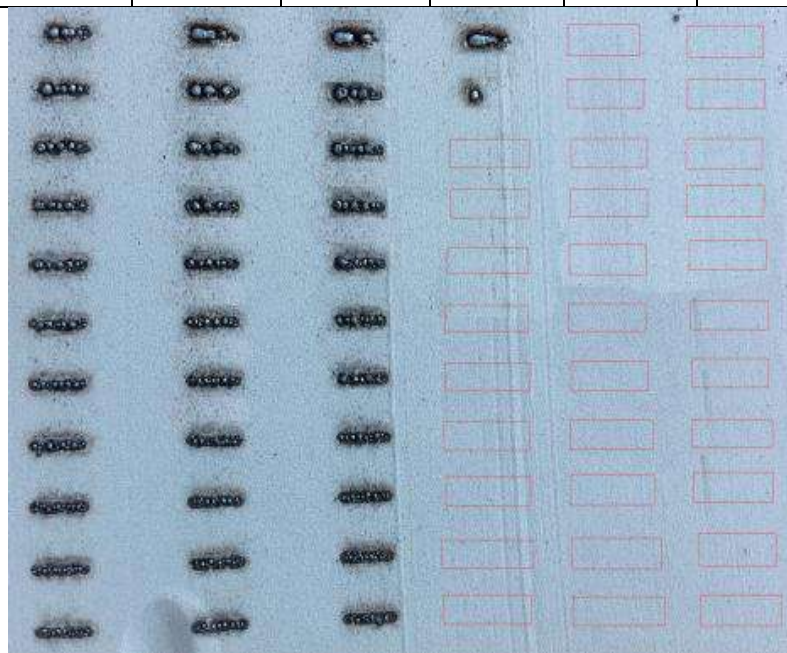
Hava ortamındaki bu deneyler, 50-175W arası lazer güç değerleri ve 50-1000mm/s tarama hızı değerleri ile çoklu çizgi halinde yapılmıştır. Katman kalınlığı 300 μ m ve tarama mesafesi 60 μ m olarak ayarlanmıştır.Çoklu çizgi halinde sinterleme işlemin sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Çoklu çizgi halinde sinterleme

Watt mm/s	50W	75W	100W	125W	150W	175W
50						
100						
200						
300						
400						
500						
600						
700						
800						
900						
1000						

Diğer bir denemede hız parametreleri düşürülerek çoklu çizgi halinde sinterleme işlemi yapılmıştır. Lazer gücünün 125W ve üzeri değerlerinde lazer arızası sebebiyle işlem yarıda kalmıştır. Bu deneyin sonuçları Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Düşük hızlarda çoklu çizgi halinde sinterleme

Watt mm/s	50W	75W	100W	125W	150W	175W
5						
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						

Düşük tarama hızlarında düzensiz ve kalın bir tarama çizgisi görülmektedir. Tarama hızı yükseldikçe tarama çizgileri incelmekte ve daha düzenli/seçilebilir toplama oluşmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Düşük tarama hızlarında toplamanın meydana gelmesi (lazer gücü 100w, tarama hızı 40-50-60 mm/s)

Çizelge 2 ve Çizelge 3' e göre, düşük tarama hızlarında daha büyük çaplı toplamlar ve yayılma (tarama çizgisinde kalınlaşma) meydana gelmiştir. Yüksek tarama hızlarında ise daha küçük çaplı toplamlar ve ince tarama çizgisi oluşmuştur.

7.2.3. Tek katman tarama

Bu deneyde, tek katman toz serilerek 25x25mm ebatlarında kare biçiminde yapı oluşturmak için lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi (h_d), katman kalınlığı gibi parametreler belli değerler ile yatay ve ızgara tarama yöntemi kullanılarak ergitme işlemi yapılmıştır. Farklı parametrelere göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4'de sunulmuştur.

Çizelge 4. Tek katman sinterleme işlemi sonuçları

Katman Kalınlığı: 500µm



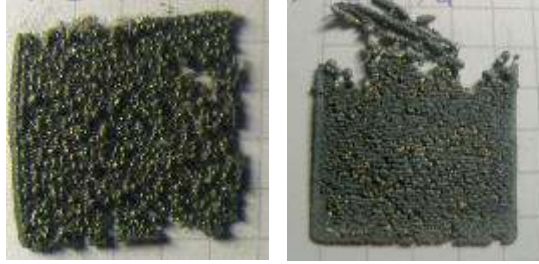
Lazer Gücü	50W	50W	75W
Tarama Mes.	50µm	50µm	50µm
Tarama Hızı	5(mm/s)	100(mm/s)	100(mm/s)
Azot Püskürt.	Evet	Hayır	Evet

Katman Kalınlığı: 500µm



Lazer Gücü	50W	50W	75W
Tarama Mes.	50µm	50µm	50µm
Tarama Hızı	250(mm/s)	400(mm/s)	400(mm/s)
Azot Püskürt.	Hayır	Hayır	Hayır

Katman Kalınlığı: 500µm



Lazer Gücü	100W	100W
Tarama Mes.	50µm	25µm
Tarama Hızı	400(mm/s)	400(mm/s)
Azot Püskürt.	Evet	Evet

Gerçekleştirilen denemeler sonucunda (Çizelge 4) düşük lazer gücü ve tarama hızlarında birleşme olmamış, aşırı derecede toplaşma meydana gelmiş ve ergitme alanının dışına toplaşmalar sıçramıştır. Lazer gücü ve tarama hızının artması ile kısmen birleşmeler sağlanmış, çok düzgün bir katmanın oluşmadığı görülmüştür. Tarama mesafesinin 50µm'den 25µm'ye düşürülmesi ile kısmen düzgün bir katman parça elde edilmiş fakat çizgileri arasında boşluklar meydana gelmiş, tarama çizgilerinin düzgün olarak birleştiği ve tam yoğun bir katman oluşmamıştır.

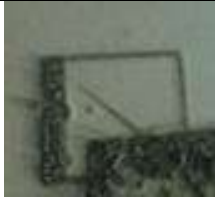
Literatürde atmosferik ortamın sızdırmaz bir kabinde Nitrojen, Argon ve Azot gibi gazların ortama bırakılmasıyla sağlandığı belirtilmektedir [25]. Ayrıca, ticari olarak üretimi yapılan Lazer Sinterleme ve Ergitme tezgâhlarında da atmosferik ortam mutlaka sağlanmıştır [32-33]. Bu durum göz önünde bulundurularak kabin kısmi olarak sızdırmaz hale getirilmiş, kabin içerisine koruyucu gaz olarak azot gazı püskürtülmüş ve tekrar denemeler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları çizelge olarak aşağıda verilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Kısmi izolasyon ile tek katman sinterleme sonuçları

Katman Kalınlığı: 100µm



Lazer Gücü	50W	50W	50W
Tarama Mes.	80µm	80µm	80µm

Tarama Hızı	50(mm/s)	100(mm/s)	250(mm/s)
Azot Püskürt.	Evet	Evet	Evet
Katman Kalınlığı: 100µm			
Lazer Gücü	50W	50W	10W
Tarama Mes.	80µm	80µm	80µm
Tarama Hızı	500(mm/s)	700(mm/s)	250(mm/s)
Azot Püskürt.	Evet	Evet	Evet
Katman Kalınlığı: 100µm			
Lazer Gücü	50W	50W	50W
Tarama Mes.	50µm	50µm	50µm
Tarama Hızı	800(mm/s)	400(mm/s)	20(mm/s)
Tarama deseni	Izgara	Izgara	Izgara
Azot Püskürt.	Evet	Evet	Evet
Katman Kalınlığı: 100µm			
Lazer Gücü	90W	50W	
Tarama Mes.	80µm	50µm	
Tarama Hızı	250(mm/s) işlem yarıda kaldı	700(mm/s)	
Azot Püskürt.	Evet	Evet	Evet

Izgara tarama yönteminde hemen hemen aynı parametre değerlerinde, yatay taramaya göre daha düzgün parçalar elde edilmiş fakat parçada çatlaklar ve çarpılmalar meydana gelmiştir (Şekil 11).



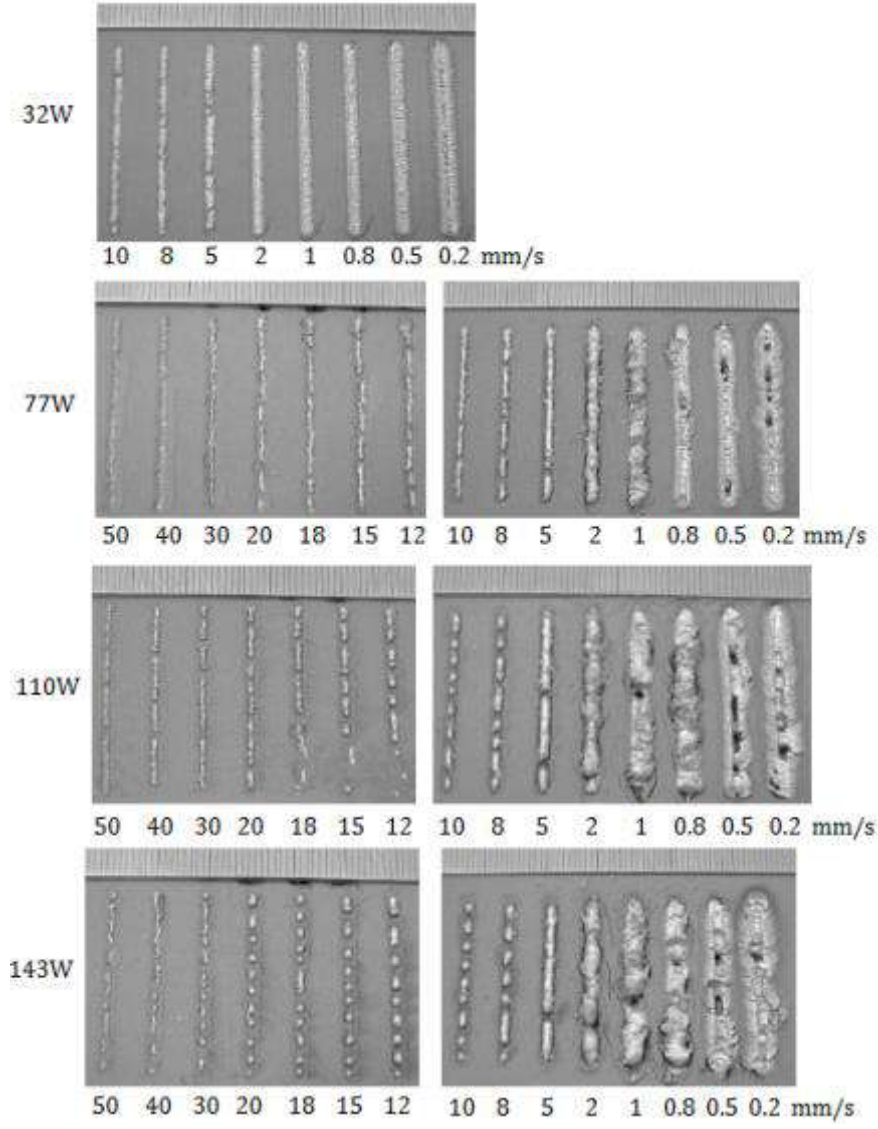
Şekil 11. Tek katmanda oluşan çatlaklar ve çarpılmalar

4. Tartışma ve Sonuç

SLS/E işleminde çok iyi bir katman oluşumu (ip benzeri düzgün lazer sinterleme çizgilerinin birbirleri ile kaynaşması) için lazer işlem parametrelerinin en uygununun seçilmesi ve atmosferik ortamın sağlanması gerekliliği önceki çalışmalarca da belirtilmektedir. İşlem parametrelerin en uygununun seçilememesi ve işlem ortamının sağlanmaması sebebi ile toplaşma ve düzgün olmayan lazer sinterleme izleri oluşmakta, sonuçta iyi bir katman oluşumu meydana gelmemektedir.

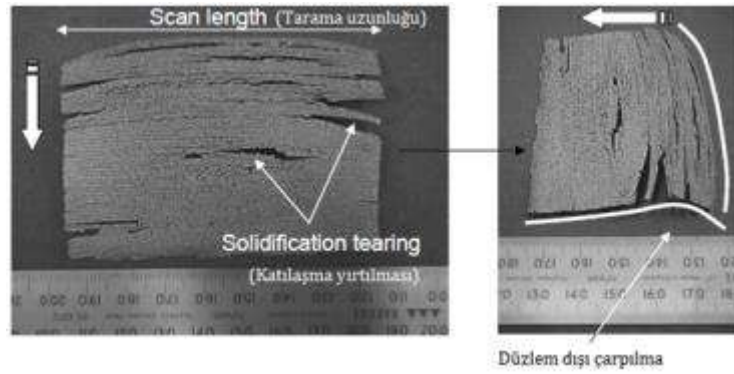
İmalat kabinindeki oksijen içeriği toplaşmanın başlamasında önemli bir rol oynamaktadır. Atmosferin oksijen içeriğinin %0.1'e düşürülmesi ile toplaşma önemli ölçüde azaltılabileceği belirtilmektedir [25]. Oksijensiz atmosferik ortam da Azot, Argon ve Helyum gibi gazlar kullanarak sağlanmaktadır [34].

Toplaşmanın oluşumundaki başka bir önemli neden ise işlem parametreleridir. Uygun işlem parametrelerinin kullanılmaması bu oluşumu ortaya çıkarmaktadır. Yadroitsev vd. [35], metal tozu (904L paslanmaz çelik) ile yapmış oldukları çalışmalarında tekli izlerin davranışlarının ve geometrilerinin lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı gibi işlem parametrelerine ve toz karakteristiğine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Hauser [36], tez çalışmasında argon ve hava atmosferinde tekli çizgi, tek katman ve çok katman ergitme işlemleri farklı parametrelerle gerçekleştirilmiştir. Hauser' ın çalışmasında tekli çizgi halinde ergitme işlemi argon atmosferinde değişik lazer gücü ve tarama hızı değerleri ile yapılarak ergime davranışları incelenmiştir. Sınırlı lazer gücü ve tarama hızı değerlerinde düzgün bir birleşme ile tekli çizgi elde edilmiş (32W, 0.8-2mm/s) çoğu değerde toplaşma ve düzgün olmayan çizgiler görülmüştür (Şekil 12). Çalışmada 314s HC tipi paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır.



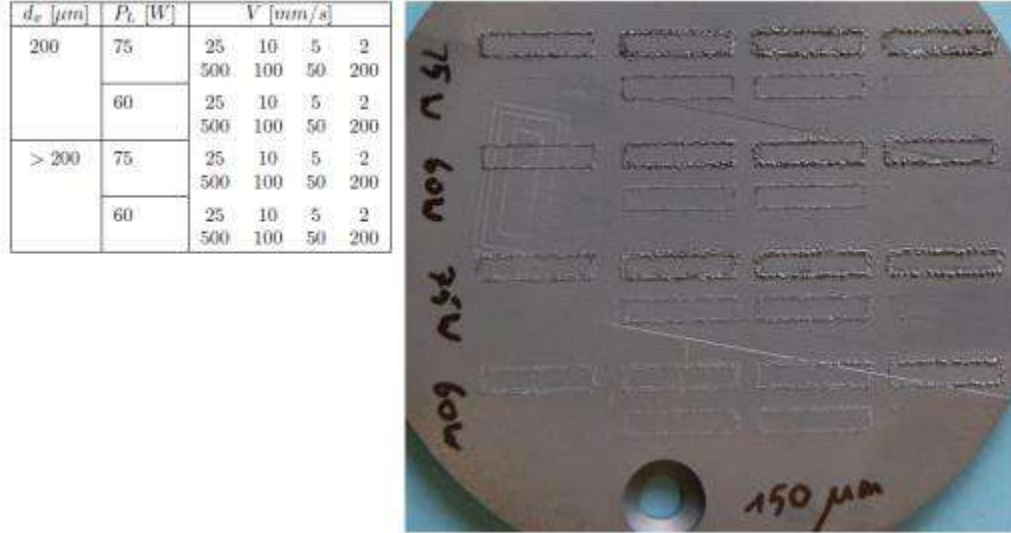
Şekil 12. Argon atmosferinde farklı tarama koşullarında ergitilmiş izler [36]

Aynı çalışmada, tek katman ergitme işlemi önden toz yüzeyi boyunca yapılmış ve bozulmalar meydana gelmiştir (Şekil 13). Bozulma, tabakaların eğilmesi ve komşu çizgiler arasındaki katılaşma yırtılmasının oluşumu, tarama uzunluğunun artması ile arttığı bildirilmiştir.



Şekil 13. Tarama uzunluğu 80mm olan bir katmandaki katman bozulması ve katılaşma yırtılması [36]

Elsen [27], tarafından yapılan benzer bir tez çalışmasında, farklı çizgi tarama testleri gerçekleştirilmiştir. Ergime havuzunun kaotik davranışı ve parazit faktörlerin olması sebebiyle, davranış sadece açıklanmış fakat kanıtlanmamıştır. Değişik lazer gücü (P_L), tarama hızı (V) ve lazer ışın çapı (d_x) ile 150 mikron katman kalınlığında testler yapılmıştır (Şekil 14). Tarama hızının artması ile toplama kaybolmuş ve tekrar görünmüştür. "Toplama yüksek tarama hızlarında oluşur" gibi basit bir açıklamanın yapılmasının doğru olmadığı bildirilmiştir.



Şekil 14. İş tablası üzerinde tarama çizgileri [27]

Çalışmada tekli lazer tarama çizgilerinde, yüksek hız (100mm/s) ve düşük güç (50W) değerlerinde toplama etkisi görülmekte ergiyen tozlar iş tablasına yapışmamakta ve aralarında kaynaşma meydana gelmemektedir. Ters şekil, düşük hız (25 mm/s) ve yüksek güç (175W) değerlerinde de eriyekteki buharlaşma tepkimesi sebebiyle toplama oluşmaktadır. Lazer gücünün 100-175W değerlerinde ve tarama hızının 85,100mm/s değerlerinde daha düzgün bir birleşme ile tekli çizgi elde edilmiştir.

Çoklu lazer tarama çizgilerinde lazer gücünün 50-100W değerinde, tarama hızının 10-100mm/s değerlerinde daha büyük çaplı toplamlar ve yayılma (tarama çizgisinde kalınlaşma) meydana gelmiştir. Yüksek tarama hızlarında (200-1000mm/s) ise daha küçük çaplı toplamlar ve ince tarama çizgisi oluşmuştur. Lazer gücünün 100W, 125W değerleri ile tarama hızının 100,200mm/s değerlerinde kaynaşma görülmüştür.

Tek katman sinterleme işleminde lazer gücünün 50W ve tarama hızının 5-100mm/s değerlerinde birleşme oluşmamıştır. Izgara tarama yönteminde hemen hemen aynı parametre değerlerinde, yatay taramaya göre daha düzgün katman elde edilmiş fakat katmanda çatlaklar ve çarpılmalar meydana gelmiştir. Lazer gücü 100W, tarama hızı 400mm/s ve tarama mesafesi 25 μm değerlerinde iken daha başarılı katman oluşumu gözlemlenmiştir.

Sızdırmazlığın ve atmosferik ortamın daha iyi sağlanması oksidasyon oluşumunu ve sinterleme izlerindeki toplamları giderecektir. Mekanik sistemin daha hassas olması durumunda istenilen katman kalınlığında toz serilebilecek ve çok düzgün bir katman birleşmesi oluşacaktır.

Kaynaklar

1. CustomPartNet, Inc., Erişim Tarihi: 20.03.2014, <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
2. Society of Manufacturing Engineers (SME), 1970. Erişim tarihi: 20.03.2014. <http://www.sme.org/Tertiary.aspx?id=17485#sthash.gkpsIRmg.dpuf>
3. Stratasys Ltd., 1989. Erişim Tarihi: 19.10.2014. <http://www.stratasys.com>
4. Giannatsis, J., Dedoussis, V., Additive Fabrication Technologies Applied To Medicine And Health Care: A Review, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 40, pp. 116-127, 2009.
5. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A., Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt 31, syf. 53-69, 2013.
6. Shellabear, M., Nyhrilä, O., DMLS – Development History and State of the Art. LANE 2004 conference, Sept., Erlangen, Germany, 21-24, 2004.
7. Catholic University of Leuven (CUL), Erişim Tarihi: 18.12.2014. <http://www.mech.kuleuven.be/pp/facilities/sms2>, 1425.
8. Das, S., Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals. Advanced Engineering Materials, 5,10, 701-711, 2003.
9. Casalino, G., Campanelli, L., Contuzzi, N., Ludovico, A.D., Experimental Investigation And Statistical Optimisation Of The Selective Laser Melting Process Of A Maraging Steel. Optics&Laser Technology, 65, 151-158, 2015.
10. Deckard, C., Method And Apparatus For Producing Parts By Selective Sintering. US Patent 4,863,538, filed 17 October 1986, published 5 September 1989.
11. King, D., Tansey, T., Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling. Journal of Materials Processing Technology, 132, 42-48, 2003.
12. Partee, B., Hollister, S.J., Das, S., Selective Laser Sintering Process Optimization for Layered Manufacturing of CAPA® 6501 Polycaprolactone Bone Tissue Engineering Scaffolds. Journal of Manufacturing Science and Engineering (ASME), 128, 531-540, 2006.
13. Neğiş, E., Turkcadcam, 2014. Erişim Tarihi: 09.09.2014. <http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/>
14. Wen, S.F., Yan, C.Z., Wei, Q.S., Zhang, L.C., Zhao, X., Zhu, W., Shi, Y.S., Investigation And Development Of Large-Scale Equipment And High Performance Materials For Powder Bed Laser Fusion Additive Manufacturing, Virtual and Physical Prototyping, 9,4, 213-223, 2014.
15. Klocke, F., Wagner, C., Ader, C., Development Of An Integrated Model For Selective Metal Laser Sintering. Progress In Virtual Manufacturing Systems: Proceedings. 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarland University, 03-05 June 2003, Saarbrücken, Germany, 2003.
16. Chatterjee, N., Kumar, S., Saha, P., Mishra, P.K., Choudhury, A.R., An Experimental Design Approach To Selective Laser Sintering Of Low Carbon Steel. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, India, 2003.
17. Senthilkumaran, K., Pandey, P.M., Rao, P.V.M., Influence Of Building Strategies On The Accuracy Of Parts In Selective Laser Sintering. Materials and Design, 30, 2946-2954, 2009.
18. Kruth, J.-P., B. Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., Naert, I., Rapid Manufacturing of Dental Prostheses by means of Selective Laser Sintering/Melting. Proceedings of the AFPR, 4, 2005.
19. Delgado, J., Ciurana, J., Rodríguez, C.A., Influence Of Process Parameters On Part Quality And Mechanical Properties For DMLS And SLM With Iron-Based Materials. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 60, 601-610, 2012.
20. Jia, Q., Gu, D., Selective Laser Melting Additive Manufacturing Of Inconel 718 Superalloy Parts: Densification, Microstructure and Properties. Journal of Alloys and Compounds, 585, 713-721, 2014.
21. Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke, W., Kruth, J.-P., Process Optimization And Microstructural Analysis For Selective Laser Melting Of AlSi10Mg. Catholic University of Leuven, Departement of Mechanical Engineering, Belgium, 484-495, 2011. <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsarchive/pubs/Manuscripts/2011/2011-37-Kempen.pdf> (Erişim Tarihi: 12.10.2014).
22. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Iuliano, L., Fino, P., Influence Of Process Parameters On Surface Roughness of Aluminum Parts Produced by DMLS. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 67, 42743-2751, 2013.
23. Laohaprapanon, A., Jeamwathanachai, P., Wongcumchang, M., Chantarapanich, N., Chantaweroad, S., Sitthiseripratip, K., Wisutmethangoon, S., Optimal Scanning Condition of Selective Laser Melting Processing with Stainless Steel 316L Powder. Advanced Materials Research, 341-342, 816-820, 2011.

24. Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., Smurov, I., Single Track Formation in Selective Laser Melting of Metal Powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 12, 1624-1631, 2010.
25. Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W., Balling Behavior Of Stainless Steel And Nickel Powder During Selective Laser Melting Process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 59, 1025-1035, 2012.
26. Joo, B.D., Jang, J.H., Lee, J.H., Son, Y.M., Moon, Y.H., Effect of Laser Parameters on Sintered Powder Morphology. *J. Mater. Sci. Technol.*, 26(4), 375-378, 2010.
27. Elsen, M.V., Complexity of Selective Laser Melting: A New Optimization Approach. Catholic University Leuven, Faculty Of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Ph.D. Thesis, 185p, Belgium, 2007.
28. Gusarov, A.V., Yadroitsev, I., Bertrand, Ph., Smurov, I. I., Heat Transfer Modelling and Stability Analysis of Selective Laser Melting. *ELSEVIER, Applied Surface Science*, 254, 975-979, 2007.
29. Baydar, M.L., Kayacan, M.C., Yorgancıgil, H., Varol R., Eroğlu, E., Kayacan, R., Bekçi, U., Çolak, O., Taylan, F., İlkaz, S., Sofu, M.M., Hamamcı, E., Salman, Ö., Lazer Sinterleme Yöntemiyle Metal Tozundan Hızlı Prototipleme Yapan Cihaz Tasarımı Ve İmalatı. Proje No: 2003K121020/11, 180s, 2005.
30. Stanch Stainless Steel Co. Ltd., Erişim Tarihi: 12.05.2014. <http://www.stanch.com/stainless-steel-316L.htm>, 2014.
31. Yadroitsev, I., Bertrand, P., Smurov, I., Parametric Analysis Of The Selective Laser Melting Process. *Applied Surface Science*, 253, 8064-8069, 2007.
32. SLMSolutions GmbH, Erişim Tarihi: 06.12.2012. <http://www.slm-solutions.com/en/products/slm-equipment/slm280-hl/>, 2011.
33. 3ddt, 2011. Erişim Tarihi: 06.12.2012. <http://www.3ddt.com.tr/en/content.php?sec=1&cat=1&scat=1&getDetail=57>
34. Wang, X.J., Zhang, L.C., Fang, M.H., Sercombe, T.B., The Effect Of Atmosphere On The Structure And Properties Of A Selective Laser Melted Al–12Si Alloy. *Materials Science & Engineering A*, 597, 370-375, 2014.
35. Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Bertrand, P., Smurov, I., 2012. Factor Analysis Of Selective Laser Melting Process Parameters And Geometrical Characteristics Of Synthesized Single Tracks. *Rapid Prototyping Journal*, 18, 3, 201-208.29.
36. Hauser, C., Selective Laser Sintering Of A Stainless Steel Powder. University Of Leeds, School of Mechanical Engineering, Ph.D. Thesis, 279p, UK, 2003.

ÜÇ BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİLERİ İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARIN SİLİKON KALIPLAMA YÖNTEMİYLE ÇOĞALTILMASI

Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN ve Zekeriya YERLİKAYA

Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu/TÜRKİYE, fkartal@kastamonu.edu.tr

Özet

Katmanlı üretim (KÜ) Additive Manufacturing (AM) olarak da bilinen 3D baskı, nesnenin ardışık katmanlarının bilgisayar kontrolü altında bir nesne üretmek üzere oluşturulduğu üç boyutlu bir nesneyi sentezlemek için kullanılan işlemleri ifade eder. Nesneler neredeyse her şekli veya geometriyi oluşturabilir. Bir başka elektronik veri kaynağından veya bir 3D (3 boyutlu) modelinden gelen dijital model verileri kullanılarak üretilir. Bu çalışmada açık kaynak kodlu eritme yığıma tekniği ile filament kullanarak üretim yapabilen masaüstü üç boyutlu yazıcıda üretilmiş düz dişli çarkın silikon kalıplama tekniği ile kalıbı alınarak oluşturulmuş kalıp modelinden epoksi reçine ile parça çoğaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm parçaların boyutsal ölçü doğruluğu, CAD (bilgisayar destekli tasarım) datası, üç boyutlu ile üretilmiş parça ve silikon kalıpla çoğaltılan parçaların karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Katmanlı üretim, 3D baskı, Ürün geliştirme, silikon kalıplama, RTV 2 silikon.

REPRODUCTION OF SILICONE MOLDING METHODS OF PRODUCED PARTS THREE DIMENSIONAL PRINTING TECHNOLOGIES

Abstract

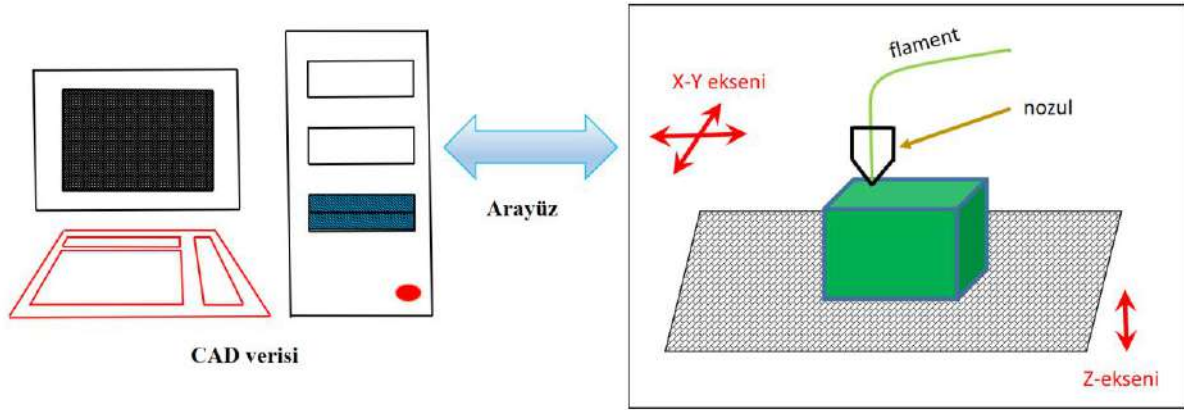
Layered production (3D) 3D printing, also known as Additive Manufacturing (AM), refers to the processes used to synthesize a three-dimensional object that is produced to create an object under computer control of consecutive layers of the object. Objects can form almost any shape or geometry. It is produced using digital model data from another electronic data source or a 3D model. In this study, by means of silicon molding technique of a plain gear wheel produced in a desktop three-dimensional printer capable of producing by using an open source meltblowing technique with a filament, a replica was made with an epoxy resin from a die model formed by taking a die. Dimensional measurement accuracy The CAD data was made with three dimensional parts, compared with the parts reproduced with silicon mold.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, Product development, silicone molding, RTV 2 silicone.

1.Giriş

Katmanlı üretim teknolojileri bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerini kullanarak parçaları katmanlar halinde oluşturmaya yarayan gelişmiş bir imalat tekniğidir [1-4]. Bu üretim işlemi katmanlar halinde üç boyutlu (3D) parçaları klasik üretim yöntemlerine kıyasla daha kısa üretim süresi ve daha düşük maliyetle karmaşık parçaları üretmek için fayda sağlayan bir teknolojidir [1-4]. Katmanlı üretim teknolojisinin mühendislikte özelleştirilmiş ürünler üretimi, ön cerrahi işlem, fonksiyonel modelleme ve kavramsal modelleme gibi geniş bir kullanım alanı vardır. Bu teknoloji mühendislik ve endüstriyel üretimde; uçaklarda, diş restorasyonu, medikal implantlar ve otomotiv üretimi gibi, pek çok uygulama alanları mevcuttur[1, 2]. Dünya ekonomisinde rekabetin artmasıyla tasarımcılar ve üretim mühendisleri, müşteri gereksinimlerini karşılamak ve rekabette avantaj elde etmek için ürünleri her zamankinden daha hızlı üretme zorunluluğu ile karşı karşıyadırlar. Katmanlı üretim süreci gelişmiş geometrileri kısa tasarım süresinde üretmede ve üretim zamanını herhangi bir alet ihtiyaç duymadığı için düşük maliyetle imal etmekte etkili bir teknolojidir [2, 3]. Pek çok katmanlı üretim sistemleri; birleştirmeli yığıma modellemesi (Fused deposition modeling (FDM)), direkt metal bırakımı (direct metal deposition (DMD)), 3 boyutlu yazdırma, seçkili lazerli sinterleme (selective laser sintering (SLS)), mürekkep püskürtme modeli (inkjet modeling (IJM)) ve stereolitografi (SLA) gibi sistemler piyasada mevcuttur. Bu sistemler katman oluşturma bakımından farklıdır ve farklı malzemeler bu yöntem ile güvenli bir şekilde üretilir. Birleştirmeli yığıma modellemesi (FDM) katmanlı üretim teknolojilerinde geniş kullanım alanına sahiptir. Bunlar; karmaşık geometrik parçalar üretme kabiliyeti ile düzgün bir şekilde termoplastiklerde işlevsel proto-

tipler sunar ve ofis ortamında güvenli bir şekilde üretimi sağlar. Birleştirmeli yığma modellemesi (FDM), Stratasys firması tarafından 1990'larda ABD'de geliştirilmiştir [7-11]. Birleştirmeli yığma modellemesi (FDM) genellikle modelleme, prototip üretimi ve üretim uygulamalarında kullanılmaktadır [4]. Şekil 1'de görüldüğü üzere, bu işlemden malzeme bir sıvılaştırıcı kafasında sıvı halde getirilir ve daha sonra herhangi bir CAD modeliyle doğrudan, katmanlı bir şekilde 3 boyutlu parça üretmek için parçaların enine kesit geometrisini izleyen bir şekilde üretilir. Bu üretim süreci için akrilonitril bütadien stiren (ABS), polikarbonat (PC) ve PC-ABS harmanı gibi çok çeşitli filament malzemeler kullanılabilir [1-4]. Silikon kalıplama yöntemi; Oda sıcaklığında vulkanizasyon (RTV) kalıplama olarak da bilinen silikon kalıplama, prototipleme, fonksiyonel test ve kısa süreli üretim için bitmiş ürünler oluşturur [5,6]. Takım ömrü ve çevrim süreleri göz önüne alındığında, küçük miktarlar (15 - 60 döküm) için idealdir. Çünkü işleme veya enjeksiyon kalıplama oranının çok altında döküm sürelerine maliyetler sunar. En kararlı polimer olarak, silikonlar üstün güvenilirlik, mükemmel servis ömrü ve düşük üretim maliyetleri sunmaktadır [6,7]. Bileşiklerin karışımı basittir ve yanıcı veya toksik solvent içermez. Silikon, oda sıcaklığında iyileşecek ve fırında pişirilmiş polimerler ile bağlantılı ısıtma maliyetlerini ortadan kaldıracaktır [8, 9]. Kuruma oranları, üretim hattı kullanımında esneklik sağlayacak şekilde ayarlanabilir özelliğe sahiptir [5-10].



Şekil 1. Üç boyutlu katman oluşturma yöntemi genel şeması.

2 MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan 3B yazıcı

Bu çalışma kapsamında açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı kullanılmıştır. Dream maker tamamen yerli tasarım olup Prusa vb. açık kaynak kodlu yazıcılara benzer özelliktedir. İşleme alanı (200x200x200) mm'dir. Isıtma tablası ve PLA için soğutma fanı mevcuttur. LCD kontroller sayesinde bilgisayardan bağımsız çalışabilmektedir. Şekil 2'de açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı görülmektedir.



Şekil 2. Açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı.

2.2. Deney koşulları ve malzeme

Çalışma kapsamında açık kaynak kodlu yazıcı için baskı alma şartları Tablo 1'de verilmiştir. Tüm deneyler boyunca parametreler sabit olarak kullanılmıştır. Silikon kalıbı içerisine iltara şeffaf epoksi reçine dökülerek kalıptan ürün elde edilmiştir. Epoksiler çok fonksiyonlu sertleştiricilerle reaksiyonu, genellikle yüksek mekanik özelliklere, sıcaklığa ve kimyasal dirence sahip bir termoset polimer oluşturur. Epoksi, metal kaplamalar, elektronik / elektrik bileşenleri / LED kullanımı, yüksek gerilim elektrik izolatörleri, boya fırçaları imalatı, elyaf takviyeli plastik malzemeler ve yapısal yapıştırıcılar dâhil geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Tablo 1 1

Parametre	Değeri
Ekstruder sıcaklığı	220 C°
Tabla sıcaklığı	50 C°
Filament	1.75 mm PLA +
Nozul çapı	0.4 mm
Katman yüksekliği	0.2 mm

Bu çalışmada üç boyutlu yazıcıda üretilmiş parçaların çoğaltılmasında kalıp alma için RTV 2 (Room Temperature Vulcanization silicone) silikon kullanılmıştır. Kullanılan RTV 2 silikona ait mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Kullanılan epoksi reçineye ait fiziksel özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. RTV 2 silikona ait mekanik özellikler

Sertlik	Shore A 10-90
Çekme dayanımı	11 N/mm ²
Kopma uzaması	100-1100%
Maksimum sıcaklık	+300 ° C
Minimum sıcaklık	-120 ° C

Tablo 3. Epoksi reçineye ait bazı mekanik özellikler.

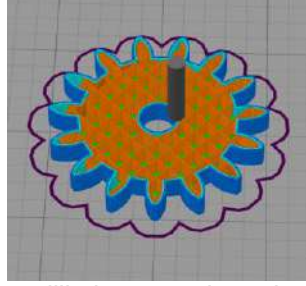
Gerilme mukavemeti	85 N/mm ²
Kırılmaya kadar uzama	0,008
Eğilme mukavemeti	112 N/mm ²
Eğilme katsayısı	10.000 N/mm ²
Çekme mukavemeti	180 N/mm ²

2. 3. Geometrilerin oluşturulması

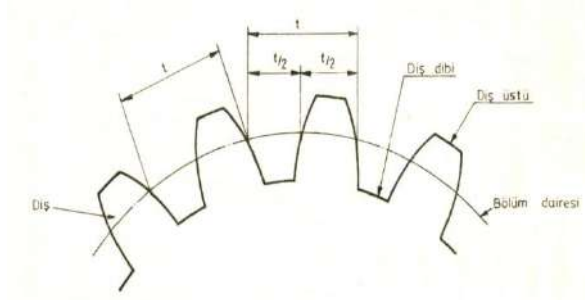
Bu çalışmada açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcıda yazdırılmak üzere hazırlanan Modül 3 15 diş sayısına sahip düz dişli üç boyutlu tasarım görüntüsü Şekil 3'te gösterilmiştir. Dişli çark tasarımı SolidWorks paket programında yapılmıştır. Modellerin tüm yüzeylerinin cidar kalınlığı tüm modeller için 1 mm, parçaların yüksekliği 10 mm olarak belirlenmiştir. SolidWorks programında iki boyutlu tasarlanan modeller üç boyuta çevrilip *.STL uzantılı olarak kaydedilmiştir. Açık kaynak kodlu yazdırma programında %10 dolgu oranıyla PLA+ malzemeden parça üretilmiştir (Şekil 4). Düz dişli çarkın tasarımında kullanılan düz dişli modellerin boyutsal ölçü parametreleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 3. Modül 3 15 diş sayısına sahip düz dişli çarkın CAD 3 boyutlu çizim görüntüsü.



Şekil 4. Düz dişli çarkın dilimleme yazılımında simülasyon görüntüsü.



Şekil 5. Üretilen düz dişli modellerin boyutsal ölçüleri.

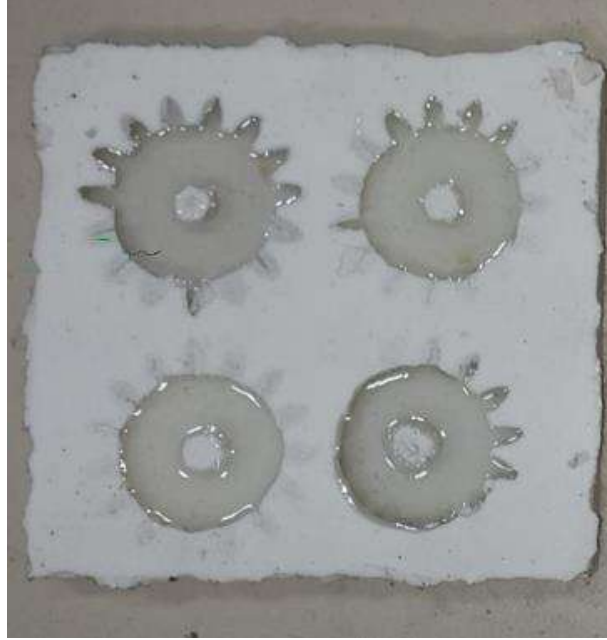
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dream Maker 3B yazıcı kullanılarak üretilen düz dişli çark parçası kullanılarak hazırlanan silikon kalıbı Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da gösterilen kalıp içerisine 1 kg kalıp silikonu RTV 2 ye 50 gram katalizör katılarak 1 dakika süreyle karıştırılmış ve hazırlanan kalıp içerisine vakumlandıktan sonra dökülmüştür.

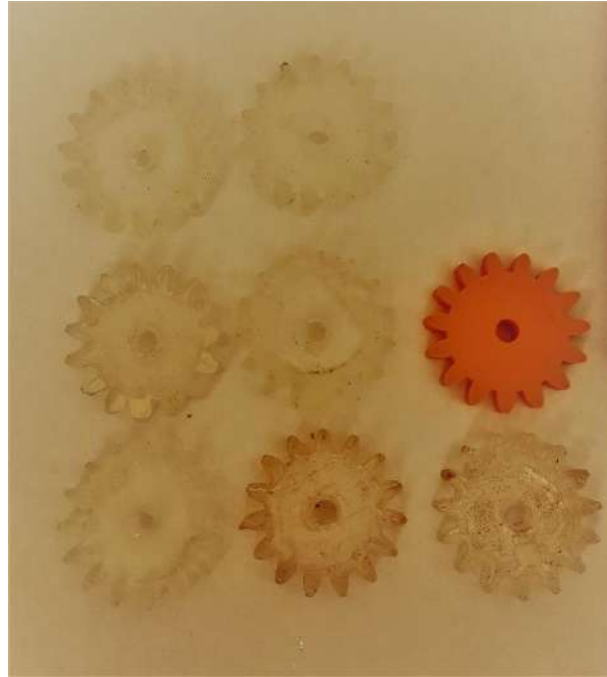


Şekil 6. Düz dişli silikon kalıbı görüntüsü.

Silikon kalıbı 24 saat süre kuruma ve donma işleminden sonra üç boyutlu yazıcıda üretilen düz dişli çark modeli çıkarılmıştır. Daha sonra hazır olan silikon kalıbın iç yüzey kontrolü çapak ve kopukluk kontrolü yapıldıktan sonra silikon kalıp ayırma spreyi sıkılmıştır. Akabinde içine hazırlanmış ultra şeffaf silikon her bir dişli kalıbı için $14618,36 \text{ mm}^3$ hacim alan için $0,01461836$ litre olacak şekilde vakumlandıktan sonra 30 cm yükseklikten serbest bir şekilde dökülmüştür. Şekil 7'de ultra şeffaf epoksi reçinenin silikon kalıbına dökülmüş görüntüsü yer almaktadır. Şekil 8'de silikon kalıptan çıkartılan epoksi reçineden üretilmiş parçalar görülmektedir. Tablo 4'te dişli çarkın CAD modeli, üç boyutlu yazıcıdan elde edilen parça modeli ve silikon kalıpta epoksi reçineyle döküm yoluyla elde edilen parçaların boyutsal farklılıkları gösterilmektedir.



Şekil 7. Ultra şeffaf epoksi reçinenin silikon kalıbına dökülmüş görüntüsü



Şekil 8. Ultra şeffaf epoksi reçineden üretilmiş düz dişli çarklar.

Tablo 4. Epoksi ile silikon kalıba dökülerek üretilen parçaların tasarım ölçüleriyle olan farkı

	Diş üstü çapı (mm)	Diş dibi çapı (mm)	Fark (%)
CAD model	51	37,5	0
3d basılı model	51,8	38,6	2,84
Epoksi ile üretilmiş model	52,3	39,4	4,82

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcılar kullanılarak bilgisayar ortamında çizilmiş modülü 3 diş sayısı 15 olan düz dişli çark parçasının RTV 2 kalıp silikonu ile model kalıbı oluşturulmuştur. Elde edilen silikon kalıbı içerisine ultra şeffaf özellikte epoksi reçine dökülmüş ve 24 saat süreyle donması beklenilmiştir. Kalıptan çıkarılan parçaların katı görümü olarak yeterli olmasına rağmen yüzeysel ekstra işlemlere ihtiyaç duyulmuştur. Tablo 4'e göre düz dişli çarkın CAD model diş üstü çapı 51 mm iken 3d basılı modelde 51,8 mm elde edilmiştir. Diş dibi çapı 37,5 mm CAD modeli ölçüsü iken, Epoksi ile üretilen modelin diş dibi çapı değeri 38,6 mm olmuştur. % 2,84'lük bu fark parçanın kullanılacağı yere göre tercih edilebilir yada tercih edilmez. Diğer taraftan Epoksi ile üretilmiş parça CAD modele göre % 4,82 farklı çıkmıştır. Bu fark hem üç boyutlu yazıcıdan aktarılan hatalar hem de silikon modellemenin daha profesyonel yapılmadığından kaynaklanabilir. Bu tür silikon kalıpla üretilen parçalar ya da çoğaltılacak parçalar ölçü tamlığı istenmeyen heykel süs eşyaları gibi modellerin üç boyutlu baskısı alınarak silikonu kalıp modeli oluşturulabilir. Öte yandan, ölçünün problem olmadığı görsel olarak prototip sergilemek içinde kullanılabilir. Ayrıca bu hataları tolere etmek istenirse, deney tasarım metoduyla farklı ölçülerde CAD modelleri üretilerek istenen ölçü değerine yaklaşılabılır.

TEŞEKKÜR

KÜ-BAP01 / 2016-61 proje numaralı bu çalışma Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğü BAP kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğüne teşekkür eder. Yazarlar; , Uzaras 3D yazıcı merkezi yönetim kurulu başkanı Mustafa Serdar Uzaras'a teknik destekleri için teşekkür eder. Yazarlar ayrıca Kastamonu Üniversitesi mühendislik ve mimarlık fakültesi dekanlığına vermiş olduğu maddi manevi desteklerden ötürü teşekkürü bir borç bilir ve teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Ian G., Rosen D.W., and Stucker B. (2010). *Additive manufacturing technologies*. Vol. 238. New York: Springer.
- [2] Kruth J-P., Leu M-C., and Nakagawa T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 47.2, 525-540.
- [3] Kaufui W.V., and Hernandez A. (2012). "A review of additive manufacturing." *ISRN Mechanical Engineering*.
- [4] Samuel H.H., et al (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.5-8, 1191-1203.
- [5] Sungil C., et al (2003). Evaluation of micro-replication technology using silicone rubber molds and its applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43.13, 1337-1345.
- [6] Fellner S., et al (2008). Mechanical properties of silicones for MEMS. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18.6, 065-068.
- [7] Prasad Y.KDV, and Hock T.S. (2003). Statistical analysis on accuracy of wax patterns used in investment casting process. *Journal of materials processing technology* 138.1, 75-81.
- [8] Ammen C.W. (2007). *Lost Wax Investment Casting*, Tab Books, USA, 1979.
- [9] Tang, Y., et al (2007). Micro-mould fabrication for a micro-gear via vacuum casting. *Journal of materials processing technology*, 192, 334-339.
- [10] Chung, S., et al (2003). Rapid fabrication of aluminum shoe mold using vacuum sealed casting process. *Journal of materials processing technology*, 142.2, 326-333.

PLA VE ABS İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARIN ELEKTRİK TÜKETİM MALİYETLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN ve Zekeriya YERLİKAYA

Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu/TÜRKİYE, fkartal@kastamonu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, filament kullanarak üç boyutlu yazdırma işlemi yapan Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ve Polylactic Acid (PLA) ile yazdırma arasındaki maliyet farklılıkları araştırılmıştır. Değişken parametreler olarak nozul ve ısıtma tablası sıcaklığı kullanılmıştır. ABS ve PLA filamentin kullanılarak üç boyutlu parçanın oluşturulmasında harcanan elektrik gücü karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda PLA ve ABS ile üretim yapabilmek için parametrelerinin minimum maliyet koşulları belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar açık kaynak kodlu yazıcıyla aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: 3 Boyutlu baskı; Hızlı prototipleme; Katkı imalatı; Hızlı takım; Dijital imalat.

COMPARISON OF OPERATING COSTS OF PLA AND ABS PRODUCED PARTS

Abstract

In this study, the cost differences between printing with Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Polylactic Acid (PLA), which perform three-dimensional printing using filament, were investigated. Variable parameters are nozzle and heating table temperature and used. The electric power used to create the three-dimensional part using ABS and PLA filament was compared. At the end of the study, the minimum cost conditions of the parameters were determined in order to produce with PLA and ABS. The experiment was conducted experimentally under the same conditions as open source printers.

Keywords: 3-D printing; Rapid prototyping; Additive manufacturing; Rapid tooling; Digital manufacturing.

1.Giriş

Hızlı prototipleme (HP) teknolojileri, farklı malzemelerinden başlangıç prototipleri üretme olanağı sağlar. Birleştirmeli yığılma modelleme (Fused Deposition Modeling (FDM)), plastikten elde edilen filamentler kullanılarak prototipler üretebilen HP prosesidir [1]. Birleştirmeli yığılma modellemesi HP işlemi endüstride çeşitli nedenlerden dolayı oldukça popülerdir. Bunlar; farklı hammaddeler (termoplastik) uygun sıcaklık nozulları olduğu sürece sınırsız kullanılabilir. Birleştirmeli yığılma modellemesi parçaları işlevsel parçalar olarak kullanılabilirler. Üç boyutlu yazıcılar ofis ortamında kullanılabilirler. Destek malzemelerini çıkarmak çok kolaydır. Bu işlem büyük olasılıkla en kolay HP işlemidir. Bununla birlikte, diğer birleştirmeli yığılma modellemesi tarafından üretilen parçalar, stereolitografi makinesi (Stereolithography Apparatus (SLA)), katı yüzey katılaştırması (Solid Ground Curing (SGC)) gibi diğer HP işlemleri tarafından üretilen parçalardan daha az hassastır. Ayrıca, birleştirmeli yığılma modellemesi işlemi hacmin her noktası tek bir makine parçasıyla işlendiğinden yavaştır. FDM prosesinde ana sorun ise merdiven etkisi (dikey eksen ve yüzey teğetleri arasındaki açı) nedeniyle yüzey pürüzlülüğüdür [2]. Kötü yüzey kalitesi, yüzeyin geometrisine, üretim stratejisine, katman kalınlığına ve parçanın işleme yönüne bağlı olarak HP parçalarının işlevini etkiler. Bu dezavantaj HP parçalarının avantajlarından daha da önemli olabilir [3]. Literatürde, bazı araştırmacılar, birleştirmeli yığılma modellemesi parçalarının yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için ABS malzemesinin kullanıldığı çeşitli yöntemler önermişlerdir. Önemli metotlardan biri, katman kalınlığı, ızgara genişliği, ızgara açısı, hava boşluğu gibi işlem parametrelerini kontrol etmektir. Bu yöntemde, üretim parametreleri deney tasarımı istatistiksel teknikler kullanılarak optimum işlem parametre değerlerini elde etmek için kullanılmıştır [3]. Üretim parametreleri, sistemi doğrusal olmayan bir şekilde etkiler, bu nedenle, toplam parça hassasiyetinin tahmini, yapay sinir ağına (Artificial Neural Network (ANN)) dayalı olarak yapılmıştır [4]. Yüzey pürüzlülüğünün ve imalat süresinin kısaltılması için Birleştirmeli yığılma modellemesi üretimi için uygun kaliteli parça üretimi elde etmek için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir [5, 6].

2 MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan 3B Yazıcı ve Malzeme

Bu çalışmada, FDM parçalar için yaygın olarak kullanılan bir materyal olan PLA malzemesi kullanılarak, numunelerin üretimi için açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 2). Parçanın CAD modeli SolidWorks paket programında hazırlanıp, malzeme oluşturulması için FDM makinesine giriş uzantısı (.stl) formatına dönüştürülmüştür. Parçalar, 0.200 mm sabit katman kalınlığına sahip PLA ve ABS eriyik malzemenin yığılması yoluyla katmanlar halinde oluşturulmuştur. Tablo 1’de Dream Maker 3B yazıcıya ait teknik kapasite özellikleri verilmiştir. Bu çalışmada üç boyutlu yazıcıların elektrik sarfiyatını ölçmede kullanılan TROTEC marka güç ölçer (Şekil 1) cihazına ait teknik özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcının teknik kapasite özellikleri

Baskı boyutu:	200 × 200 × 200 mm
Maks çözünürlük:	0.1 mm-0.4 mm
XY eksen konumlandırma doğruluğu:	0.012 mm
Nozul çapı:	0.4 mm
Giriş voltajı:	100 V-240 V
Çalışma gerilimi:	12 V
Uyumlu yazılım:	Cura, Slic3r
Dosya biçimi:	STL, G-kodu
Baskı Malzemesi:	PLA
Malzeme Çapı:	1,75 mm

Tablo 2. Kullanılan TROTEC marka güç ölçerin teknik özellikleri.

Çalışma voltajı	230 V / 50 Hz
Maksimum akım	16 A
Güç aralığı	2-3680 W
Minimum güç göstergesi	0,1 W
Minimum güç miktarı göstergesi (saat bazında)	0,01 kWh
Güç miktarı aralığı (saat bazında)	0,00-9999,9 kWh
Değer aralığı	0,00-9999



Şekil 1. Kullanılan TROTEC marka güç ölçerin görüntüsü



Şekil 2. Açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışma kapsamında Dream Maker 3B yazıcı ile PLA ve ABS filament kullanılarak yazdırma işlemi yapılmıştır. ABS malzemenin basılması için tabla sıcaklığı 110 °C nozul sıcaklığı 259 °C olarak ayarlanmıştır (Tablo 3). Buna göre yazıcı sadece açma düğmesine basılıp açıldığında 16,7 Watt güç harcamıştır. Bu harcanan enerji ısıtma için değil sadece elektronik devrelerin elektrik beslemesi ve sensörlerin çalışması için harcanmıştır. Öte yandan PLA filament kullanılırken de sadece sistem açıkken her hangi bir ısıtma olmadığına yine aynı güç 16,7 Watt harcanmıştır. PLA filament ile parça yazdırılırken toplam sistemin harcamış olduğu güç değeri ortalama 201,3 Watt olarak ölçülmüştür. PLA malzeme ile parça üretimi ABS ile üretilene göre toplamda % 16,15 daha düşük elektrik sarfiyatına neden olmuştur. Bunun nedeni olarak 110 °C tabla sıcaklığı yerine 50 °C olması ve 259 °C nozul sıcaklığı yerine 220 °C olmasıdır. Daha düşük sıcaklık değerleri harcanan elektrik sarfiyatını da düşürmüştür. Aynı obje ile hem ABS ile hem de PLA filamentler deneme yapılan bu ölçümde aynı yazıcı kullanılmıştır. Ayrıca ABS ile yazdırmada yazıcıda oluşan soğuma ve doğal hava akış türbülansları nedeniyle parçanın yazdırma anında yazdırma plakası üzerinden ayrılması gibi olumsuzluklarda görülebilmektedir.

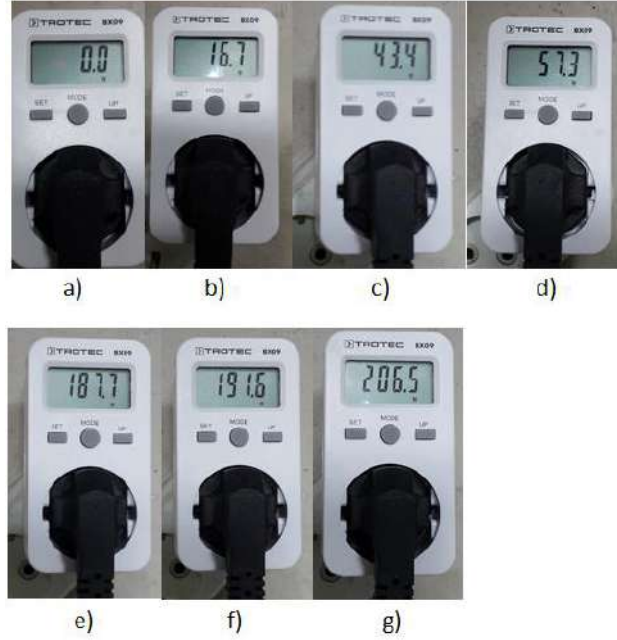
Tablo 3. ABS ve PLA filament yazdırılmasında gerekli tabla ve nozul sıcaklıkları

	Tabla sıcaklığı	Nozul sıcaklığı
ABS filament	100 °C	259 °C
PLA filament	50 °C	220 °C

Tablo 4. ABS ve PLA filament için harcanan güçlerin gösterimi
Çalışma koşulu harcanan güç (W/saat)

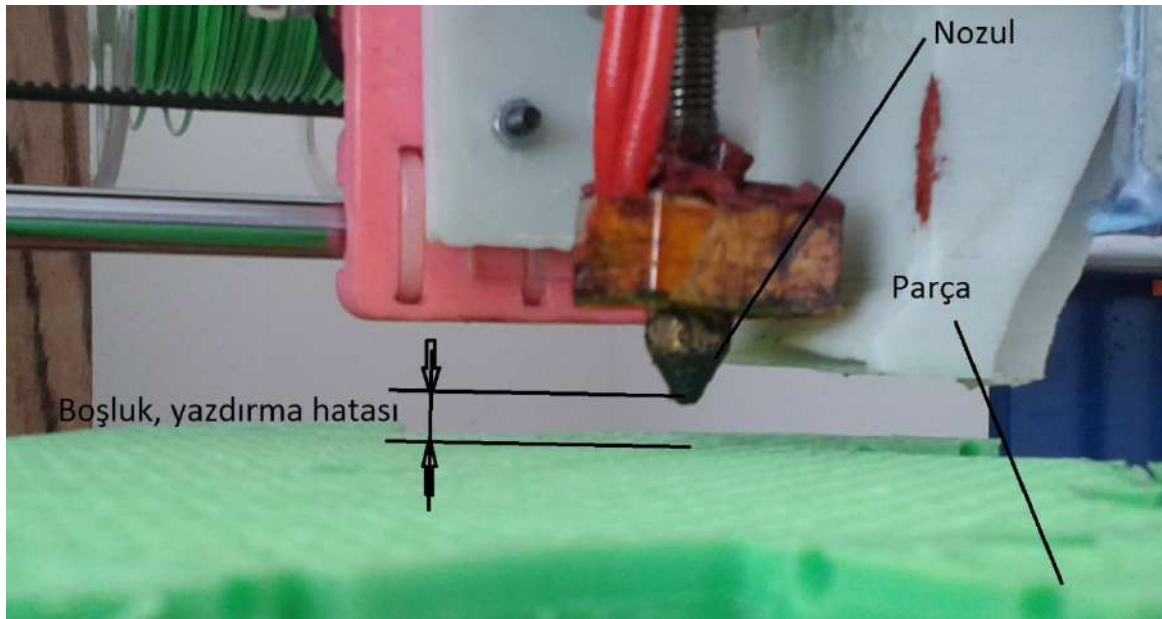
ÇALIŞMA DURUMU	Yazıcı açıkken	Sadece ısıtılırken	tabla	Sadece ısıtılırken	nozul	Nozul ve tabla ısıtılırken	Parça yapılırken	yazdırılırken
ABS filament	16,7	57,3		191,6		206,5		240,1
PLA filament	16,7	43,4		187,7		190,8		201,3
Fark (%)	0,00	24,26		2,04		7,60		16,15

Farklı koşullarda yapılan güç ölçümleri hem PLA ile yazdırma ile hem de ABS ile yazdırmada elde edilmiştir (Tablo 4). Tablo 4'e göre gösterilen ABS ve PLA filament için harcanan güçlerin ölçümünde kullanılan TROTEC marka güç ölçer ile yapılan ölçüm sonuçları (Watt) da ayrıca Şekil 3'te verilmiştir. Yazıcı açıkken (b), Sadece tabla ısıtılırken (c ve d), Sadece nozul ısıtılırken (e ve f), Nozul ve tabla ısıtılırken (g) , ölçüm sonuçları gösterimi (Şekil 3).



Şekil 3. TROTEC marka güç ölçer ile yapılan ölçüm sonuçları.

Ayrıca uzun süre ABS filament ile yapılan baskılarda, 259 °C gibi PLA ile basıma göre daha yüksek sıcaklıklarda olumsuzluklarla karşılaşılabilir. Bunlardan birisi nozulun tıkanması ki bu istenmeyen bir durumdur, yazdırma işlemi sırasında büyük parçalarda hem harcanan elektrik hem de harcanan filament ve zaman göz önünde bulundurulduğunda oldukça büyük maliyetler ortaya çıkmaktadır. Şekil 4'te ABS ile baskı yapılırken nozulun tıkanması ile baskı işleminin yarım kalması ve hurda maliyeti elektrik ve zaman maliyetinin artmasına neden olan bir örnek olay olarak gösterilebilir.



Şekil 4. ABS filament ile baskı sırasında nozulun tıkanması anı görüntüsü.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında denenen sınırlar içinde elde edilen bulgular sıralanacak olunursa;

- Aynı geometrik ölçülere sahip üç boyutlu parçanın PLA ile baskı maliyeti ABS ile üretilmesine nazaran % 16, 15 daha düşük olmuştur.
- PLA ile baskıda nozul tıkanması gibi olumsuz ve maliyet artırıcı bir etki gözlemlenmemiştir
- PLA ile üretim için ısıtma tablası sıcaklığı 50 °C olduğundan hem çalışma ortamının ısısını artırıcı etken olarak ABS ile üretime göre daha az etki oluşturmaktadır.
- PLA ile baskıda harcanan elektrik enerjisi ABS ye göre daha düşük olması ayrıca küresel ısınmaya olan etkiyi de bir ölçüde azaltıcı etken olmaktadır.
- ABS ile üretimde Tabla sıcaklığının 110 °C'ye çıkmasını beklerken harcanan süre ve ısı kayıpları PLA ile üretime nazaran daha fazladır.
- Yazıcıda kullanılan elektronik ekipmanlar nozul ve tablanın ısıtılmasında önemli rol oynadığı için daha yük sıcaklıklara çıkarabilmek için kullanılan Mosfet elektronik devre elemanları daha çabuk sıcaklıktan etkilenebilerek arızalanabiliyor.
- Ayrıca PLA ile üretim yapan yazıcılarda sensör arızalarına ABS ile üretim yapan yazılara göre daha az rastlanıyor.
- PLA ile üretimde sıcaklık düşük olduğu için yangın tehlikesi de ABS ye göre daha az risk faktörüne sahip olduğu da ayrıca söylenebilir.

TEŞEKKÜR

KÜ-BAP01 / 2016-61 proje numaralı bu çalışma Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğü BAP kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğüne teşekkür eder. Yazarlar; , Uzaras 3B yazıcı merkezi yönetim kurulu başkanı Mustafa Serdar Uzaras'a teknik destekleri için teşekkür eder. Yazarlar ayrıca Kastamonu Üniversitesi mühendislik ve mimarlık fakültesi dekanlığına vermiş olduğu maddi manevi desteklerden ötürü teşekkürü bir borç bilir ve teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Diane, S.A., Chu, K.R., and Montgomery, D.C. 1997. Optimizing stereolithography throughput. *Journal of Manufacturing Systems*, 16.4, 290-303.
- [2] Tymrak, B. M., Kreiger M., and Pearce J.M. 2014. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design* 58, 242-246.
- [3] Antonio L., et al. 2015. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal* 21.5, 604-617.
- [4] Lee, B. H., Abdullah J., and Khan Z.A.2005. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of materials processing technology* 169.1, 54-61.
- [5] Benjamin H.D., Nilsson S., and Poole C.M.2015. A feasibility study for using ABS plastic and a low-cost 3D printer for patient-specific brachytherapy mould design. *Australasian physical & engineering sciences in medicine* 38.3, 399-412.
- [6] Jeremy S., and Kerlin S. 2014. Development of a large, low-cost, instant 3D scanner. *Technologies* 2.2, 76-95.

STRUCTURAL COMPARISON OF THREE-DIMENSIONAL PRINTER APPLICATIONS USING CERAMIC AND PLASTIC MATERIALS WITH SENSITIVITY FEATURE

Arif ÖZKAN*, İrfan AKGÜL**

*Duzce University, Faculty of Engineering, Biomedical Engineering Department, Konurlap Campus DÜZCE, TURKIYE, arifozkan@duzce.edu.tr

** Duzce University, DÜBİT, Design and Prototyping Test Center, Konurlap Campus DÜZCE, TURKIYE irfanakgul@duzce.edu.tr

Abstract

Actual needs of the industry are changing very rapidly and determined by the non-traditional manufacturing methods according to appropriate time, cost and appropriate production. In this context, conventional manufacturing methods are not appropriate responsive to manufacturing for machine parts which are considered to be small in size and designed with CAD programs. In recent years, servicing with a very different methodology, a non-traditional manufacturing method called Three Dimensional (3D) printing, has emerged as the production process of multi-dimensional solid objects completed in the CAD Programs. In particular, these multidimensional printers, which serve many areas such as prototypes, demonstrations, aviation industry equipment, health applications, should be matched to the right technology in order to match the production capabilities in accordance with the developing technology and demand. For this purpose, production sensitivities at micron (μm) level and the recommendation of 3D printers using ceramic and plastic derivative materials are compared with real models and applications in this study.

Keywords: 3D Printing, Prototype, Manufacturing, Rapid Prototyping

SERAMİK VE PLASTİK MALZEME KULLANILARAK YAPILAN ÜÇ BOYUTLU YAZICI UYGULAMALARININ HASSASIYET UNSURU İLE YAPISAL KARŞILAŞTIRILMASI

Özet

Endüstrinin günümüzdeki ihtiyaçları çok hızlı değişmekte ve uygun zaman, uygun maliyet ve uygun üretim ekseninde geleneksel olmayan imalat yöntemleri ile belirlenmektedir. Bu bağlamda konvansiyonel ve geleneksel imalat yöntemleri boyutsal olarak küçük kabul edilen makine parçalarına tasarım sonrası imalatı açısından çok cevap üretememektedir. Son yıllarda pek çok farklı metodoloji ile hizmete sunulan geleneksel olmayan bir imalat yöntemi olan Üç Boyutlu Yazdırma, tasarımı bilgisayar ortamında tamamlanmış çok boyutlu katı nesnelerin üretim süreci olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle prototip, demonstrasyon, havacılık sanayi ekipmanları, sağlık uygulamaları gibi pek çok alanda hizmet veren bu çok boyutlu yazıcıların gelişen teknoloji ve talep ile uyumlu olarak üretim kabiliyetleri de kıyaslanarak doğru alan doğru teknoloji eşleştirilmesi yapılmalıdır. Bu amaçla seramik türevi ve plastik türevi malzeme kullanan yazıcıların mikron (μm) seviyesindeki üretim hassasiyetleri ve çözüm önerileri bu çalışma ile gerçek modeller ve uygulamalar üzerinden kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: 3B yazdırma, Prototip, İmalat, Hızlı prototipleme

1. GİRİŞ

Gerek mekanik gerekse mühendisliğin pek çok alanında tasarım safhası en önemli aşama olarak kabul edilir. İmalat için tasarım detaylandırma günümüzce katı modelleme teknikleri ve yazılım teknolojileri ile sanal ortamda yüksek doğrulukta yapılabilmektedir. Ancak sanal modeller çok boyutlu olmalarına karşılık karmaşık yapıya sahip özellikle çoklu (montaj) parçaların çok boyutlu modelleri için bir gerçek ortam modellemesi gerekli olmaktadır. Bu imalat öncesi nihai olmayan modellere prototip adı verilmektedir. Prototip üretiminin amacı imalat öncesi, tasarımın doğruluğunun, estetikliğinin ve işlevsel yönden yeterliliğinin değerlendirilmesi,

tasarlanan modelin üretilebilirliği, montaj edilebilme ve sökülebileme olanaklarının değerlendirilebilmesidir [1]. Buna yönelik olarak yakın geçmişte hızlı prototipleme teknikleri hayatımıza girmiştir. Hızlı prototipleme teknikleri farklı taleplere ve ortaya çıkan uygulama ihtiyacına cevap vermektedir. Kısa sürede üretim sayesinde makine, sağlık (tıp), otomotiv, uzay ve havacılık, elektronik ve ilaç sanayi gibi hizmet alanı geniş bir yelpazede tasarım doğrulama yapılabilmektedir. Yakın geçmiş ve günümüzde prototip ürünler özellikle uzay, havacılık, tanıtım ve reklam, medikal, elektronik ve otomasyon sistemlerinde son kullanıcı ürünleri olarak da kullanılmaktadır. Maliyetlerin üretimde ulaşılabilir seviyeye gelmesi tasarım aşamasında çalışan her aşamadaki çalışanın da dikkatini günden güne çekmektedir. Sanal ortamda tasarımı tamamlanan çok boyutlu modellerin kısa bir süre içinde prototiplerini imal edebilmek için hızlı prototip cihazları günümüzde neredeyse ev ortamında dahi kullanıma olanak verecek kolaylık ve hıza ulaşmışlardır. Bu cihazlar alışılmış imalat yöntemlerinde olduğu gibi dolu malzemeden talaşlı imalat yöntemlerinin tersine katman oluşturarak ve katmanları üst üste ekleyerek alışlagelmiş imalat yöntemleriyle üretilmeyen detaylara olanak vererek tasarımları üretirler.

Prototip üretiminde kullanılan katmanlı imalat yöntemi, yaklaşık 55 yıl önce başlamıştır. Ancak topografya ve foto-heykelticilik alanında kullanımı ise 100 yıl öncesine kadar gider. Hızlı prototipleme, 3DCAD verisinden, plastik veya metal malzemeden modeller üreten cihazların teknolojisine verilen genel bir isimdir. Model özelliklerini içeren topoğrafya detayında 1890'larda kullanılmaya başlanan bu teknoloji [2], endüstriyel alanda 1951'de Munz'un önerdiği stereolitografi teknolojisiyle başlar [3]. Yine bu alanda 1968'de Swainson iki lazer ışınının kesişme bölgesinde elde edilen polimerizasyon yöntemini geliştirerek ortaya çıkartmıştır [4]. Ciraud, 1971'de modern eklemeli imalat teknolojisinin bütün özelliklerine sahip bir toz birleştirme yöntemi geliştirmiş olup günümüzde yenilenmiş olarak hâlihazırda kullanılmaktadır [5]. 1979'da R.F. Housholder, lazer ile toz sinterlemenin ilk örneklemesini ifade ederek katmanları tabaka olarak düzlemsel oluşturarak belirli katman aralıklarıyla biriktirilmesini ve her tabakanın katılaştırılmasını ifade ederek yapılması gerektiğini açıklamıştır [6-9].

1980'lerin sonu ve 1990'ların başında, katmanlı imalat teknolojilerinin araştırma ve uygulama süreçlerinde artış olduğu görülmekte olup günümüzde bu artış hemen hemen her yıl kendisini katlayarak arttırmaktadır. Bu artış 2020 yılında günümüzde hemen hemen her evde kullanılan kağıt yazıcıların yanında gerek gıda gerekse mekanik üretim için kullanım alanı bulan 3B yazıcıların yine pek çok evde kendisine erişilebilir fiyatla yer bulabileceğini göstermektedir. Katmanlı imalatın etkisi, hem ticari hem de bilimsel faaliyetler açısından artarak önem kazanmakta ve hemen hemen imalatın olduğu her alanda tercih edilmektedir. Katmanlı imalat alanında, Dünya Teknoloji Değerlendirme Merkezi (WTEC) tarafından yapılan çalışmalarda katmanlı imalatla ilgili teknolojilerin endüstriyel uygulamalarını açıklamışlardır [7-9].

Türkiye'de katı modelleme esasıyla üretim ve uygulamayı içeren medikal kafatası ve yüz implant tasarımı ile imalatı ve cerrahisi uygulaması, 2003 yılında Dr. Sacit Karademir tarafından uygulamaya alınmış ve cerrahisi tamamlanmıştır [8-9]. Dünyada, katmanlı imalat teknolojileri ve servisleri için ayrılan bütçe günümüzde takı tasarımından sağlık sektörüne kadar geniş bir yelpazede yaklaşık olarak 20 Milyar Türk Lirası (₺) seviyesine ulaşmıştır. Katmanlı imalat teknolojileri için ödenen veya firmalarca ayrılan tasarım, ar-ge ve uygulama bütçeleri her yıl yaklaşık %10 oranında artmaktadır [9-10]. Bu artış oranının 2023 yılında %25'ler seviyesine geleceği ön görülmektedir. Ülkemizin 2023 hedefleri doğrultusunda imalat sanayinin gerekliliklerine cevap vermesi ve kalıp maliyetlerinde ve tasarım aşamasında tasarruf sağlaması adına kendi teknoloji ve malzemelerimizin ikame edilmesi ile önemli bir katkı sağlamak yine 3B yazıcı ve tersine mühendislik uygulamaları ile olacaktır.

Prototip, otomotiv, havacılık sanayi ekipmanları, sağlık uygulamaları gibi pek çok alanda hizmet veren bu çok boyutlu yazıcıların gelişen teknoloji ve talep ile uyumlu olarak üretim kabiliyetleri de kıyaslanarak doğru alan doğru teknoloji eşleştirilmesi yapılması gereklidir. Buna yönelik olarak bu çalışmada, seramik türevi ve plastik türevi malzeme kullanan yazıcıların mikron (μm) seviyesindeki üretim hassasiyetleri ve çözüm önerileri bu çalışma ile gerçek modeller ve uygulamalar üzerinden kıyaslanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Dünyada en çok tercih edilen teknolojiye sahip 3B yazıcıların bulunduğu Düzce Üniversitesi Tasarım Prototipleme ve Test Merkezi (DUTAP, www.dutap.duzce.edu.tr) sanayi ve akademinin hizmetine devlet desteği kullanılarak kurulmuştur. Bu merkez bünyesinde yer alan cihazlar ile bunların üç boyutlu baskı ürünlerine erişim yoğun bir akademik bir destek ile verilmektedir. Bu 3B yazıcıların kendi baskı dilleri 3D mekanik tasarım programlarından elde edilen üç boyutlu tasarımlar makineye gönderiliyor; orada makinenin baskı diline dönüştürülen 3D tasarım gerçek model olarak çıktı alınabilmektedir. Stereo Litografi adı verilmiş baskı formatı olan STL'i biçimi bu yazıcılar için kullanılmaktadır.

Temelini ve çalışma mantığını bildiğimiz baskı teknolojilerinden alıp çok farklı boyutlara ulaştırmış ve gelişmesine devam ettirmektedir. Bilgisayar ortamında 3 boyutlu programlarda tasarlanan veya hazırlanan, istendiğinde 3 boyutlu tarayıcılarla taranan (isteğe bağlı taranacak objeye, nesneye uygun) tarayıcılarla taranıp gerekirse bilgisayar ortamına alınan görüntü üzerinde düzeltmeler yapıldıktan sonra yazıcının baskı formatına (STL,ZPR) gibi çevrilerek yazıcıya yönlendirilmesi devamında gerçek modele dönüşüm sağlanmaktadır.

3B yazılımlarda hazırlanan tasarımlar yüzeyleri düzgün ve detay unsurları ne kadar hassas olursa hedeflenen baskı sonucu da bu hassasiyet kadar iyi olur. Güncel olarak Artık teknik okul ve üniversitelerde üç boyutlu tasarım dersleri verilmeye başlandığını göz önüne alırsak, 3 boyutlu baskı işinin çok hızlı talep gören bir alan olacağını da ön görmek zor olmayacaktır.

2.1. Seramik Tabanlı 3B Yazıcı

Düzce Üniversitesi Tasarım, Prototipleme ve Test Merkezi (DUTAP, www.dutap.duzce.edu.tr) altyapısında bulunan silisyum toz malzeme ve renklendirme malzemeleri ile çalışan 660 model cihaz kullanılmış olup teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. 660 Pro CMYK renklerle 6 milyon renk üretme kabiliyetine sahip olup parça uygunluğuna göre 4 farklı hassasiyet derecesinde 32 µm hassasiyete kadar üretim yapabilmektedir.

Tablo 1. Seramik malzeme kullanan 660 model yazıcı teknik özellikleri

Yazıcı Boyutları: 188 x 74 x 145 cm	Kartuş Sayısı : 5
Çözünürlük: 600 x 540 dpi	Dosya Uzantısı: STL, VRML, PLY, 3DS, FBX, ZPR
Renk: CMYK	Uyumlu İşletim Sistemi: Windows 7, Windows 8, MAC OS X
Katman Kalınlığı: 0,1 mm	Çalışma Sıcaklığı: 13 – 24 C
Dikey İşleme Hızı: 28 mm / sa	Nem Oranı: 20-55 %
Baskı Hacmi: 254 x 381 x 203 mm	Yazıcı Ağırlığı: 340 kg
Sarf Malzeme: VisiJet PXL	Sertifikalar: CE, CSA

2.2. Plastik Tabanlı 3B Yazıcı

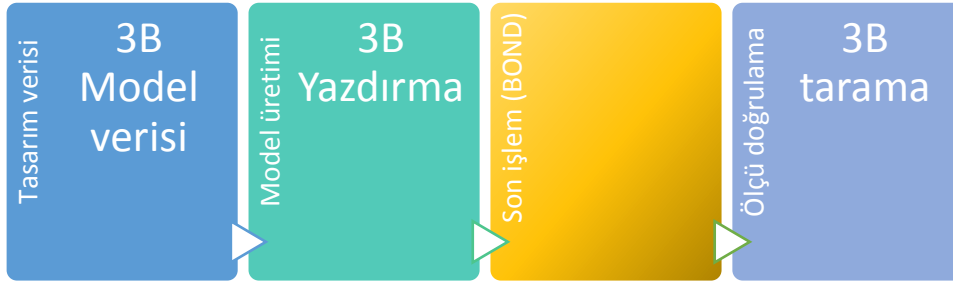
Plastik işlemleri yapan yine renkli çıktı alabilen 4500 model 3B yazıcı teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. 4500 model 3B yazıcı CMY renklerle 1milyon rengi yakalayabilmekte olup ihtiyaç duyulan parça veya tasarım için sektördeki 3B yazıcılar arasında kısa süre içinde baskıyı tamamlayıp işlem gerçekleştirilebilmektedir.

Her iki 3B yazıcı makinesinden biri silisyum, diğeri plastik ana malzeme ile çalışmaktadır. Her iki yazıcı için de kendi türünden hangi malzemeyi kullanırsanız ona yönelik baskı yapabilmektedir. Baskılarda baskı kafasını değiştirmeniz gerekmemekte olup, silisyum tabanlı 660 model cihaz dünyada en çok kullanılan makinelere birisi konumundadır. Bu makineden sonra sektör ve kullanıcılar çok daha fazla gelişme kaydetmiş olup bu çalışmada hareketli modeller de basılıp değerlendirilmiştir.

Plastik tabanlı 4500 3B yazıcının çok ince kafaları, üniteleri ve işlem yolları olup pürüzsüz son ürünler elde edilebilmektedir. Bu makinede 5 μ m'ye kadar hassasiyette baskı yapılabilmektedir. Mikron bazında tozun ve kafanın hassasiyeti sayesinde katman izi görünmeyen, pürüzsüz baskılar elde edilebildiği önerildiği için farklı geometriler için bu uygulama değerlendirilmiştir.

2.3. Tasarım Örneklerinin Baskıya Alınması ve Ölçümler

DUTAP merkezimize gelen ve gerçek ortamda hassas işler için sektör firmalarınca kullanılan 4 farklı tasarım ve 3B yazıcıların servis sağlayıcısı tarafından sağlanan 6 farklı model için üretim, uygulama ve karşılaştırma işlemi yapılmış olup hassasiyet durumları ölçülerek değerlendirilmiştir. Üretim sonrası ARTEC® EVA® ve ARTEC® SPIDER® model konum bağımsız tarayıcılar ile ürünler taranmış ve bilgisayar ortamında da ölçümleri sağlanarak baskı öncesi modeller ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Modellemeden doğrulamaya temel işlem basamakları

Modellere ait tasarımların 3B çıktıları Şekil 2.2'de verilmekte olup firmalarla yapılan anlaşma gereği tüm geometriler için görseller verilememektedir.





Şekil 2.2. Üretime alınan ve 3B çıktıları alınan modeller

3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

3B modellerin üretime alınması sonrasında ölçümleri tamamlanmış ve 3B konum bağımsız tarama cihazları ile gerçek ortam verilerinden tersine mühendislik işlemi uygulanarak CAD (bilgisayar destekli tasarım) verileri elde edilmiştir. Elde edilen CAD verileri ile üretim öncesi CAD verileri GEOMAGIC® yazılımında DÜTAP dahilinde karşılaştırılmıştır. Buna göre TABLO 2’de elde edilen değerlere ulaşılmıştır. Ölçüm için her modelden elde edilmiş olan bağlantı noktası veya taban ölçüleri kullanılmış olup bu ölçü değerleri üzerinden işlem yapılmıştır.

Tablo 2. Modellerin imalat öncesi ve sonrası ölçüm değerleri

Model Numarası	İmalat Öncesi Ölçü (mm)	İmalat Sonrası Taranan Model Ölçüsü (mm)	Sapma (mm)	Hassasiyet
1 (Seramik)	121.566	121.598	0.32	+
2 (Seramik)	12.498	12.491	-0.007	+++
3 (Seramik)	21.566	21.571	0.05	++
4 (Seramik)	14.224	14.230	0.06	++
5 (Seramik)	8.212	8.200	0.12	++
6 (Plastik)	11.542	11.541	-0.01	+++
7 (Plastik)	45.454	45.453	-0.01	+++
8 (Plastik)	12.547	12.547	0.00	++++
9 (Plastik)	82.784	82.785	0.01	+++
10 (Plastik)	2.409	2.409	0	++++

Bu çalışma dâhilinde kullanılan modellerin tamamı kendi alanlarında endüstriyel uygulama için son kullanıcı ürünleridir. Seramik (silisyum) malzeme ve mukavemeti yüksek plastik kullanan yazıcıda üretilen modeller genel olarak verilerindeki hassasiyeti elde edebilmektedir. Son işlem olarak yapılan kaplama diyebileceğimiz bond işleminde kullanılan yapıştırıcı türevi diyebileceğimiz sıvı ürün sonrası seramik türevli malzemede ölçü

hassasiyeti dâhilinde olan saplamalar plastik malzemeye göre daha fazla olmamakta olup olumsuz durum teşkil etmemektedir. Bu sapmaların 2 numaralı modelin kurutma süresinin artırılması ile çok daha uygun hale geldiği gözlemlenmiştir. Buna yönelik olarak üreticinin öngördüğü değerlere seramik türevli parçalarda erişmek için kurutma süresi ve kaplama işleminin akıtma yerine daldırma şeklinde yapılması ile ulaşılabileceği bu çalışma ile ifade edilmektedir. Ayrıca, çalışma içeriğinde olup, gizlilik esasına göre verilemeyen model verileri için de son işlem sıvısı için 3 farklı üreticinin kimyasalı denenmiş olup talep sahibin isteklerine yönelik yapılan uygulama sonucunda 21°C ortam sıcaklığı ve nemin iklimlendirme ile %30 seviyesine çekilmesi ile ulaşılabildiği ifade edilmiştir. Plastik tabanlı 3B üretim için kullanılacak kurutma süresi de yine parçanın esnekliğine doğrudan etkilidir. Buna yönelik olarak çalışma sonucunda ortam sıcaklığının 22°C ve nemin iklimlendirme ile %28-30 aralığında olması olumlu sonuç veren ortam değişkeni olarak elde edilmiştir. İklimlendirme denemeleri sonrası plastik ve seramik tabanlı yazıcıların aynı ortamda çalışmasında sakınca olmadığı ancak 30µm hassasiyet ve daha altında talep edilen modelleme ve üretim çalışmaları için mutlaka ayrı ayrı odalarda iklimlendirme şartlarıyla çalıştırılmaları gerektiği yine bu araştırma sonrasında elde edilen önemli bir değişken olarak ortaya çıkmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Doğu Marmara Kalkınma Ajansı (MARKA) TR42/14/004 no'lu Güdümlü Destek Projesi kapsamında ve Düzce Üniversitesi desteği ile yapılmış olup, 3D MAS A.Ş. ve TERVELLİ Endüstriyel Ltd.Şti firmaları tarafından desteklenmiştir. İlgili kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] B. Ozugur, "Hızlı prototipleme teknikleri ile kompleks yapıdaki parçaların üretilebilirliklerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [2] J.E. Blather, "Manufacture of contour relief maps", US Patent, #473,901 (1892).
- [3] O.J. Munz, "Photo-Glyph recording", US Patent, #2,775,758, (1956).
- [4] W.K. Swainson, "Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product", US Patent #4.041.476 (1977).
- [5] P.A.Ciraud, "Process and device for the manufacture of any objects desired from any meltable material", FRG Disclosure Publication, (1972).
- [6] R.F.Housholder, "Molding process", US Patent #4,247,508, (1981).
- [7] L.B. David, J.B.J. Joseph, C.L. Ming and W.R. David, "A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead", US-TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24, 5-1, (2009).
- [8] E. Negis, "A short history and applications of 3D printing technologies in Turkey", US-TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24, 23-30, (2009).
- [9] B. Çelik, F. Karakoç, M.C.Çakır, A. Duysak, Hızlı Prototipleme Teknolojileri Ve Uygulama Alanları, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 31, Ağustos 13 (2013)
- [10] T.Wohlers, "Wohler's report 2009", Wohlers Associates, Inc., (2009).

4. ENDÜSTRİ DEVRİMİ VE TÜRKİYE

Mehmet Cengiz KAYACAN^a, Koray ÖZSOY^b, Özden KOR^a

a, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta/TÜRKİYE
cengizkayacan@sdu.edu.tr, ozdenkor80@gmail.com

b, Süleyman Demirel Üniversitesi, Senirkent Meslek Yüksekokulu, Isparta/TÜRKİYE, korayoz-soy@sdu.edu.tr

Özet

Teknolojinin bugünkü gelişmiş seviyesine ulaşmasında önemli dönüm noktalarını endüstri devrimleri oluşturmaktadır. Endüstri Devrimi, en genel anlamıyla üretimde insan ve hayvan gücünün yerine makine gücünün etkin olduğu üretim şekline geçişi ifade etmektedir. Yeni buluşların üretime etkisi makineleşmiş endüstriyi ortaya çıkarmıştır. Dünyadaki toplumsal, ekonomik ve kültürel değişimlere yol açan Endüstri Devrimleri, belli aşamalarla, uzun sürelerde gerçekleşmiştir. Bu bakımdan günümüze kadar olan dönemde, birbirinden farklı etkilere sahip 3 farklı Endüstri Devrimi'nden söz etmek mümkündür.

Birinci endüstri devrimi (1.0) buhar gücünü kullanarak mekanik sistemler ve üretim tezgahları ile ortaya çıkmıştır. İkinci endüstri devrimi (2.0) ile elektrik enerjisi yardımıyla seri üretime geçilmiştir. Üçüncü endüstri devriminde (3.0) ise elektronik ve bilgi teknolojilerinin kullanımının gelişmesi ile üretim daha da otomatikleştirilmiştir. Dördüncü endüstri devrimi (4.0), gelişen bilim ve teknoloji sayesinde sanayideki mevcut üretim anlayışının yeniden şekillenmesi anlamına gelmektedir. Türkiye'nin 1'inci, 2'nci ve 3'üncü endüstri devrimini kaçırdığını, 4'üncü endüstri devrimini ıskalamaması gerektiği dile getirilmektedir. Endüstri 4.0 ile gelen yeni üretim biçiminde 3Boyutlu yazıcı teknolojilerinden nesnelerin internetine (Internet of Things-IOT) birçok teknoloji üretimde söz sahibi olacaktır. Çalışmada eklemeli imalatın üretim teknolojisine kattığı değer ve faydalar doğrultusunda 4. Endüstri Devrimi konsepti içerisinde önemli bir yere sahip olduğu vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Endüstri devrimi, Endüstri 4.0, 3B yazıcı, Eklemeli İmalat

4TH INDUSTRIAL REVOLUTION AND TURKEY

Abstract

One of the most significant milestones which lead current technology to it's advanced form are industrial revolutions. Industrial revolutions, in most general sense, can be expressed as replacing human and animal work production with a production type which mainly based on machine work. Effects of new inventions on production unearthed the mechanized industry. Industrial revolutions which leads global change in economics, societies and cultures, are completed with some stages within long time. Hence, it is possible to talk about three different industrial revolution which have different effects until this time.

First industrial revolution (1.0) was emerged with the mechanical systems and production tables by using steam power. With the second industrial revolution (2.0), mass production has been achieved with the help of electrical energy. Production process has been automated in the third industrial revolution with the development of electronical and information technologies. Fourth industrial revolution means reshaping the current production understanding through the developing science and technology. Turkey is said to have missed the 1 st, 2 nd and 3 rd industrial revolutions and the 4 th industry revolution should not be missed. The new production systems that arises with the Industry 4.0, have a major effect on many technological production as 3d printing technology, Internet of Things(OIT). In the article, it has been emphasized that the importance of contributions and evaluations on of additive manufacturing on production technology within the 4. Industrial revolution concept.

Key Words: Industrial Revolution, Industry 4.0, 3D Printing, Additive Manufacturing

3. GİRİŞ

Teknolojinin bugünkü gelişmiş seviyesine ulaşmasında önemli dönüm noktalarını endüstri devrimleri oluşturmaktadır. Endüstri devrimi, bu dönüm noktalarından birisidir. Endüstri Devrimi, en azından tarımın ve kentlerin icadından bilgi toplumuna gelinceye kadarki dönemde, dünya tarihinde gerçekleşmiş en önemli olaydır [1-3]. Endüstri Devrimi, en genel anlamıyla üretimde insan ve hayvan gücünün yerine makine gücünün etkin olduğu üretim şekline geçişi ifade etmektedir[4-8]. Avrupa'da derebeylik (feodal) rejimi, siyasal ve ekonomik düzenin gelişmeye kapalı yapısından kurtulmayı başardığı en önemli değişim "Endüstri Devrimi" olmuştur[4]. Teknik gelişmelerin birçok alanda üretim alanına uygulanmasıyla endüstri devrimleri doğmuştur. Endüstri devrimleri üretimde yeni bir çığır açmaktadır. Üretimde parça imalatını daha kolay ve seri bir hale getirmektedir. Üretim tarzının değişmesi sonucunda makineleşme ile birlikte yeni bir işçi sınıfının oluşmasına ve iş alanlarının artmasına yol açmış olup, dünyada toplumsal, ekonomik ve kültürel değişimlere neden olmuştur.

Endüstri Devrimleri, belli aşamalarla, uzun sürelerde gerçekleşmiştir. Literatürde göre endüstri devrimlerinin başlangıç ve bitiş tarihleri kesin bir tarihe dayanmamakla birlikte Endüstri devriminin başlangıcı, James Watt tarafından buhar makinesinin kullanılmaya başladığı 1765 yılı olarak kabul edilmektedir. Endüstri Devrimi, XVIII. yüzyılın ikinci yarısında "Buhar Makinası"nın icadı ile önce İngiltere'de, daha sonra Avrupa ve Amerika'da başlayan, ekonomik ve sosyal yapıda köklü değişimlere neden olan bir süreçtir[9]. Birinci endüstri devrimi (1.0) buhar gücünü kullanarak mekanik sistemler ve üretim tezgahları ile ortaya çıkmıştır. İkinci endüstri devrimi (2.0) ile elektrik enerjisi yardımıyla seri üretime geçilmiştir. Üçüncü endüstri devriminde (3.0) ise elektronik ve bilgi teknolojilerinin kullanımının gelişmesi ile üretim daha da otomatikleştirilmiştir. Dördüncü endüstri devrimi (4.0), gelişen bilim ve teknoloji sayesinde sanayideki mevcut üretim anlayışının yeniden şekillenmesi anlamına gelmektedir.

Türkiye'nin 1'inci, 2'nci ve 3'üncü endüstri devrimini kaçırdığını, 4'üncü endüstri devrimini ıskalamaması gerektiği dile getirilmektedir. Endüstri 4.0 ile gelen yeni üretim biçiminde 3Boyutlu yazıcı teknolojilerinden nesnelerin internetine (Internet of Things-IOT) birçok teknoloji üretimde söz sahibi olacaktır. Endüstri 4.0'ın ana yaklaşımı, üretim esnasında fabrikalardaki makinelerin, bilgisayarların, almaçların ve diğer tümleşik bilgisayar sistemlerin birbiriyle internet aracılığıyla bilgi alışverişinde bulunması, insanlardan neredeyse tamamen bağımsız olarak kendi kendilerini koordine ve optimize ederek üretim yapabilmeyi amaçlanmaktadır[10].

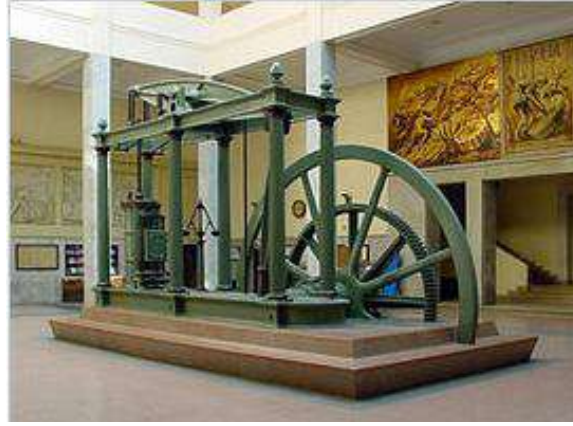
Bu çalışmada, endüstri devriminin tarihsel gelişimi, Endüstri devrimi (4.0) ve bileşenleri ve dördüncü endüstri devrimi yolunda Türkiye'nin durumu genel genel hatlarıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Eklemeli imalatın üretim teknolojisine kattığı değer ve faydalar doğrultusunda 4. Endüstri Devrimi konsepti içerisinde önemli bir yere sahip olduğu vurgulanmıştır.

4. ENDÜSTRİ DEVRİMİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Endüstri devriminin tarihsel gelişimi ve günümüz üretim süreçlerine gelmesini incelemek gerekir. Bu bakımdan günümüze kadar olan dönemde, birbirinden farklı etkilere sahip 3 farklı Endüstri Devrimi'nden söz etmek mümkündür.

4.1. Endüstri Devrimi (1.0)

Endüstri devrimi (1.0), 1765 yılında James Watt tarafından buhar makinesinin icadı ile başlayıp, 1830'larda elektrik teknolojisine gelişmeye başladığı yıla kadar devam eden süreçtir(Şekil 1).



Şekil 1: Bir Watt buhar makinesi görüntüsü[11]

Bu süreç, genel olarak üretimin, insan gücünden makine gücüne doğru bir geçişi şeklindedir. İnsan ve hayvan gücünden dayalı üretimden buhar gücüyle üretime geçiş ile üretim artmış olup, seri üretime geçilmiştir. Buhar teknolojisinin kullanılmasıyla makinelerin özellikleri büyük ölçüde artış göstermiştir. Bu süreçte kömürün yaygın kullanılması makinelerin daha da artmasına neden olmuştur. İngiltere’de başlayan ve ilerleme kaydeden Endüstri Devrimi, kısa sürede tüm Avrupa’ya ve ABD’ye yayılmıştır. Üretim yapısındaki bu köklü değişim, Avrupa’da siyasal, ekonomik ve toplumsal yapıyı büyük ölçüde değiştirmiştir. Çünkü makine gücünün kullanılması ve üretimin yaygınlaşması sonucunda, nüfusta artışı meydana gelmiştir.

Ayrıca günlük yaşam kalitesi büyük oranda kolaylaşmış ve böylece refah seviyesi yükselmiştir. Buhar gücüyle çalışan makinelerin üretimi kolaylaştırmasıyla, ürünler artmaya başladıkça ürünlerin pazarlaması ön plana çıkmıştır. Artık insan kaynağından sadece makine olarak değil de pazarlama yapacak bir beyin gücü olarak yararlanmak gündeme gelmiştir. Bu süreçte bilgi, beceri ve potansiyele sahip insana ihtiyaç duyulmuştur. Osmanlı devletinde esnaf teşkilatlarının etkisiyle utsa-çıracak ilişkisi içerisinde merkezi otoritenin kontrolü ile iş alanları meslek ile belirlenmiştir. Bu açıdan Endüstri devrimi (1.0) döneminde piyasa, arz ve talebe göre serbest girişim ve meslek icra edilememiştir[12]. 18. yüzyıldan itibaren ise sadece devlet eliyle askeri, ziraat gibi kısıtlı alanlarda olmak kaydı ile gelişmeler gözlemlenmiştir. Osmanlı devleti gelişmeleri takip edemediğinden, sanayileşen ülkelerin pazarı haline dönüşmüştür.

4.2. Endüstri Devrimi (2.0)

Endüstri Devrimi (2.0), bazı kaynaklarda “Teknoloji Devrimi” olarak adlandırılır. Bu devrim, 1840’lı yıllardan itibaren, teknolojiye üretimin makineleşmesinden sonra temelleri atılmaya başlamıştır. Endüstri devrimi (2.0)’ın ortaya çıkmasında elektrik teknolojisinin gelişmesi ve üretim bantlarında kullanılmaya başlanmasının büyük rolü olmuştur(Şekil 2).



Şekil 2: Elektrik enerjisinin yardımıyla iş bölüme dayalı üretim[13]

Ayrıca bu devrimin ortaya çıkmasında çelik, tren rayları, petrol, elektrik ve kimyasal tekniklerin gelişmesi etken olmuştur. Makinelerde buhar gücü yerine daha güçlü olan elektrik teknolojisinin kullanılması üretimin büyük oranda artmasına neden olmuştur. Böylece seri üretim kavramı ortaya çıkmıştır. Bu devrimin en

önemli katkılarında birisi de makine parçalarının aynı standarda sahip olarak üretilmesidir. Böylece parçaların tedariki kolaylaşmıştır[14,2].

Endüstri devrimi (2.0) dünyadaki ana öncüleri İngiltere, ABD, Almanya olmuştur. Bu devrim en iyi kullanan ülkeler ABD ve Almanya'dır. Bu teknolojik devrim ile dünya çapında uluslararası dev şirketlerin kurulmasına sebep olmuştur. Birinci Dünya Savaşı yıllarında Rusya, İtalya ve Kanada henüz Endüstri Devrimi (1.0)'a yeni başlamıştır. Bu ülkeler ile birlikte Japonya Endüstri Devrimine yeni başlamıştır. Fakat hammadde olarak çeliği ve demiri yaygın biçimde kullanması ve ağır sanayisini geliştirmesi nedeniyle Endüstri devrimi (2.0)'ın ana yürütücüsü olmuştur.

Osmanlı devleti makineleşme sağlayamadığından yurtdışından getirilen makineler ile bazı alanlarda fabrikalaşma gerçekleştirmiştir. Bu fabrika uygulamalarına örnek; Edirne'de İpek Fabrikası, Aydın'da Meyan Balı Fabrikası, Trablusgarp'ta Zeytinyağı Fabrikası ve Hereke'de Kumaş Fabrikası'dır. Osmanlı'da Tanzimat döneminden (1876) sonra Batı'ya açılımla birlikte ticaretin serbestleşmesi, ticari alanda verilen imtiyazlar ve gerekse tekel hakların kaldırılması sonucu yabancı ürünler karşısında sanayi ürünleri üreten esnaf zor duruma düşmüştür[13]. Küçük atölyeler, el tezgâhları kapanmaya başlamıştır. Lonca teşkilatı ise zayıflayarak ortadan kalmıştır. Bunun sonucunda işsizlik artmış, ülkenin iktisadi anlamda zayıflaması ile siyasi olarak çöküşünün hızlanmasına neden olmuştur. Sonuç olarak Endüstri Devrimi (2.0) Osmanlı devletini olumsuz yönde etkilemiştir[15].

4.3. Endüstri Devrimi (3.0)

20. yüzyılın ilk dönemleri, dünya savaşları nedeniyle pek çok ülkede, özellikle ilk iki endüstri devriminin öncüleri olan ülkelere, küresel krizin sebep olduğu olumsuz ekonomik gelişmeler nedeniyle endüstrileşme ve teknolojik ilerleme anlamında, önceki dönemlere kıyasla yavaşlama meydana getirmiştir[13]. 1950 sonrasında üretimde otomasyon için elektronik ve bilgi teknolojileri gelişmesi ile Endüstri Devrimi (3.0)'ın temelleri atılmıştır. Bu bağlamda, 1969 yılında ilk programlanabilir denetleyiciler (PLC) otomasyon sistemleri ile elektronik bilgisayar tabanlı tam otomasyonlu üretim süreci başlamıştır. Bu süreçte makineleri kullanacak insanın bilgisinin ve problemleri çözecek bilgisayar yetenekleri olması gerekmektedir. Artık insanın fizik gücü yerine bilgi gücüne duyulan ihtiyaç ortaya çıkmıştır (Şekil 3).



Şekil 3: Elektronik bilgi teknolojileri ile üretimde otomasyon[16]

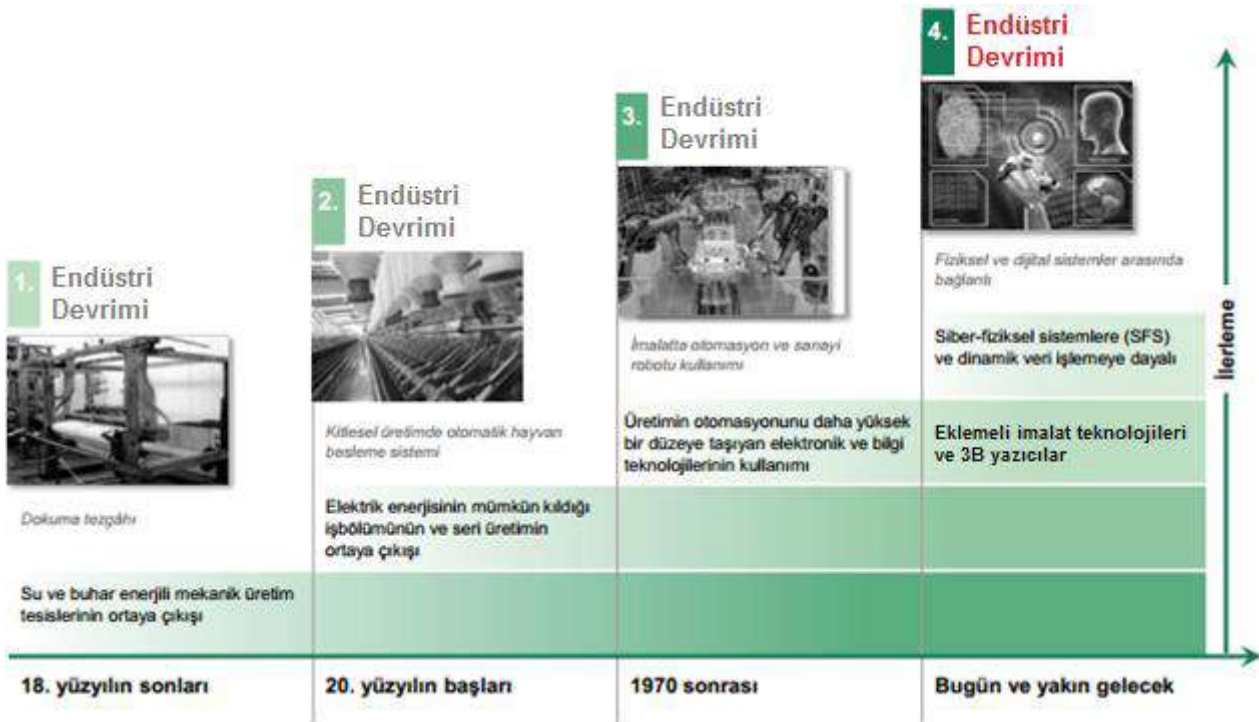
Endüstri Devrimi (3.0) literatürde sayısal devrim olarak adlandırılmaktadır. Sayısal devrim terimi mekanik ve elektrik sistemlerin 1980'den beri yerlerini sayısal sistemlere bırakmasını ifade eder. Sayısal mantık devrelerinin maliyetinin ucuzlaması ve buna bağlı olarak çoklu üretilmesi ile gerçekleşen bilgisayar gibi makineler önemli rol oynamaktadır[17]. Endüstri Devrimi (3.0) konusunda çalışan teorisyenler, bu dönemi bilişim ve iletişim teknolojilerindeki gelişme ile İnternet'in yaygınlaşmasının başlattığını ifade etmektedirler[18].

Günümüzde elektronik teknolojinin, bilgisayarların iletişim alanında yaygın olarak kullanılmaya başlaması ile elektronik haberleşme teknolojisinde hız ve yaygınlık kazanmıştır. Bu hız ve yaygınlık ile insanlar, kitle iletişim araçları ile bütünleşmiş dünyada yaşamını sürdürmektedir. Günümüzde medya olarak da bilinen kitle iletişim araçları, spordan siyasete, sanattan eğlenceye kadar bireysel ve toplumsal açıdan önemli ölçüde rol oynar[19].

Türkiye’de 1980 sonrasında endüstri devrimi etkili olmaya başlamıştır. Ülkemizde genel olarak yurtdışından ithal edilen makineler ile üretim yapılmaktadır. Ayrıca, mesleki ve mühendislik eğitiminin geç kalması ve yetersiz olması neticesinde yeni üretim teknikleri, Ar-Ge, yenilikçi (inovasyon) yaklaşımlardan uzak kalmıştır. Bu nedenle ülkemizden beklenen **“muasır medeniyet seviyesinin üstüne çıkma”** hayali gerçekleşmemiştir.

5. ENDÜSTRİ DEVRİMİ (4.0)

Geçmişten günümüze endüstri devrimleri incelendiği zaman yeni bir üretim yöntemine bağlı olduğu görülür. “Endüstri devrimi (1.0)” buharlı makinenin icadı, “Endüstri devrimi (2.0)” elektrik ile çalışan makinelerin kullanılması neticesinde seri üretim, “Endüstri devrimi (3.0)” elektronik ve bilgi teknolojileri gelişmesi ile sanayide otomasyon yaygınlaşmasıdır. İlk endüstri devriminden sonra Avrupa’da çıkan savaşlar ve ikinci endüstri devriminden sonra çıkan dünya savaşları endüstri devrimlerin gecikmeli olarak ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Endüstri devrimlerinin tarihi süreci incelendiği zaman, üretim sisteminde kolaylık sağlayan bir gelişme olduğu görülmektedir. Dolayısıyla dördüncü endüstri devrimi için de yeni bir imalat yöntemi ya da üretim sistemi olması gerekmektedir. Bu nedenle eklemeli imalat yöntemi içerisinde yer alan 3 Boyutlu yazıcı teknolojinin yaygın kullanılmaya başlaması Endüstri Devrimi (4.0)’ın temelini oluşturmaktadır(Şekil 4).



Şekil 4: Endüstri devrimin aşamaları[20]

Endüstri Devrimi (4.0) ilk kez 2011 yılında Hannover Fuarı’nda dile getirilmiştir. Endüstri devrimin tarihsel süreci incelendiği zaman, İngiltere ilk endüstri devrimine öncülük etmiştir. Dördüncü endüstri devrimine ise Almanya’da ortaya çıkmış olması itibarıyla, Avrupa’da yaygın biçimde bilinmekte ve küresel ölçekte de giderek daha çok tanınmaktadır. Endüstri devrimi (4.0)’ın çıkışını incelediğimiz zaman üretim gücünü Hindistan, Çin gibi ülkelere kaptıran Almanya ve ABD ülkelerinde insan gücünün üretimdeki etkisini azaltarak, daha fazla bilgisayar kontrollü makine gücüne dayalı bir üretim sisteminin kurma amacını taşımaktadır.

5.1. Endüstri Devrimi (4.0) Bileşenleri

Modern dünyada insanların ihtiyaçlarını hızlı, güvenilir ve yenilikçi bir anlayışla karşılamaya çalışan endüstri, hızla gelişen teknoloji sayesinde sanayide yeni bir reform olan Endüstri (4.0) dönemine girilmektedir. Şekil 5’de gösterildiği gibi günümüzde hızla yaygınlık kazanan Endüstri Devrimi (4.0)’daki temel amaç, tüm yazılımlar ve donanımlarda ürün geliştirme, üretim ve servis süreçlerinin iletişimi, makinelerin ve ürünlerin gerçek zamanlı bilgi alışverişi, otonom kontrol ve optimizasyonu, modüler yapıllı akıllı fabrikalar, fiziksel işlemleri siber-fiziksel sistemler, nesnelerin birbirleriyle ve insanlarla iletişime geçmesidir[21].

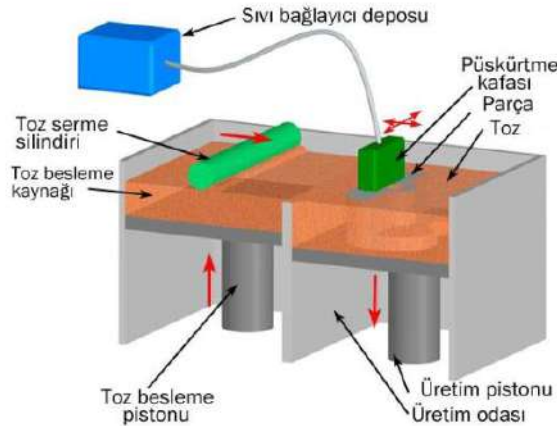


Şekil 5: Endüstri devrimi(4.0)'ın bileşenleri[14]

3.1.1. Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Üç Boyutlu Yazıcılar

Eklemeli imalat, modern (alışılmamış) imalat yöntemlerinden birisidir. Yöntemin temeli, birbiri üzerine kat kat malzeme eklemeye dayanmaktadır. Bu yöntemdeki amaç; geometrik karışıklığı sebebiyle geleneksel imalat yöntemleri ile imalatı mümkün olmayan parçaları imal ederek, imal edilebilirlik kısıdını ortadan kaldırmaktır. Son zamanlardaki literatür kaynaklarında da bu konu ile ilgili çalışmalara önem verildiği görülmektedir[22-24]. Eklemeli imalat yöntemleri, kullanılan ham malzeme ve katmanları birleştirme prensibine göre kendi içerisinde farklılıklar göstermekle beraber temel imalat teknikleri aynıdır. Bu konuda farklı imalat teknolojisi kullanarak imalat yapan birçok Eklemeli İmalat yöntemi bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak; Üç Boyutlu Yazıcı (3BY), Ergiterek Yığma ile Modelleme (EYM), Lazer Işığı ile Kütleme (LIK), Kat-kat Nesne İmalat (KNI), Seçici Lazer Sinterleme (SLS)/Seçici Lazer Ergitme (SLE) verilebilir.

3B yazdırma aynı zamanda "masaüstü imalat" olarak da bilinmektedir. 3B yazıcı, toz halindeki her hangi bir malzemeden inşa işlemini gerçekleştirebilmektedir. 3B modellerin yazdırma işlemi, mürekkep püskürtmeli yazıcılara oldukça benzer ekipmanlar ile katman katman gerçekleştirilir. İnşa işleminde çok ağızlı bir memeden yapıştırıcı püskürtülerek tozlar birbirine bağlanmakta, bir merdane ile yeni bir katman toz yayılmaktadır. İnşa işlemi bittikten sonra, parçayı çevreleyen ve aynı zamanda destek malzemesi görevi görmüş olan tozlar, vakum temizleyici veya fırçayla temizlenmektedir. Kullanılan malzeme ve uygulamaya göre, infiltrasyon ve sinterleme gibi değişik ek işlemler de yapılabilir[25,26].(Şekil 6)



Şekil 6: 3 Boyutlu yazıcının işlem şematığı[27]

3.1.2. Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin interneti denildiği zaman teknolojik donanım yeterliliğine ve internete sahip olan nesnelerin, internet vasıtasıyla gerekli olan birimlerle iletişim halinde olması şeklinde tanımlanır. Gelişmiş bir nesnelerin interneti sisteminde süreç nesneler tarafından takip edilmektedir ve herhangi bir aksaklık durumunda internet vasıtasıyla gerekli müdahalede yapılmaktadır. Bu sistem verilerin bireysel kaynaktan analiz edilmesini ve karar verme sürecini ortadan kaldırarak en etkin ve doğru seçim noktasında yeterli olanın karar vermesini sağlayacak bir sistem olarak düşünülebilir[28].

Nesnelerin interneti uygulamasına örnek olarak “Bosch Rexroth”, bir valf üretim tesisine yarı otomatik, merkezi olmayan üretim süreci kurulması verilebilir. Çalışmada ürünlere radyo frekanslı kodlarla işaretlenmiştir. Böylece her bir ürün hangi üretim aşamalarından geçtiğini bilmektedir ve yapılması gerekene göre hareket edebilmektedir[29].

3.1.3. Akıllı Fabrikalar

Akıllı fabrika denildiği zaman gelişmiş yazılıma sahip bir makine donanımının akıllı üretim süreci içerisinde karmaşık üretim süreçlerini sorunsuz olarak yürüterek daha kaliteli ve verimli ürünler üreten bir tesis olarak tanımlanabilir. Bu fabrikalarda sistem birbiri ile iletişim içinde, güvenlik öncelikli olarak gerektiği zaman üretime müdahale etme yeteneğine sahip, hammadde stok bilgilerinden ürünün depo kontrolüne kadar her türlü bilgiyi işleme prensibine dayalıdır[14].

3.1.4. Siber Fiziksel Sistemler

Siber kelime anlamı olarak bilişim sistemleri alt yapısına sahip olan sisteme verilen isimdir. Siber Güvenlik ise siber sistemdeki hayatımızın gizliliğinin bütünlüğü ve erişilebilirliği konusunda güvenliğinin sağlanmasıdır. Siber Güvenlik soyut ve geniş bir anlamda değerlendirilebilir. Siber Güvenlik genel anlamda bilgi ile etkileşimi olan uygulama, network vb. sistemlerin güvenliğinin sağlanmasını sağlayan danışmanlık, eğitim ve değerlendirme hizmetlerinin bütünüdür[30].

3.1.5. Büyük Veri

Büyük veri; toplumsal medya paylaşımları, ağ günlükleri, bloglar, fotoğraf, video vb. gibi değişik kaynaklardan toparlanan tüm verinin, anlamlı ve işlenebilir biçime dönüştürülmüş biçimine denir. Ayrıca büyük veri, veri tabanlarında tutulan yapısal verinin dışında kalan, son dönemlere dek çok da kullanılmayan, yapısal olmayan veri yığınıdır. Bilişim uzmanlarına göre yapısal olmayan veri değersizdir. Fakat büyük veri teknolojisi ile bilgi çöplüğü diye adlandırılan değersiz verilerden faydalanılarak önemli, kullanılabilir ve yararlı fikirler çıkarılmaktadır. Büyük veri; doğru analiz metodları ile yorumlandığında şirketlerin stratejik kararlarını doğru bir biçimde almalarına, risklerini daha iyi yönetmelerine ve inovasyon yapmalarına imkân sağlayabilmektedir[31].

3.1.6. Otonom Robotlar

Otonom robotlar, kendisine verilen bir görevi yerine getirmek için yöntem bulabilen ayrıca kendisini korumak için sensörler (algılayıcılar) yardımıyla çevreden elde ettiği verileri kullanarak olası tehlikeleri önlemek için statik veya dinamik olarak engellerden korunabilen otonom olarak görevleri yerine getirebilen elektromekanik cihazdır.

Topuz ve Yıldırım, yapmış oldukları çalışmasında, sonar algılayıcılar ve sezgisel yöntemler kullanarak, robotların engelden sakınım ve yol bulma probleminin çözümüne ilişkin bir otonom robot seyir sistemi geliştirmiştir. Bu kapsamda, laboratuvar ortamında kameradan alınan resim bilgisi, resim işleme teknikleri ile engelleri de içerecek şekilde harita haline getirilmiştir. Ayrıca, hibrit bir algoritma olarak tasarlanmış seyir sistemi içinde, genetik algoritma yardımıyla global yol bulma problemi çözülmüştür ve dinamik engellerden sakınmak amacıyla da çeşitli engelden sakınma yöntemleri uygulanmıştır[32].

3.1.7. Simülasyon

Simülasyon, genel anlamda bir şeyin benzeri veya sahtesi anlamında kullanılır. Teknik anlamda gerçek bir dünya süreci veya sisteminin işletilmesinin zaman üzerinden taklit edilmesidir. Nesneleri arasında tanımlanmış ilişkileri içeren sistem veya süreçlerin bir modelidir. Simülasyon gerçek dünya içerisindeki bir işlemin veya sistemin zamana bağlı taklididir. Simülasyon davranışı ilk olarak bir model geliştirilmesini gerekli kılar;

bu model seçilmiş fiziksel veya somut sistem ya da sürecin anahtar karakteristik özelliklerini veya davranış/fonksiyonlarını temsil etmektedir[33].

3.1.8. Sistem Entegrasyonu

Sistem entegrasyonu, birden fazla sistemin bir araya getirilerek tek bir sistem olarak çalışmalarını sağlamaktır. Sistem işlevselliğinin artırılabilmesi için birçok alt sistemin birbiri ile bütünleşik olması gerekmektedir. Bu yüzden birçok sistem birbiri ile etkileşime girebilir ve sayısal bilgi işleme ve ayarlamaya elverişlidir. Bu durumda çevreyle ilgili yapay bilgi ve öğeler gerçek dünyayla bağdaşabilmektedir[29].

3.1.8. Bulut Bilişim Sistemi

Bulut bilişim sistemleri, bilgisayarlar ve diğer cihazlar için, istendiği zaman kullanılabilen ve kullanıcılar arasında paylaşılan bilgisayar kaynakları sağlayan, internet tabanlı bilişim hizmetlerinin genel adıdır. Şirketler, bazı kurumsal ve analitik uygulamalar için hali hazırda bulut tabanlı yazılımlar kullanmaktadır[29]. Bulut bilişim bir ürün değil, hizmettir. Teknolojinin temelinde bilgilerin paylaşımı sağlanarak, bilgisayarlar ve diğer aygıtlara kadar temel kaynaktaki yazılım ve bilgilerin bilişim ağı (tipik olarak İnternet'ten) üzerinden kullanılmasıdır.

5.2. Endüstri Devrimi (4.0) Yolunda Türkiye

Dünyada üretimin kaynağı Asya iken, pazarı Avrupa konumundadır. Türkiye, Asya ve Avrupa arasında önemli avantaj sağlayan coğrafi konumu sayesinde ülkeler arasında ticaretin gelişmesi için köprü konumundadır. Türkiye, dünya ekonomisi sıralamasında 16. olmasına rağmen; küresel rekabette, yeniliklere, iş kolaylığından, eğitim kalitesine kadar birçok uluslararası sıralamada kendine yakışmayan bir tablo sergilemektedir. Yüksek orta gelirli ekonomiler arasında yer alan Türkiye'de imalat sanayi, teknolojik olarak alt seviyede kalmıştır. Fakat orta gelir grubunda bulunan Türkiye'nin yüksek gelirli ekonomiler arasına girebilmesi için, yüksek teknolojiye üretime geçiş yapması gerekmektedir[14].

Türkiye'nin bu üretime geçiş yapması için kas gücünden farklı olarak öğrenmeye açık, araştıran, sorgulayan, karşılaştıran ve akli melekeleri ile üreten dinamik bir insan kaynağına ihtiyacı vardır. Bu kaynağı oluşturacak dönüşümü ise hızla gerçekleştirecek, doğru hedefler koymalı ve bu hedeflere ulaşmayı kolaylaştıracak politikaları oluşturan yapısal reformlara ihtiyaç vardır. Fakat bu reformların statik değil, dinamik olması gerekmektedir. Hem özel sektör hem de kamu kurumları ve bürokrasi için devrimsel değişikliklere ihtiyaç vardır[10].

Türkiye'nin yeni endüstriyel devrimini yakalaması son derece kritik bir öneme sahiptir. Önceki endüstri devrimlerini geriden takip edebilmiş olan Türkiye, yeni endüstri kavramına baştan itibaren sıkıca sarılarak geride kalma riskini en aza indirebilir. Türkiye'nin sahip olduğu endüstriyel avantajlarını daha iyi kullanmaya başlaması ve bunu geliştirmesi gerekmektedir. Buna paralel olarak Türkiye'deki bilimsel kuruluşların ve üniversitelerin katkı sağlamaları için teşvik edilmeleri önemli avantajlar sağlayabilir. Türkiye'nin sanayi, teknoloji ve kalkınma politikalarının verimli hale getirilmesi ve ihtiyaç odaklı uygulamaların geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Büyüyen ve gelişen bir Türkiye için bizim bu devrimi kaçırma gibi bir lüksümüz yoktur. Türkiye'nin ülke olarak bu değişime ayak uydurması ve yakalandığı orta gelir tuzağından kurtulmak için tek çıkış olan AR-GE ve inovasyon kapısından yapısal ve kültürel bir değişim yaşayarak çıkması gerekmektedir. Endüstri (4.0)'daki gelişmeler bu geçişin hızla olması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Her ülkenin sanayi sektörü, Endüstri (4.0)'ı farklı hızlarda, farklı yaklaşımlarla uygulamaya başlayacaktır. Türkiye'nin Endüstri devrimi (4.0)'ı yakalanması için üretim noktasında çağın gereklerini yerine getirmesi hatta daha da geliştirmesi gerekmektedir. Türkiye'nin AR-GE, bilgiye ve teknolojiye dayalı olarak yeni ürünlerin oluşturulması, geliştirilmesi ve yeni üretim tekniklerinin geliştirmesine ihtiyaç vardır. Türkiye bu fırsattan ancak tüm paydaşları kapsayan, odaklı, eş güdümlü ve iyi tasarlanmış bir yaklaşımla yararlanabilir.

Türkiye'nin endüstri üretimindeki ve ihracatındaki teknoloji kullanma yoğunluğu, yüksek katma değerli ürünleri artırmasının gerekliliğini göstermektedir. Zira 2023 hedeflerimiz olan; 2 trilyon dolar milli gelir, 500 milyar dolar ihracat ve 25 bin dolar kişi başı gelire ulaşabilmenin yolu da buradan geçmektedir. Bu tezi destekleyen bir araştırma The Boston Consulting Group (BCG) tarafından yapılmıştır. Hazırlanan raporda; "Türkiye'nin üretim üssü statüsünü sağlama alması da, şirketlerin, Endüstri 4.0'ın getirdiği teknolojik avantajları ne kadar kapsamlı ve hızlı uygulayacaklarına bağlı olacak. Üretim üssü olma konusunda yarışan Türkiye için bu devrimin öncülerinden olmak bir tercih değil zorunluluk olmalı ve bu yolda adımlar hızlı atılmalı" diye belirtilmiştir[14].

6. SONUÇ

Türkiye'nin bilim ve teknolojiye yol arayan kırk yıllık bir geçmişi bulunmaktadır. Bugüne kadar ortaya konulan bilim ve teknoloji politika belgelerine bakıldığında, ortaya konulan hedeflerin gerçekleştiğini söylemek mümkün değildir. Türkiye tüm kesimlerce kabul gören bilim ve teknoloji politikaları, 2023 hedefleri ve strateji belgeleri küresel ve bölgesel denge düzeninin ihtiyaçlarına cevap verebilecek çok önemli adımlardır. Endüstri devrimlerinin tarihi süreci incelendiği zaman, üretim sisteminde kolaylık sağlayan bir gelişme olduğu görülmektedir. Dolayısıyla dördüncü endüstri devrimi için de yeni bir imalat yöntemi ya da üretim sistemi olması gerekmektedir. Bu nedenle eklemeli imalat yöntemi içerisinde yer alan 3 Boyutlu yazıcı teknolojisinin yaygın kullanılmaya başlaması Endüstri Devrimi (4.0)'ın temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda Endüstri Devrimi (4.0) ve takip edilmesi gereken milli politikalar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Endüstri devrimi (4.0) ve eklemeli imalat bilgi akışını başta eğitim camiası olmak üzere toplum katmanları arasında daha hızlı yaygınlaştırmak,
- Kronik sorununuz olan üniversite sanayi işbirliğinde dördüncü endüstri devrimi ve eklemeli imalat konularında güdümlü projeler ile daha sistematik gelişimini sağlamak,
- Akademiyada disiplinler arası çalışmalar yapılmalı, ancak dördüncü endüstri devrimi ve eklemeli imalat hakkında bu alanda özellikle yönlendirilmiş çalışmalar kurgulamak,
- Endüstri devrimi (4.0) ve eklemeli imalat alanında uluslararası güdümlü projelere katılmak ya da organize etmek,
- Eklemeli imalatla ilgili yetkin insan kaynağının yetiştirilmesidir.

5. KAYNAKLAR

1. Akagündüz, Ümüt, 2010. "Sanayi Devrimi ve Sanayileşme", Uygarlık Tarihi, Ankara, Pegem Akademi Yayıncılık, s.371-378.
2. Akbulut, U. 2011. "Sanayi Devrimleri Dünya Gidişini Değiştirdi," <http://www.uralakbulut.com.tr>, son Erişim tarihi: 05.01.2015
3. Başer N.E., 2011. "I. Sanayi Devriminde Teknolojik Gelişmenin Rolü", Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, 349s.
4. Küçükcalay M., 1997. "Endüstri Devrimi ve Ekonomik Sonuçlarının Analizi", Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi İdari Bilimler Dergisi, 2,51-68.
5. Güzel B., 2014. "Sanayi Devrimi'nin Ortaya Çıkardığı Toplumsal Sorunlarının Edebiyattaki İzdüşümü: Emile Zola'nın Germinal Örneği", Uluslararası Sosyal Araştırma Dergisi, 7,33,157-165.
6. Özdemir Ş., 2014. "Sanayi Devriminin Bilim Tarihi Üzerindeki Etkisi: Bilim ve Teknoloji İç İç", Üretim Ekonomisi Kongresi, 1-11.
7. Ege, B. 2014. "4.Endüstri Devrimi Kapıda mı?" TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, sayı 558.
8. Elwell F., "The Industrial Revolution" <http://www.faculty.rsu.edu/users/f/felwell/www/Ecology/PDFs/IndRevolution.pdf> Erişim Tarihi: 11.02.2017
9. Mahiroğulları A.,2005 "Endüstri Devrimi Sonrasında Emeğin İstismarını Belgeleyen İki Eser: Germinal ve Dokumacılar", İstanbul Sosyoloji Konferansları Dergisi, 32, 41-53.
10. Çeliktas S.M, vd., 2015."Endüstriyel Devrimin Son Sürümünde Mühendisliğin Yol Haritası", Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 56,Sayı 662,ss.24-34.
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_Revolution Erişim tarihi: 24.02.2017
12. Şener Ş., 2007. "Osmanlı Sanayileşme Süreci ve Bu süreçte Özel Girişimin Rolü", Dokuz Eylül üniversitesi, Sosyal bilimler dergisi, 9,3,56-90.
13. <http://www.corumhaber.net/kalkinmis-ulkelerin-sessiz-devrimi-makale,4895.html> Erişim Tarihi:12.03.2017
14. Yorgancılar E., 2015. "Sanayi 4.0", Ege Bölgesi Sanayi Odası Araştırma Müdürlüğü, s.56
15. <http://tarihportali.net/tarih-2/4-unite-18-yuzyilda-degisim-ve-diplomasi/sanayi-inkilabinin-osmanli-devleti-uzerindeki-etkileri/> Erişim Tarihi: 24.02.2017
16. <http://www.duyuguncesi.net/ucuncu-sanayi-devrimi/> Erişim Tarihi: 12.03.2017
17. https://tr.wikipedia.org/wiki/Say%C4%B1sal_devrim Erişim Tarihi: 24.02.2017
18. <http://www.duyuguncesi.net/ucuncu-sanayi-devrimi/> Erişim Tarihi: 24.02.2017
19. Oktay A., 1995, "Medya ve Hedonizm", Yön Yayınları, İstanbul ,s69.

20. Trenkle, A. 2014. "Industry 4.0 Challenges Applications and Potentials," Uluslararası İleri Endüstriyel Otomasyon Kongre ve Sergisi, 5 Aralık 2014, İstanbul
21. <http://siemens.com.tr/dijitalfabrikalar> Erişim Tarihi: 24.02.2017
22. Giannatsis, J., Dedoussis, V., 2009. Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 40, 116-127.
23. <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication> Erişim Tarihi: 24.02.2017
24. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A., 2013. Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 31,Ağustos 2013,53-69.
25. Duman B., 2016. "Seçmeli lazer ergitme ile metal parça imalatında Takım yolu belirleme ve eniyileme" Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,154s.
26. <http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/> Erişim Tarihi: 24.02.2017
27. <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering> Erişim Tarihi: 12.03.2017
28. <http://www.endustri40.com/nesnelerin-interneti-ve-endustriyel-uygulamaları/> Erişim Tarihi: 12.03.2017
29. Numanoğlu N vd., 2016. "Türkiye'nin Küresel Rekabetçiliği için bir Gerekliklik Olarak Sanayi 4.0",Mart,Yayın No:TUSİAD-T/2016-03-576 64s.
30. <https://www.turksat.com.tr/tr/bilisim/siber-guvenlik> Erişim Tarihi: 28.02.2017
31. https://tr.wikipedia.org/wiki/B%C3%BCy%C3%BCK_veri Erişim Tarihi: 01.03.2017
32. Topuz R., Yıldırım M.2016. "Sonar Algılayıcılar ve Sezgisel Yöntemler ile Otonom Robotlarda Engelden Sakınım ve Yol Bulma",El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 3, No:2,363-371.
33. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Sim%C3%BClasyon> Erişim Tarihi: 04.03.2017

KARBON FİBER TAKVİYELİ FİLAMENTLER KULLANARAK 3 BOYUTLU YAZICIDA BASILAN MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hüseyin KAYGISIZ ^a, Hatice YAKUT PEKTÜRK ^b ve Polat TOPUZ ^c

a, İstanbul Gedik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İstanbul / Türkiye huseyin.kaygisiz@gedik.edu.tr

b, İstanbul Gedik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İstanbul / Türkiye hatice.yakut@gedik.edu.tr

c. İstanbul Gedik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İstanbul / Türkiye polat.topuz@gedik.edu.tr

Özet

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, aralarında farklı ara yüzleri bulunan bir matrise gömülü veya bağlanmış yüksek mukavemetli ve modüler liflerinden oluşur. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, mukavemet, sertlik, iletkenlik vb. açısından mükemmel olduklarından, uçak yapısal elemanı, yel değirmeni kanadı, otomotiv dış paneli ve bilgisayar kullanımı veya dizüstü bilgisayarlarının muhafazası için yaygın olarak faydalanılmakta ve her yıl kullanımı artmaktadır. Kompozit malzemelerin üretimi karmaşık ve yoğun emek isteyen proseslerden oluşmaktadır. Üç boyutlu yazıcı teknolojileri ile kompozit malzeme üretiminin mümkün olabilmesi, başta emek, maliyet, zaman olmak üzere birçok avantaj sağlayacağı kesindir.

Bu çalışmada, kendi olanaklarımız ile ürettiğimiz ve FDM tekniği ile çalışan 3d yazıcı kullanılmıştır. 200x200x200 işleme alanına sahip bu yazıcı ile "ESUN" firmasının üretmiş olduğu "ePA-CF" (Karbon Fiber Dolgulu Nylol Filament) ve "PLA+" (Polilaktik Asit) filament malzemeleri kullanılmıştır. Aynı yoğunluk ve işleme şartlarında üretilen numuneler, mekanik özellikleri açısından kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzeme, ePA-CF, PLA+, FDM 3d Yazıcı

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS PRINTED IN 3D PRINTERS USING CARBON FIBER REINFORCED FILAMENTS

Abstract

Fiber-reinforced composite materials consist of fibers of high strength and modulus embedded in or bonded to a matrix with distinct interfaces between them. Carbon fiber reinforced composite materials are useful since they are excellent in strength, stiffness, conductivity, etc., and widely used for an aircraft structural member, a windmill wing, an automotive outer panel and computer uses or a housing of notebook computer and their needs are increasing year by year. The production of composite materials consists of complex and intensive processes. The ability to produce composite materials with 3d printer technologies is the key to many advantages including labor, cost and time.

In this work, we used 3d printer which we produce with our own facilities and work with FDM technique. "EPA-CF" (Carbon Fiber Filled Nylon Filament) and "PLA +" (polylactic acid) filament materials produced by "ESUN" are used with this printer which has 200x200x200 processing area. The samples produced at the same density and processing conditions are compared in terms of their mechanical properties.

Keywords: Fiber-reinforced composite material, ePA-CF, PLA+, FDM 3d Printer

1. Giriş

Kompozit malzemelerin günümüz teknolojisinde önemi hızla yükselmektedir. Özellikle plastik matrisli kompozit (PMK) malzemeler; uzay ve uçak sanayisinde, otomotiv endüstrisinde (piston, motor parçaları, fan ve kompresörde), spor ve deniz malzemelerinde; başka bir deyişle hafiflik, rijitlik, ısı direnci, yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci gibi birçok özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Temel olarak fazla ağırlık istenmeyen ancak mukavemetin fazla olması istenen yerlerde çelik ve benzeri metallerin yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Malzemede yerine göre sağlamlık, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ışınları, gibi) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel dille ısısal genleşme katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri değerlerin uygunluğu aranır. Bütün bu istenen özellikleri tek bir malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir durumdur. 1950'li yıllardan itibaren polimer kompozitler aranan boşluğu doldurmuştur [1,3,4].

Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitler (CFRTPC)'lerin yeni imalat sürecinin geliştirilmesi yıllarca birçok araştırma faaliyetinin konusu olmuştur. Bu malzemelerin üretiminde vakum şekillendirme, filament sarım, pultrüzyon, mesane destekli kalıplama ve sıkıştırma işlemi gibi işlemler yapılmaktadır. Bütün bu geleneksel işlemlerde karmaşık kalıplara ihtiyaç duyulmakta ve bu süreç pahalı ve zaman istemektedir. Karmaşık kompozit bileşenleri imal etmek zor ve hata oranı yüksek bir prosestir. Ayrıca, kontrol edilemeyen şekillendirme kalitesi ve düşük otomasyon derecesi, bu malzemelerin geniş endüstriyel uygulamalarının sınırlamalarıdır. Üretim sürecindeki yenilikler, bu malzemelerin gelecekteki gelişimi ve uygulanması için kritik ve acil önem taşımaktadır. [2,3]

Yığın biriktirme ile prototipleme (FDM) en yaygın kullanılan 3D Baskı (Katmanlı İmalat) teknolojilerinden biridir. Bu proseste, makaraya sarılı olan rulo halindeki filament, ısıtıcı nozzle'ın bulunduğu uca iletilir, burada erime derecesine kadar ısıtılan filament katmanlar halinde serilerek ürün inşa edilmiş olur.

Bu tür işlemlerde kullanılan en yaygın malzemeler amorf termoplastikler, akrilo nitril bütadien stiren (ABS), Poli laktik asit (PLA) malzemeleridir [5-6]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda bu malzemelere carbon fiber tekviyeler katılarak yeni filamentler geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır.

Tekinalp ve ark. [7], Zhong ve ark. [8] yanı sıra Ning ve ark. [9] kısa elyaf takviyeli akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) kompozitlerin 3D yazıcı ham maddesi olarak üretilebilirlik, mikro yapı ve mekanik performansı açısından araştırmışlardır. Gray IV ve ark. [10,11] FDM işlemi için termotropik sıvı kristal polimer (TLCP) lifleriyle takviye edilmiş polipropilen (PP) telleri geliştirmiş ve FDM işleme koşullarının kısa TLCP fiber takviyeli parçalara etkilerini araştırmıştır. Sözü edilen araştırma faaliyetlerine göre, kısa elyaf takviyesindeki sınırlamalardan ötürü plastik hammadde içine kısa elyaf eklenerek mekanik performansın sınırlı bir iyileşmesi, örneğin % 20'ye varan çekme mukavemeti elde edilmiştir. Böylece, Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitler (CFRTPC) bileşenlerini daha yüksek performansla imal etmek için FDM tekniğinin kullanılması, son birkaç yılda keskin ve disiplinler arası bir araştırma konusu haline gelmiştir.

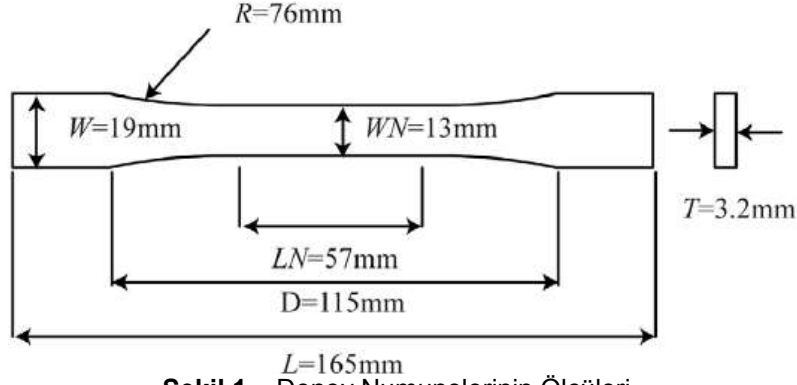
2014 yılında Mark Forged Company, CFRTPC'ler için sürekli fiber ve termal plastik matrisli pre-preg filament kullanan bir 3D yazıcı geliştirmiştir [12]. Proses kapasitesinin sınırlı olduğu, fiber içeriği ve ara yüzey performansı kontrol edilemediği görülmüştür.

Bu arada, Tian ve ark. [13] hammadde olarak elyaf ve plastik filaman kullanan CFRTPC'ler için yeni bir FDM süreci önermişlerdir. Önerilen sistem de baskı kafasının sıvılaştırıcısında emdirmeye ve ekstrüzyon aynı anda gerçekleşmektedir. Mekanizma ve performans, takviye fazı olarak karbon fiber ve matris olarak ABS kullanılarak incelenmiştir. Basılmış kompozit numunelerin eğme mukavemeti ve modülü yaklaşık 127 MPa ve 7.72 GPa olarak ölçülmüştür. Bu değerler geleneksel FDM ABS numunelerinden yaklaşık altı kat daha yüksek ve enjeksiyonla kalıplanan numunelerden üç kat daha fazla dayanıma sahip olduğu anlamını taşır.

Carbon fiber kompozitli malzemelerin 3d yazıcı teknolojileri ile üretiminin mümkün olabilmesi emek, maliyet, zaman başta olmak üzere birçok avantajlar sağlayacağı, üretim proseslerini çok kısaltacağı kesindir. Bu çalışma kapsamında piyasada en çok bulunan carbon fiber takviyeli filament olan ePA-CF ve PLA+ malzeme arasındaki mukavemet farklarını ortaya koymak amaçlanmaktadır.

2. Uygulama, Deney ve Yöntemler

Çalışma kapsamında, kendi olanaklarımız ile ürettiğimiz 200x200x200 işleme alanına sahip FDM tekniği ile çalışan 3d yazıcı ile ESUN firması tarafından üretilen ePA-CF filament ve PLA+ filament malzemeleri ile aynı yoğunluk ve işleme şartlarında deney numuneleri basılarak mekaniksel özellikleri araştırılıp kıyaslanmaya çalışılmıştır. Şekil 1’de basılan numune ölçülerini, Tablo 1’de filament üretici firmanın katalog verileri, aşağıda Tablo 2’de ise baskı parametreleri verilmiştir.



Şekil 1 – Deney Numunelerinin Ölçüleri

Numune geometrisi ASTM (American Society for Testing and Materials International) nin D638-14 numaralı standardına göre (ASTM D638-14 Plastiklerde Çekme Özelliklerinin Standart Test Yöntemi) Tip I geometrisi kullanılarak oluşturulmuştur.

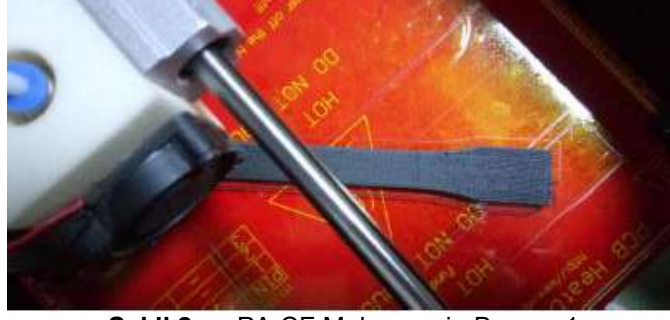
Tablo 1 – Filament Malzemelerinin Katalog Değerleri

Malzeme	Nozzle (mm)	Baskı Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime Akış İndeksi (g/10min)
PLA+	1.75	205-225	60-80	1.24	2(190C/2,16Kg)
ePA-CF	1.75	240-260	80	1.2	8(250C/5 Kg)

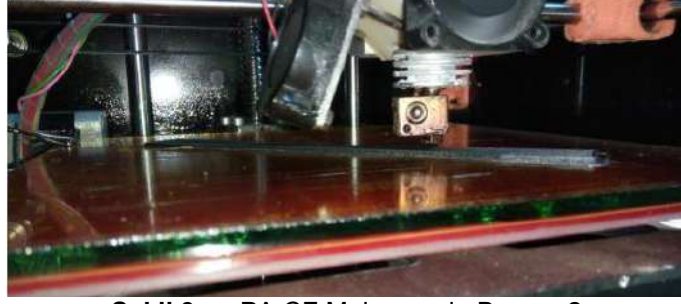
Tablo 2 – Test Numuneleri Baskı Parametreleri

Baskı Parametreleri	
Katman Kalınlığı (mm)	0.15
Kabuk Kalınlığı (mm)	0.8
Alt/Üst Kalınlığı (mm)	0.6
Doldurma Yoğunluğu (%)	100
Baskı Hızı (mm/dk)	40
Baskı Sıcaklığı – ePA-CF (°C)	250
Baskı Sıcaklığı – PLA+ (°C)	200
Tabla Sıcaklığı – ePA-CF (°C)	80
Tabla Sıcaklığı – PLA+ (°C)	60
Filament Çapı (mm)	1.75
Akış Oranı (%)	100

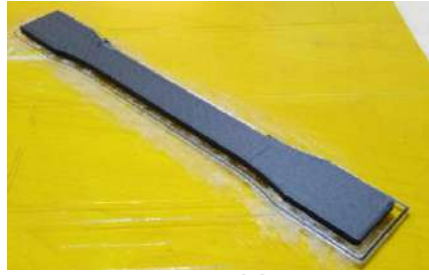
PLA+ ve ePA-CF 1.75 mm lik filament malzemeden 3 'er adet toplam 6 tane numune parçası basılmıştır. Numuneler Solidworks programında modellenmiş ve Cura programında kodları oluşturularak 3d yazıcıda inşa edilmiştir. Basma işlemi için Katman Kalınlığı 0.15 mm, Kabuk Kalınlığı 0.8 mm, Alt/Üst Kalınlığı 0.6 mm, Doluluk Oranı %100, Baskı Hızı 40 mm/dk ve Akış Oranı % 100 olacak şekilde parçalar basılmıştır. ePA-CF filamentten numuneler basılırken nozzle sıcaklığı 250 (°C), tabla sıcaklığı 80 (°C) olarak ayarlanmıştır. PLA+ filamentten numuneler basılırken nozzle sıcaklığı 200 (°C), tabla sıcaklığı 60 (°C) ayarlanarak baskılar yapılmıştır. Aşağıda Şekil 2,3 ve 4’de basılan deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 2 – ePA CF Malzemenin Basımı 1



Şekil 3 – ePA CF Malzemenin Basımı 2



(a)



(b)

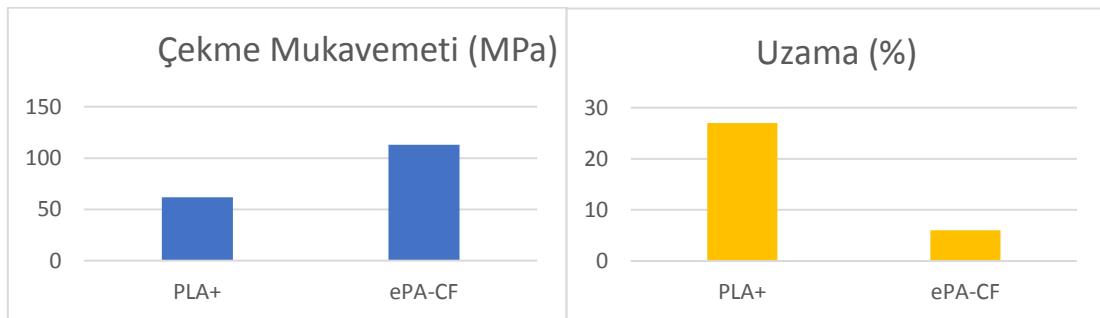
Şekil 4 – Printerden Çıkmış (a) ePA CF ve (b) PLA+ Malzeme

3. Sonuç ve Öneriler

Basılan numuneler, çekme testine tabi tutulmuş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

Tablo 3 – Çekme Deneyi Verileri

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
PLA+	61,9	27
ePA-CF	112,81	6



Şekil 5 – Deney Sonuçları (a) Çekme Mukavemeti, (b) Uzama

3d yazıcı ile üretilen malzemelerin dayanımları düşük noktalardadır, bu çalışma dayanımların nasıl artırılacağı yönündeki çalışmaların bir parçasıdır. PLA+ malzemenin çekme mukavemeti 61,9 MPa, ePA-CF malzemenin ortalama onun iki katı 112,81 MPa olduğu ölçülmüş ve karbon takviyesinin mukavemeti ciddi arttırdığı görülmüştür. Klasik prosesler ile üretilen karbon fiber malzemelerin çekme dayanımı 1500 MPa civarındadır, ST 52 nin 400 MPa, alüminyumun 350 MPa olduğunu düşünerek kıyaslarsak, endüstriyel anlamda kullanılmasını düşündüğümüz bu teknolojiler ile üretilen malzeme dayanımlarının daha yüksek noktalara ulaştırılması için çalışmaların devam ettirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Karbon fiber kompozitlerde, karbonun dayanımı artırma etkisi haricinde lifli örgü yapısının da etkisi büyüktür. Gelecek çalışmalarda 3d yazıcı uygulamalarında bu örgü yapısının nasıl oluşturulabileceği yönünde öneriler geliştirilebildiği takdirde bu ölçülen değerlerin daha yüksek mertebelere çekilebilmesinin mümkün olduğu tahmin edilmektedir.

4. Referanslar

- [1] Chen Qianqian, Boisse Philippe, Park Chung Hae, Saouab Abdelghani, Bréard Joël. Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes. *Compos Struct* 2011;93:1692–703.
- [2] Fujihara K, Huang Zheng-Ming, Ramakrishna S, Hamada H. Influence of processing conditions on bending property of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites. *Compos Sci Technol* 2004;64:2525–34.
- [3] Perrin F, Bureau MN, Denault J, Dickson JI. Mode I interlaminar crack propagation in continuous glass fiber/polypropylene composites: temperature and molding condition dependence. *Compos Sci Technol* 2003;63:597–607.
- [4] Mitschang P, Blinzler M, Wöginger A. Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends. *Compos Sci Technol* 2003;63:2099–110.
- [5] Turner Brian N, Strong Robert, Gold Scott A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: 1. Process design and modeling. *Rapid Prototyping J* 2014;20:192–204.
- [6] Turner Brian N, Gold Scott A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping J* 2015;21:250–61.
- [7] Tekinalp Halil L, Kunc Vlastimil, Velez-Garcia Gregorio M, Duty Chad E, Love Lonnie J, Naskar Amit K, et al. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Compos Sci Technol* 2014;105:144–50.
- [8] Zhong Weihong, Li Fan, Zhang Zuoguang, Song Lulu, Li Zhimin. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Mater Sci Eng, A* 2001;301:125–30.
- [9] Ning Fuda, Cong Weilong, Qiu Jingjing, Wei Junhua, Wang Shiren. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Compos B* 2015;80:369–78.
- [10] Gray IV RW, Baird DG, Bohn JH. Thermoplastic composites reinforced with long fiber thermotropic liquid crystalline polymers for fused deposition modeling. *Polym Compos* 1998;19(4):383–94.
- [11] Gray IV Robert W, Baird Donald G, Bohn Jan Helge. Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts. *Rapid Prototyping J* 1998;4(1):14–25.
- [12] Makeforged Company, US. <<http://markforged.com/>>.
- [13] Yang Chuncheng, Tian Xiaoyong, Liu Tengfei, Cao Yi, Li Dichen. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance, 2016. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098>.

Investigation of the FDM process performance at different printing parameters

Ebubekir ÇANTI^a, Mustafa AYDIN^{1a}, Ferhat YILDIRIM^b, Meltem GÜNAY^c, Bünyamin KAYA^{c1}

- a. University of Dumlupınar, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 43100, Kütahya
- b. University of Dumlupınar, Faculty of Simav Technology, Department of Manufacturing Engineering, 43100, Kütahya
- c. Nursan Wire Harness R&D Center, Tavşanlı, Kütahya Corresponding author: ebubekir.canti@dpu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, ticari bir ABS filament kullanılarak 3B yazdırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin yazdırma hızına bağlı değişimlerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında filament malzemesinin 230°C, 240°C ve 250°C sıcaklıklarındaki reolojik özellikleri Ergime Akış İndeksi (EAI) kullanılarak incelenmiştir. Numuneler farklı yazdırma hızlarında 3B yazdırılmış ve shore-D sertlik ve çekme testleri ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada baskı hızıyla baskı sonuçları arasındaki ilgi incelenerek yazdırma hızı seçiminin zaman maliyeti üzerine etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: ABS filament, 3B yazdırma, FDM, Yazdırma Hızı.

Abstract

In this study, it was aimed to investigate the changes in the mechanical properties of 3D printed samples using a commercial ABS filament depending on the printing speed. The rheological properties of the filament materials at 230°C, 240°C, and 250°C were investigated using Melt flow index (MFI). The samples were printed at different print speeds in 3D and examined for mechanical properties with Shore-D hardness and tensile tests. By examining the relation between printing speed and print results in the study, the effect of the printing speed selection on the time cost was evaluated.

Keywords: ABS filament, 3D printing, FDM, Printing speed.

1. Introduction

Additive manufacturing (AM) is a bottom up process based on creating objects directly from material layer by layer as opposed to traditional manufacturing methods that relies on subtraction of material from work piece. Because of this unique approach, AM allows to manufacture complex shaped parts with minimum scratch.

Different AM techniques have been developed in the literature, including Laminated Object Manufacturing (LOM), Stereolithography (SLA), and Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modelling (FDM). However, FDM is the most prominent and prevalent one due to simplicity of the FDM devices and wide availability of the materials [**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**].

Today, FDM is the prevalent AM technique within many areas such as automobile, medical implant, and aerospace etc. Achieving complex shaped parts easily makes it a good candidate beside allowing relatively short manufacturing time compared to traditional techniques [2]. For these reasons, the FDM market has experienced significant growth in recent years owing to rapid growing 3D printing technology and customer demand. Wide range of devices varying to intended use and materials to be used in these devices are present in the market today. 3D printer manufacturers give information about their products to configure settings for optimum printing. Also, the filament suppliers provide properties of their materials and suggest settings i.e. range of temperatures for nozzle and building platform etc. for printing [3]. However, printing results shows varieties according to selected printing parameters even if printing by printing settings. Therefore, effect of the printing parameters on the resultant properties of the printed part is still not certain.

Achieving desired part in short time is one of the pioneer motive for using FDM techniques. By adjusting printing parameters, printing time can be change but printed parts may differ from each other based on the parameter selection. In this paper, it was evaluated the effects of the printing parameters on the mechanical properties of the printed parts. For this purpose, 3 different nozzle temperatures of 230°C, 240°C, and 250°C, were used for printing beside using 3 different printing speeds of 30mm/s, 40mm/s, and 50 mm/s. 3 specimens were printed for the characterization and relation between printing parameters and result was investigated.

2. EXPERIMENTAL STUDIES

2.1. Used material and properties

The filament, which has a diameter of 1.75 mm, compatible with FDM printers was provided from a leading filament supplier offering a wide variety of filament for desired purpose. The product was classified as “Performance-ABS” in supplier catalog and any specific criteria was not considered for selection. The properties of the product were given in Table 1.

Table 1. Filament properties.

Property	Test Method	Value
Specific gravity	ISO 1183	1.05 g/cm ³
Tensile strength (@yield)	ISO 527	43 MPa
Elongation (@break)	ISO 527	40%
Flexural Strength	ISO 178	70 MPa
Flexural Modulus	ISO 178	2100 MPa
Rockwell Hardness (R scale)	ISO 2039-2	109

2.2. 3D printing of the filament

To investigate the effects of the printing parameters on the printing time and the properties, dog bone shaped specimens printed at speeds of 30 mm/s, 50 mm/s and 70 mm/s and nozzle temperatures of 230°C, 240°C, and 250°C. The printing was carried out by using a RepRap Prusa Mendel-i3 FDM printer shown in Figure 1. Usually, in FDM printing, a nozzle with a diameter of 0.4mm is used. However, in this study, a nozzle with an exit diameter of 1 mm was designed and employed prior to 3D printing to study in broader volumetric flow range thus observing the effects of printing time on resultant properties.

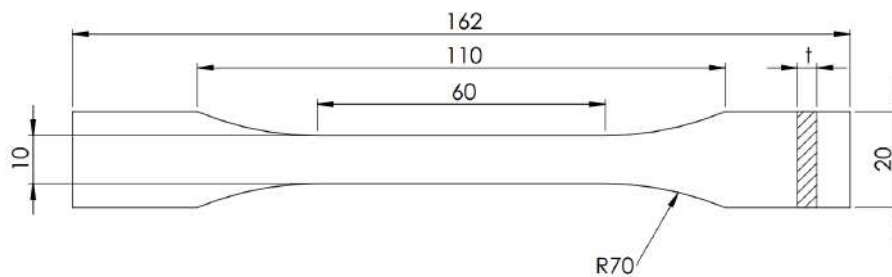


Figure 4. The tensile-test specimen, drawing and dimensions.

Modeling of the specimens was done in SolidWorks 2015 according to DIN EN 527-2 standard. The top view of the specimen with its dimensions was given in Figure 2. Initial design file was converted to STL format in the same CAD software and converted model was sliced by using Cura 15.04.4, an open source software, for printing. Also, printing parameters given in Table 2 was entered the Cura software for deriving of the G-codes.

Table 2. 3D printing parameters.

Parameters	Value
Layer Height	0.2 mm
Shell Thickness	1 mm
Bottom Thickness	1 mm
Fill Density	100%
Travel Speed	150 mm/s
Bottom Layer Speed	25 mm/s

**Figure 5.** Printed specimens

3. Results and Discussion

3.1 Printing Time

In FDM printers, deposition rate of the material is linearly related to the printing speed. Increasing the printing speed leads increasing deposition rate resulting the reducing printing time. Desired printing time can be achieved by configuring the printing parameters. For this purpose, the relation between printing time and the printing parameters was investigated.

In Figure 3, isometric view of the partly cut specimen was given with detailed view. Different segments of the specimen were illustrated. In Table 4, total the printing time given by the slicing software depending on the various printing speeds was given. To approximate the printing time given by the software, relation between deposition rate and time was investigated. Using the "curve fitting app" in MatlabR2014b, the curve of printing time corresponding printing speed graph was obtained.

$$f(x) = a + b * (x^c) \text{ (eq.1)}$$

Equation 1. was proposed to app and total printing time($f(x)$) corresponding to printing speed (x) was calculated. The equation constants a, b, and c were found as 6.913, 852.6, and -1.066, respectively. For printing at 5 to 100 mm/s the curve fit with slicing software data with an R-square of 0.9999 and an RMSE of 0.4665

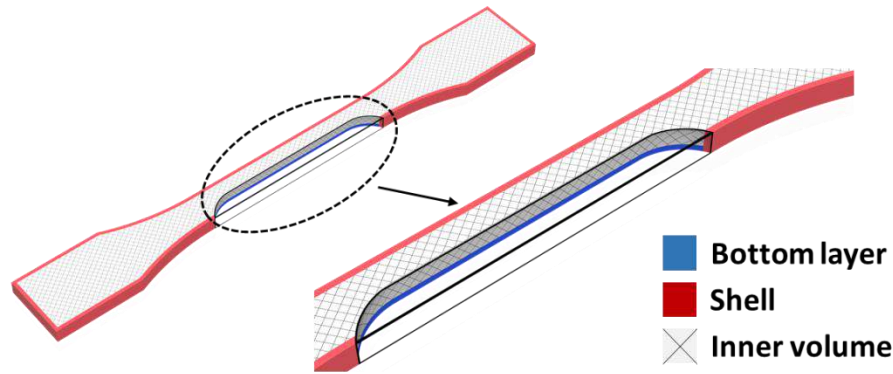


Figure 6. Segments of the specimens.

To calculate the actual deposition time in 3D printing another calculation was made based on the volume of part segments and printing speed. The test specimens have 3 regions as shell, bottom layer and inner volume shown in Figure 3. For all of the specimens, bottom layer was printed a speed of 25 mm/s. Corresponding volumetric flow rate of deposited material from the 3D printer nozzle to this speed was 5mm³/s. In the inner volume and shell areas, the printing speeds were equal to the selected speed, and the corresponding volumetric flow rates to these speeds were given in Table 4.

Table 4. Printing time corresponding printing speed

Printing Speed	Volumetric Deposition	Total Printing Time
30 mm/s	6 mm ³ /s	29 min
40 mm/s	8 mm ³ /s	24 min
50 mm/s	10 mm ³ /s	20 min
60 mm/s	12 mm ³ /s	18 min
70 mm/s	14 mm ³ /s	16 min

Volume of the test specimen's sections were as follows. Bottom layer volume was 1947 mm³. For inner and shell areas, volumes were 5843 mm³ and 1450 mm³, respectively. However, a value of 15% was set for infill overlap, a printing parameter in the slicing software, to connect shell and inner volume firmly. After making these correction, the total volume of inner section became 6057 mm³.

$$t(v) = \frac{V_{bl}}{5} + \frac{V_s + V_{iv}}{v} \quad (\text{eq.2})$$

According to these values actual deposition time can be calculated with equation 2. In this equation V_{bl} was bottom layer volume, V_s was shell volume and V_{iv} was inner volume. The equation calculates deposition time as a parameter of volumetric flow rate of corresponding printing speed.

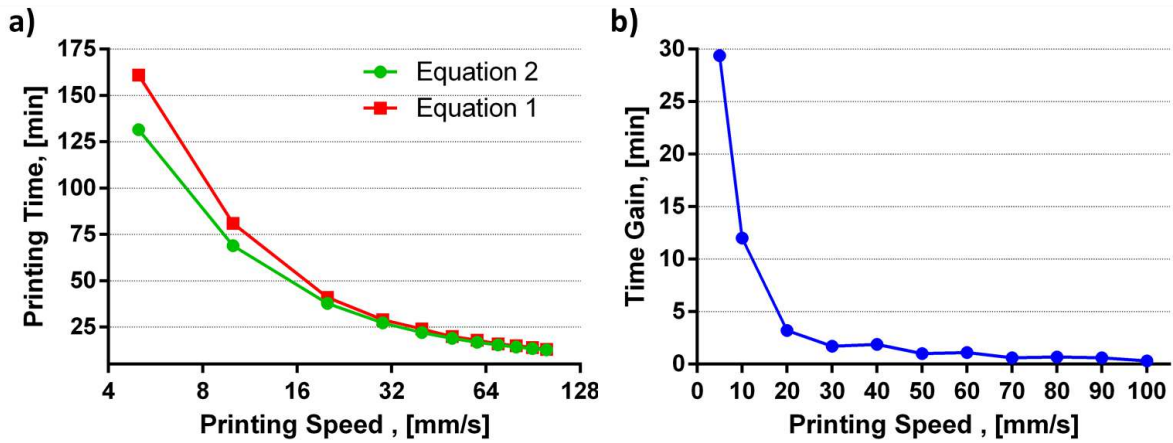


Figure 7. a) Printing time, b) Time gain, corresponding printing speed.

The difference between total printing time and deposition time is not useful for printing. Figure 4 shows the time gain corresponding printing speed. According to the result, discrepancy between total printing time and the time required for material deposition appears to be quite high at printing speeds below 20 mm/s. As printing speed increases, time gain decreases, while the printing speeds exceed 50 mm/s the time gain falls below 1 minute.

3.2. Melt Flow Index of the filament

Rheology of the material has a key role in FDM printing for easiness of the flow and printing flawless part. In order to examine the rheological behavior of the filament material, MFI test was performed on the filament. The filament was granulated prior to test and the test was carried out according to the ISO 1133-2 norm by using the CEAST MF20 tester shown in Figure x in the quality and assurance laboratory of the NURSAN company (Kütahya, Türkiye).



Figure 8. Melt flow index test equipment, CEAST MF20.

The tests were performed at 3 temperatures, 230°C, 240°C, and 250°C, under 3 loads, 1 kg, 2.16 kg, and 5 kg. The mold used in the test has a diameter of 2.095 mm and a length of 8 mm. The test software calculated the average values of the 40 measurement of the Melt volume rate (MFR), shear rate and viscosity. Outputs of the tests were used as the input data for plotting the graphs given in Figure 6.a, b. The Figure 6.a. shows the corresponding viscosity to shear rates at different temperatures under different loads.

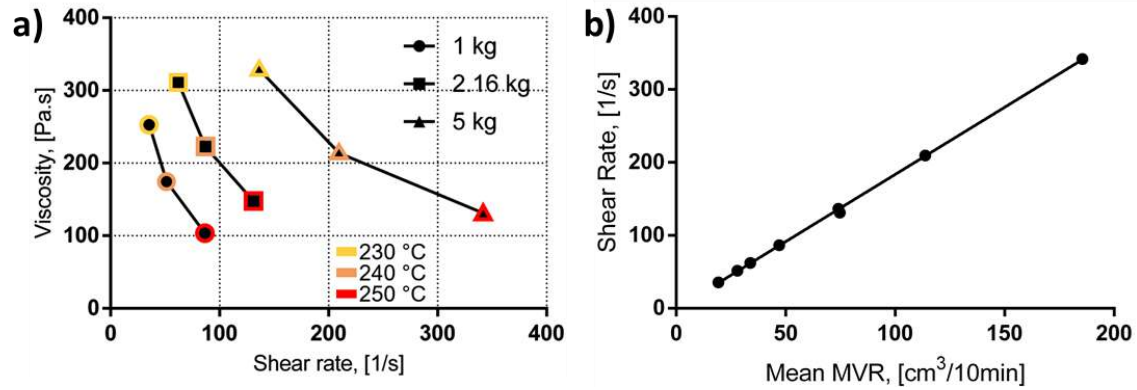


Figure 9. a) Viscosity vs. shear rate, b) Shear rate vs. mean MVR.

Under the same load, material viscosity decreases with increasing temperature. Volumetric flow of the material increases with increasing shear rate consistent with the literature [4]. A linear interpolation was performed on the 9 viscosity versus shear rate data. For an R^2 of 0.9995, and 1.842 of a curve slope, the graph was plotted in Figure 6.b.

Reduced printing time can be achieved by increasing deposited material requiring higher printing speeds. However, high volume deposition causes high shear rates in the 3D printer nozzle because of the narrow exit diameter usually has a diameter of 0.4 mm. High shear rates cause high shear stress on the inner walls of the nozzle requiring higher torques provided by step motor of the extruder head. However, increasing nozzle temperature can reduce viscosity and allow the higher shear rates caused by higher deposition. It is obvious that achieving higher deposition rates can be provided by increasing nozzle temperature. A temperature below the degradation temperature of the filament material allows higher printing temperature thus resulted with shorter printing time.

3.3. Hardness of the printed specimens

To investigate the hardness of the specimens, Shore-D hardness measurements were applied on them. Various measurements were done on bottom surface, which adjacent to the building platform, and its opposite surface named top surface.

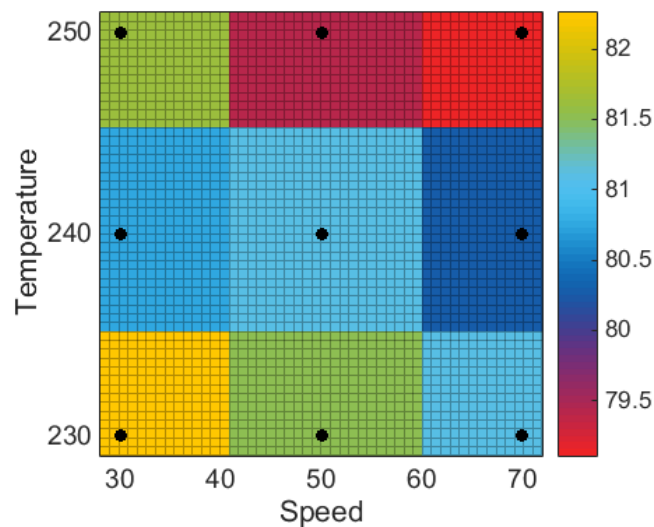


Figure 10. Top surface hardness vs printing speed and temperature.

At least 10 measurements were done on the surfaces. Average hardness of the bottom surface almost equal for each of the specimens. However, the hardness values on the top surfaces showed differences respect to bottom surfaces. In Figure 7, the average hardness of the top surfaces was shown depending on the printing temperature and printing speed. According to the results, top surface hardness reached its climax at low speed and low temperature printing, while it was minimum at high speed and high temperature printing. In Figure 8, average hardness comparison of bottom and top surfaces was shown respect to printing temperature. Results showed that the average hardness of the top surface decreases with increasing speed. Nonetheless, this decrease of around 1.7% can be assumed a minor change. For a printing speed of 30 mm/s, 50mm/s, and 70 mm/s printing time was 29 min., 20 min., and 16 min.

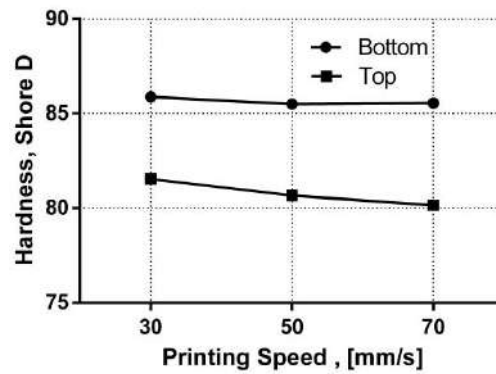


Figure 11. Average hardness comparison of bottom and top surfaces.

Increasing speed reduced printing time thus caused with shorter residence time on the heated building platform maintained at a temperature of 60°C. During the printing freshly deposited beads on the top layers always under the effect of rapid cooling, through the printing temperature to the room temperature. The hardness difference of around 5.5% between top and bottom surface can be attributed to this phenomenon.

3.4 Tensile Test of the specimens

The tensile tests of the specimens were carried out according to DIN EN 527-2 norm using Zwick Roell ZR-100 universal tensile test machine. Specimens were pre-stressed at 2 MPa and were stretched at a constant speed of 3 mm/s. Test results were plotted in figure 9.a as average mean UTS while elongation at break values were shown in Figure 9.b. As can be seen from the graphs, the highest UTS value of 73 MPa among all samples belongs to the specimen printed at a speed of 50 mm/s with a nozzle temperature of 230°C. The lowest UTS value of 66.4 MPa was belong to the one printed at a speed of 30 mm/s with a nozzle temperature of 250°C. The results showed that there was no direct relationship between the printing temperature, printing speed and resultant mechanical properties. However, the highest UTS value was reached at 50 mm/s printing speed among all samples. Maximum elongation at break value was 3.76% according to the tensile-strain graph shown in Figure XB, while the minimum value was 2.67%.

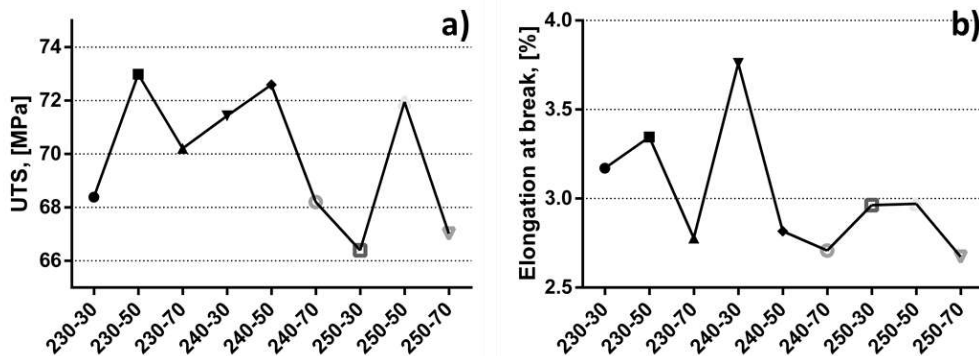


Figure 12. a) Average UTS, b) Average elongation at break, values of the specimens.

A difference of around 9% was present between the maximum and minimum of UTS values in the tensile test. However, the difference between the maximum and minimum of the elongation at break values went up to 29%. These facts lead to think that the resultant mechanical properties of 3D printed parts were profoundly related to the printing parameters even when the same printing material was concerned.

4) Conclusion

In this study, it was investigated the effects of printing parameters on the resultant properties of the 3D printed parts depending on printing temperatures and speeds. According to results;

- 1) Printing time decreases with increasing printing speed. Time gain is significantly high at low speeds.
- 2) Residence of the part on the building platform at a constant temperature can be possible cause of the hardness diversion between bottom and top surfaces. However, for a residence time of 16 min to 29 min, hardness change of the bottom surface was negligible.
- 3) There has been found any direct relation between printing parameters and UTS values. Yet, among all samples, in regard of the printing speed, a speed of 50 mm/s was resulted with the highest strength.
- 4) Also, there has been any observed relation between printing parameters and elongation at break values. Moreover, there was a difference of 29% between highest and lowest values.
- 5) Printing at very high speed by increasing deposition rate of the printer can be resulted with improper part geometry because of the high shear stress on the nozzle that can be resulted with clogging. To prevent this increasing speed with increasing temperature can be proposed.

References

1. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B: Engineering*, vol. 80, pp. 369-378, 2015.
2. Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L., Experimental investigation of time-dependent mechanical properties of PC-ABS prototypes processed by FDM additive manufacturing process, *Materials Letters*, vol. 193, pp. 58-62, 2017.
3. Nuñez, P. J., Rivas, A., García-Plaza, E., Beamud, E., & Sanz-Lobera, A., Dimensional and surface texture characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS plus, *Procedia Engineering*, vol. 132, pp.856-863, 2015.
4. Gültaş, A., Çankaya, A., Güllü, A., & Metin, G.Ü.R.Ü., Çinko Borat Katkılı Polipropilen'in Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no 2, 2014.

PLA FİLAMANT İLE ÜRETİLMİŞ PARÇA YÜZEYLERİNE ASETON BUHARININ PÜRÜZLÜLÜĞE ETKİSİ

Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN ve Zekeriya YERLİKAYA

Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu/TÜRKİYE, fkartal@kastamonu.edu.tr

Özet

3D baskı tasarımı, imalatı ve sanatla entegrasyonu, yapımcılar ve endüstrideki tasarımcılar tarafından kullanıldığı açıkça görülebilir. Ne yazık ki, endüstride 3D baskı kullanımı katkı maddesi üretimiyle sınırlıdır. Giriş seviyesinde kaynaştırılmış birikim modelleme genellikle zaman alıcı, yapı boyutu kısıtlamaları ve zayıf yüzey kalitesi gibi sınırlamalar nedeniyle hariç tutulur. Bu çalışmada açık kaynak kodlu yazıcılarda aseton buharının iş parçası yüzey kalitesine etkisi araştırılmıştır. Aseton buharı etkisini araştırabilmek için ısıtmalı buhar odası prototipi geliştirilmiştir. Aseton buharı kullanılarak iş parçası makro görünüm yüzey kalitesi üzerine etkisi araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Katmanlı üretim, 3D baskı, Ürün geliştirme, silikon kalıplama, RTV 2 silikon.

THE PERFORMANCE OF ACETONE VAPOR IS EFFECTED ON PLASTIC FABRICATED PARTS SURFACES.

Abstract

It is clear that 3D printing design, production and integration with art are used by producers and industrial designers. Unfortunately, the use of 3D printing in the industry is limited to the production of additives. Fused accumulation modeling at the input level is often excluded due to constraints such as time-consuming, structure size constraints, and poor surface quality. In this study, the effect of the acetone vapor on the workpiece surface quality was investigated in open source printers. A heated steam room prototype was developed to investigate the effect of acetone vapor. The effect on workpiece surface quality was investigated by using liquid acetone in different amounts.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, Product development, silicone molding, RTV 2 silicone.

1.Giriş

Son zamanlarda, piyasada farklı hızlı prototipleme teknolojileri görülmektedir [1]. Katmanlı üretim tekniği yeni olmasına rağmen, katmanlı imalat veya 3 boyutlu baskı fazlasıyla geliştirildi. Genellikle, profesyonel hızlı prototipleme sistemleri komple bir ünite olarak geliştirilir. Bu profesyonel makineler pahalı ve üretici odaklıdır. Katmanlı yöntemlerle üretilen makinelerin talebi 90'lı yıllardan beri giderek artmaktadır [1-3]. Hızlı prototipleme teknolojilerinin gelişimiyle, seri üretimin parçalarını çok kısa sürede elde etmek mümkündür [2-4]. Hızlı Prototipleme (Rapid Production (RP)) ile günümüzde prototipler biçim, uygunluk ve fonksiyonellik bakımından endüstride farklı alanlarda kullanılmaktadır. Tasarım mühendisleri dünya üzerinde Hızlı Prototiplemeyi ürünlerin şekil, üretilebilirlik ve rötuş yapmak (Finish) gibi karakteristik özelliklerini belirlemede kullanılır [1- 4]. Özellikle havacılık endüstrisinde kullanılabilecek parçaları ve kritik boyutlardaki parçalar gibi hassas parçaları imal etmek söz konusu olduğunda, yüzey pürüzlüğünü kontrol etmek zorunlu hale gelir [5-7]. Parçalar üzerinde iyi bir yüzey kaplaması, daha sonrasında yüzey pürüzlüğünün istenen düzeye getirilmesi için uygulanan rötuş işleminden kaynaklanan maliyetleri, süreleri ve boyutsal yanlışlıkları ortadan kaldırır [6,7]. Tüm katmanlı üretim süreçlerinde, CAD modelinin katmanlar halinde üretilmesi üretilen parçaya merdiven etkisi denilen karakteristik bir etki bırakır. Bu hata ortadan kaldırılamaz, ancak katman kalınlığını düşürerek azaltılabilir. CAD Modelindeki tüm kavisli yüzeyler bir dizi üçgen olarak yapılır, bu nedenle pürüzlü bir yüzeye neden olur [8,9]. Bu probleme yönelik kaba bir çözüm, yüzeye olumlu bir çıkıntı yapmak, prototip oluşturmak ve sonrasında gerçeğine yakınlaştırmak için yüzey bitirme (rötuş) işlemleri yapmaktır. Bununla birlikte, bu

asla mükemmel bir model oluşturmaz. Bu yüzey pürüzlülüğü hatasını tamamen ortadan kaldırmaz [5-10]. Dolayısıyla, sorunu belli bir seviyeye indirmek için bir çözüm bulunmalıdır. Bu hassas işlem ancak parametre kontrolü ile yapılabilir. İşlem parametrelerinin prototip kalitesi üzerindeki etkisini belirlemek için Deney Tasarımı teknikleri (Design of Experiment techniques) ile bazı çalışmalar yapılmıştır. Çalışmaların çoğu, stereolitografi (Stereolithography (SLA)) ve seçkili lazerli sinterleme (Selective Laser Sinterleme (SLS)) süreçleriyle ilgilidir [1-13]. Montgomery ve ark. [1] SLS makinesiyle bir deney gerçekleştirdi ve sonuç olarak tabaka kalınlığı ve parça uyumunun önemli olduğunu ve dahası kalın tabakaların dikey bir yönlendirme ile daha iyi yüzey kalitesi sağlayacağını belirtmişlerdir. Katmanlı üretim tekniklerinin katman kalınlığı ve uyumundan dolayı meydana gelen yüzey pürüzlülüğündeki direkt etkiler, diğer katmanlı üretim süreçlerinde daha iyi sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir. Montgomery ve ark. [2] deneysel tasarım tekniklerinin gerçek endüstriyel ürün ve süreç geliştirme problemlerine uygulanabileceğini göstermektedir. Armillotta ve ark. [3] birleştirmeli yığma modellemesi (Fused deposition modeling (FDM)) sürecinde yüzey pürüzlülüğü ile tabaka kalınlığı, uyumu, işleme genişliği (road width) ve ızgara açısı arasındaki ilişki üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Gautam ve ark. [4], yüzey pürüzlülüğü değerlerini uyumu ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak elde etmek için birtakım deneyler yapmış ve bu iki parametreye göre yüzey kalitesinin dinamik olarak renk-kodlu görselleştirilmesini sağlayan bir destek yazılımı geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada; Polylactic Acid (PLA) üç boyutlu yazıcıda üretilmiş parçalarının aseton buharı ile muamele edilmesi sürecinin makro yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki niceliksel etkileri araştırılmıştır.

2 MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan 3B yazıcı

Bu çalışma kapsamında açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı kullanılmıştır. Dream maker tamamen yerli tasarım olup Prusa vb. açık kaynak kodlu yazıcılara benzer özelliktedir. LCD kontroller sayesinde bilgisayardan bağımsız çalışabilmektedir. Tablo 1'de teknik kapasite özellikleri ve Şekil 1'de açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı görülmektedir.

Tablo 1. Kullanılan açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcının teknik kapasite özellikleri

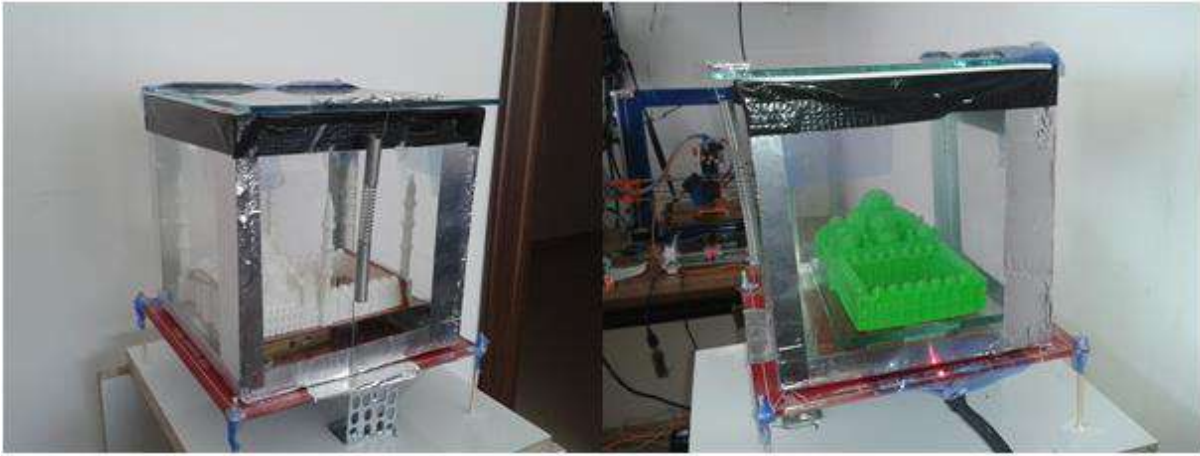
Teknik baskı	FDM (Eriyik Yığma Modelleme)
Baskı boyutu:	200 * 200 * 200 mm
Maks çözünürlük:	0.1mm-0.4mm
XY eksen konumlandırma doğruluğu:	0.012mm
Nozul çapı:	0.4mm
Giriş voltajı:	100V-240V
Çalışma gerilimi:	12V
Uyumlu yazılım:	Cura, Slic3r
Dosya biçimi:	STL, G-kodu
Baskı Malzemesi:	PLA
Malzeme Çapı:	1,75 mm



Şekil 1. Açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı

2.2. Deney koşulları ve aseton kimyasalı

Aseton, uçucu, kolayca alev alan, eter kokusunda renksiz sıvıdır. Kimyasal formülü, CH_3COCH_3 tür. Kaynama noktası $56,5\text{ }^\circ\text{C}$, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı $465\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Su ile her oranda karışabilme özelliğine sahiptir. Güvenlik tedbirleri dikkatlice düşünülmeliyse de, buhar uygulaması nispeten basit bir işlemdir. Öncelikle buhar odasının alt kısmı saf aseton ile kaplanır, uzun işlem süreleri için bu katmanın doldurulması gerekebilir. Bu deneyde buhar odası için cam bir kap kullanıldı ve cam odası daha iyi görünürlük sağladı. Oda daha sonra dijital olarak ayarlanabilir ve kontrol edilebilir bir platform üzerine konuldu (Şekil 2). Dakikada yaklaşık $10\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık artışıyla $50\text{ }^\circ\text{C}$ ' ye kadar ısıtıldı. Asetonun kaynatılmamasına ve odanın yeterince havalandırılmasına özen gösterildi. Ortamda ısıtma süresince bulunulmadı.



Şekil 2. Yalıtımlı cam aseton buhar odası ve elektronik kontrollü ısıtma düzeneği.

Deneyler gerçekleştirildikten üretilen parçaların pürüzlülük ölçümleri "Mitutoyo" SJ-301, masa üstü sütunlu ve yazılı çıktı alınabilen yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan yüzey pürüzlülüğü cihazının teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellikleri [27].

Model	SJ-301
Tarama hızı	0.25, 0.5 mm/s
Tarama kuvveti	4 mN ve 0.75 mN
Uç yarıçapı	2 μ m, 5 μ m
Ölçüm aralığı	350 μ m (-200 μ m... +150 μ m)
Filtre	Gaussian
Örnekleme uzunluğu	0.25, 0.8, 2.5 (mm)
Ölçme mesafesi	0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8 (mm)
Ölçülebilir değerler	Ra, Rz, Rmax

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Buhar odası kapalı iken, odanın iç kısmında yoğunlaşma oluşmuştur. Odanın içinde oluşan aseton buhar tabakasının yüksekliği içerisine eklenen sıvı asetona bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada 5 ml sıvı aseton kullanılmıştır. Odanın içindeki sıcaklığın 50 °C'nin üzerine çıkmasına izin verilmemesi ile birlikte buharı tutmaya yardımcı olması için asetona dayanıklı conta kapak kullanılmıştır. 50 °C'de kararlı bir duruma erişildiğinde, parçalar buhar kabı içerisine indirildi ve dışarıdan sıvı aseton enjekte edildi. Şekil 3'te, aseton buhar etkisi işleminden sonra yüzey numunelerinin makro görüntüsü göstermektedir. Çok düzgün olmakla birlikte, 5 dakika boyunca kimyasal etki edilen parçalar, katmanlar arasında meydana gelen boşluklar gözle görünür derecede kapandığı tespit edilmiştir.

**Şekil 3.** Aseton buhar etkisinin makro görünümüne etkisi.

Tablo 3'te aseton buharı işlem öncesi ve sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. 0,150 mm katman yüksekliğinde aseton buhar etkisi olmadan yazma katmanına 90° açıda işlem öncesi ortalama yüzey pürüzlülük değeri 8,65 μm iken aseton buhar tesir işlemi sonrası ortalama pürüzlülük değeri 0,121 μm olmuştur. Dikey yönde % 98,60'lık bir yüzey pürüzlülük değerinde düşüş meydana gelmiş ve gösel kalitede artış olmuştur. İş parçasının yüzey pürüzlülük değerinin katmanlar arasında oluşan boşluklar ve yığılma farklılıkları meydana getirdiği söylenebilir. Öte yandan yazma katmanı boyunca yatay yönde yüzey pürüzlülük değeri aseton buhar etkisi olmadan ölçüldüğünde 2,360 μm ortalama yüzey pürüzlülük değeri elde edilirken, aseton buhar etkisi sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0,123 değerine düşmüştür. İşlem öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değeri düşüş % 94,79 olmuştur.

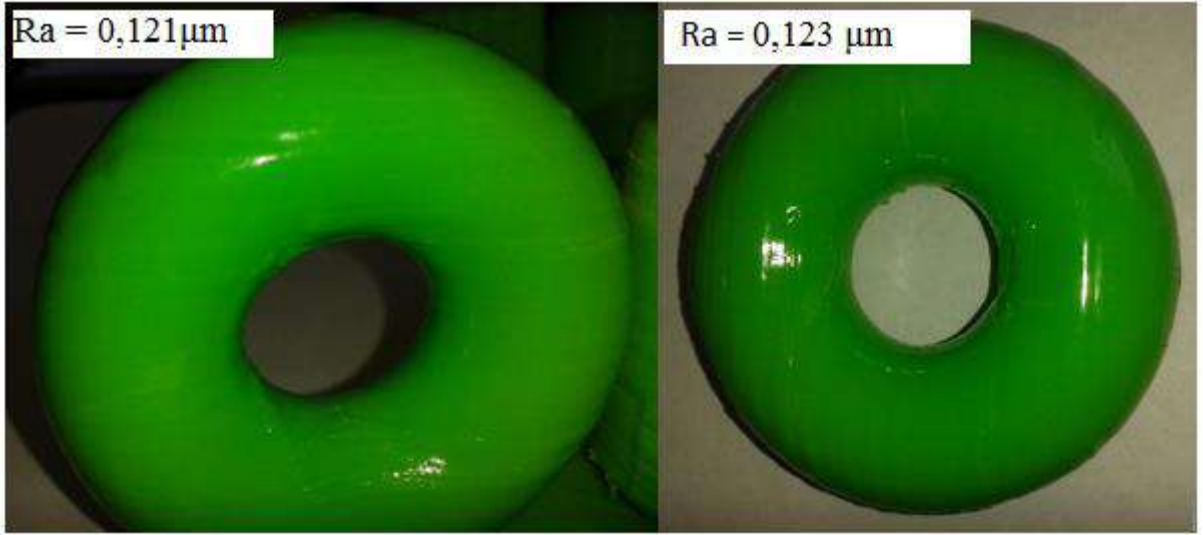
Tablo 3. Aseton buharı işlem öncesi ve sonrası ortalama pürüzlülüğü değerlerinin karşılaştırılması.

Katman yüksekliği (mm)	Ölçüm yönü	İşlem öncesi ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)	İşlem sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)	Pürüzlülük değerinde azalma (%)
0.150	Dikey	8,650	0,121	98,60
	Yatay	2,360	0,123	94,79

Şekil 4'te aseton buharına 15 dakika süre boyunca 50 °C sıcaklığa maruz kalmış iş parçasında kimyasal erime başlamış ve yerçekimi etkisi ile malzemede çökme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çalışma ön deneylerinde aseton buhar odasında 50 °C de bekleme süresi 5 dakikada elde edilen makro yüzey kalitesi PLA filament ile üretilmiş parçalar Şekil 5'te gösterilmiştir.

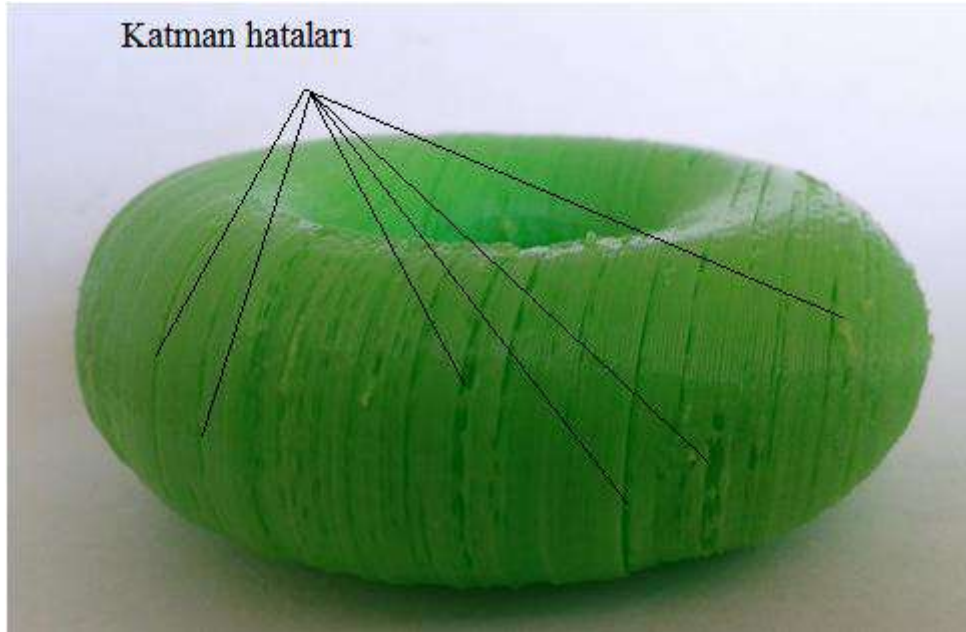


Şekil 4. Aşırı aseton buharına maruz kalmış PLA parça görüntüsü.

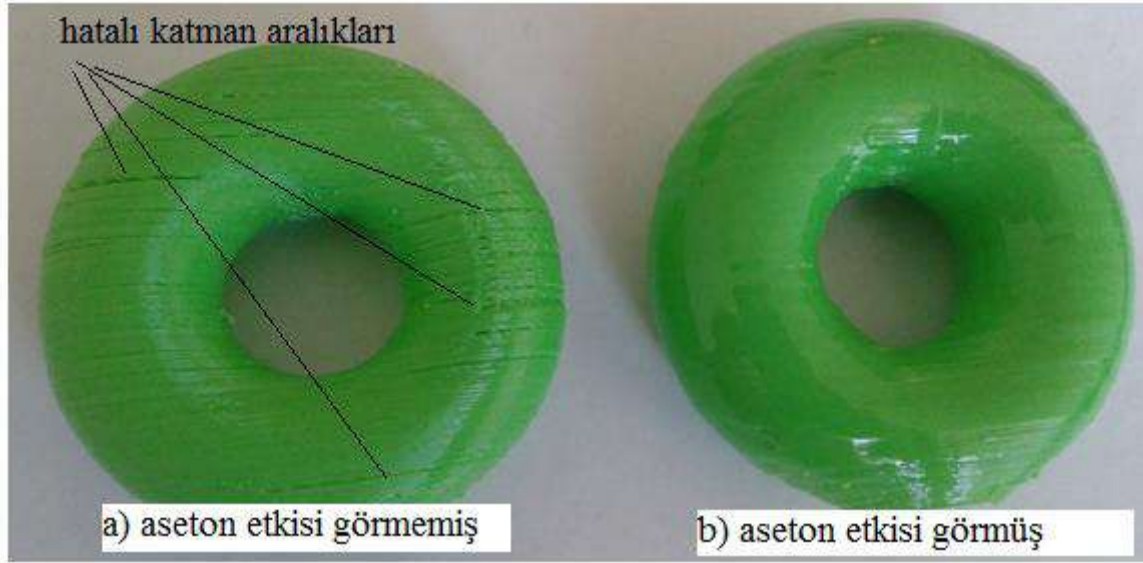


Şekil 5. Aseton buharı etkisiyle yüzey kalitesi artırılmış PLA baskılı parçalar

Şekil 6'da aseton buharına maruz bırakılmamış parça verilmektedir. Burada katmanlar arası hatalar makro düzeyde açıkça görülebilmektedir. Bu hatalar açık kaynak kodlu sistemle filament ile baskı yapan makinelerde hem mekanik hem de yazılımsal eksiklikler ve hataların birikiminden meydana gelebilmektedir. Şekil 7'de ise hem aseton buhar etkisi görmemiş hemde görmüş parçaların makro görünüşleri karşılaştırılma amaçlı verilmiştir.



Şekil 6. Üç boyutlu yazıcıdan çıkan herhangi bir aseton buharı etkisi görmemiş parça



Şekil 7. Aseton etkisi görmüş ve görmemiş parçaların karşılaştırma görüntüsü.

Tablo 6'da asetonlu ve asetonsuz parçaların yüzeyinden alınan mikro sertlik değerlerine bakıldığında, asetonlu parça yüzeyi % 27,58 daha düşük Vickers sertlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Aseton buharı PLA parça yüzeyinde yumuşatıcı etki göstermiştir.

Tablo 6. 3 boyutlu parça yüzeylerinin mikro sertlik değerleri tablosu

Numune	Uygulanan Yük (N)	Vickers Sertliği (GPa)
Asetonlu	1	0,087
Asetonsuz	1	0,111

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında PLA filament ile üretilen plastik parçaların yüzey kalitesini arttırabilmek için aseton buharı 50°C'de kapalı cam kabin ortamında parçaya nüfuz ettirilmiştir. Belirlenen deneysel parametreler içerisinde aşağıda sıralanan bulgular elde edilmiştir.

- Aseton buharı 5ml kullanılarak 50°C'de 5 dakikada verimli sonuç alınmıştır.
- PLA parçalarının 15 dakika gibi daha uzun süreli aseton buharına maruz bırakılması olumsuz etki yapmıştır. Bu süre içerisinde parçada plastik deformasyon ve şekil bozukluğu meydana gelmiştir.
- Aseton insan sağlığına zararlı bir kimyasal olduğu için kapalı bir kap içinde havalandırması iyi bir ortamda yapılmalı ve aseton buharı banyosu yapılırken aynı ortamda bulunulmamalıdır.
- Asetonun kaynama derecesi 55 °C üstü sıcaklıklarda deneme yapılmamalıdır, kolay tutuşur alev alan yanıcı bir kimyasal olduğu için tehlikesi göz ardı edilememelidir.
- Aseton buharı görsel makro yüzey kalitesini artırıp ve ortalama yüzey pürüzlülük değerini düşürdüğü için avantaj sağlamaktadır. Buna rağmen, iş parçasının sertlik değerinde düşüş olması dezavantaj oluşturabilir.
- Aseton buharı tesir işlemi oda sıcaklığındaki etkilerine bakılabilir.
- Sıvı asetonun su ile karışımından elde edilen solüsyon ile sıvı banyosu yapılmak suretiyle etkisi araştırılabilir.

TEŞEKKÜR

KÜ-BAP01 / 2016-61 proje numaralı bu çalışma Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğü BAP kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğüne teşekkür eder. Yazarlar; , Uzas 3D yazıcı merkezi yönetim kurulu başkanı Mustafa Serdar Uzas'a teknik destekleri için teşekkür eder. Yazarlar ayrıca Kastamonu Üniversitesi mühendislik ve mimarlık fakültesi dekanlığına vermiş olduğu maddi manevi desteklerden ötürü teşekkürü bir borç bilir ve teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Diane S.A., Chu K.R., and Montgomery D.C. (1997). Optimizing stereolithography throughput. *Journal of Manufacturing Systems* 16.4, 290-303.
- [2] Diane S.A., and Montgomery D.C. (1997). Using experimental design to optimize the stereolithography process. *Quality Engineering* 9.4, 575-585.
- [3] Armillotta, A., et al (1999). Optimization of Rapid Prototypes With Surface Finish Constraints: A Study on the FDM Technique. *3rd International Conference on Management of Innovative Technologies*, Piran, Slovenija.
- [4] Gautham K., and Henderson M. (1998). A visual tool to improve layered manufacturing part quality. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- [5] Kuo, C.C., and Mao R.C. (2016). Development of a precision surface polishing system for parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials and Manufacturing Processes* 31.8, 1113-1118.
- [6] Kuo, C-C., and Zhuang. B-C. (2016) . Manufacturing process development of a precision rapid tooling with high-aspect-ratio micro-sized features. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 47.1, 29-36.
- [7] Ashu G., Bhattacharya A., and Batish G. (2016). On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment. *Materials and Manufacturing Processes* 31.4, 522-529.
- [8] Rupinder S., Singh J., and Singh H. (2017). Investigations for improving the surface finish of FDM based ABS replicas by chemical vapor smoothing process: A case study. *Assembly Automation* 37.1.
- [9] Kuo C.C., et al (2016). A surface quality improvement apparatus for ABS parts fabricated by additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 1-8.
- [10] Singh C.J., Singh R., and Boparai K.S. (2016). Parametric optimization of fused deposition modeling and vapour smoothing processes for surface finishing of biomedical implant replicas. *Measurement* 94, 602-613.
- [11] Weiming W., et al. (2015). Saliency-Preserving Slicing Optimization for Effective 3D Printing. *Computer Graphics Forum*. Vol. 34. No. 6.
- [12] Yayue P., and Chen Y. (2015). Smooth surface fabrication based on controlled meniscus and cure depth in microstereolithography. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing* 3.3, 031001.
- [13] Havenga, S. P., et al. (2017). Using acetone (propanone) as a post-production finishing technique: Crossing the divide between art and technology.

AÇIK KAYNAK KODLU 3B YAZICI İÇİN BOYUTSAL PERFORMANS ANALİZİ

Fuat KARTAL, Celal NAZLI, Arif UZUN ve Zekeriya YERLİKAYA

Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu/TÜRKİYE, fkartal@kastamonu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) (Fused Deposition Modelling - FDM) için proses parametreleri üzerine optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Katman yüksekliği (mm), yerleşim açısı (α -derece) ve iç dolgu açısı (α -derece) optimizasyon için dikkate alınan proses değişkenleri olarak seçilmiştir. Boyutsal doğruluk (hacim mm³) tepki parametresi olarak seçilmiştir. Deneyler, iyi bilinen Taguchi L9 Ortogonal dizisi kullanılarak tasarlandı. Taguchi'nin S/N oranı, optimum parametre değerlerini belirlemek için kullanıldı. Her parametrenin etkinliği Varyans analizi kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca doğrulama deneyleri uygulanarak optimum koşullar doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Erimiş Birikim Modelleme; Taguchi L9 Ortogonal, PLA, ANOVA Termoplastikler.

DIMENSIONAL PERFORMANCE ANALYSIS FOR OPEN SOURCE 3D PRINTER

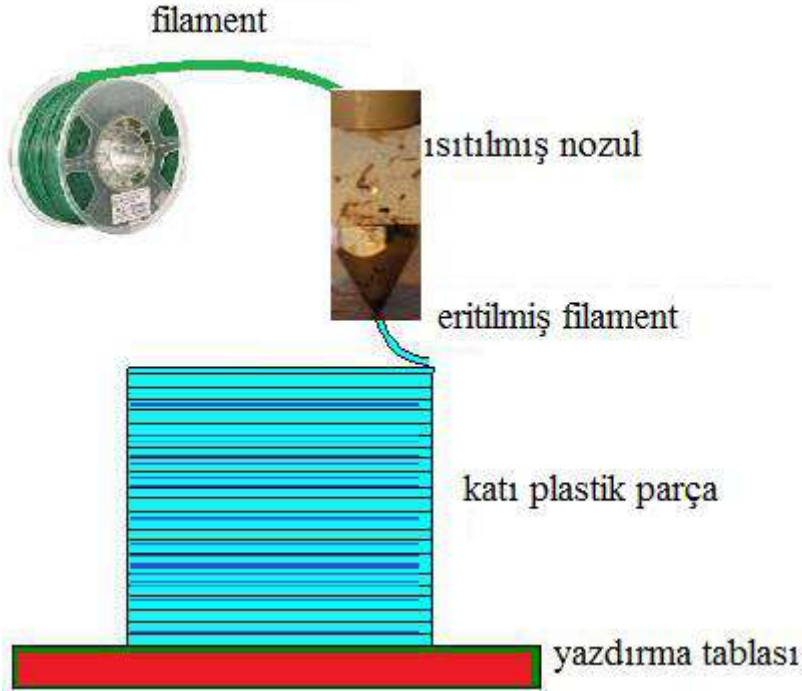
Abstract

In this study, optimization studies were carried out on process parameters for fused deposition modelling (FDM). The layer height (mm), the settlement angle (α) degree and the inner fill angle (α) degree were chosen as the process variables considered for optimization Dimensional accuracy (volume mm³) was chosen as the response parameter The experiments were performed using the well-known Taguchi L9 Designed using an orthogonal array Taguchi's S/N ratio was used to determine optimum parameter values The effectiveness of each parameter was investigated using the variance analysis and the performance of the optimum conditions was verified by applying the verification experiments.

Keywords: Fused Deposition Modelling; Taguchi L9 Ortogonal, PLA, ANOVA, Thermoplastics

1.Giriş

Şekil 1'de gösterildiği gibi PolylacticAcid (PLA) termoplastik gibi ekstrüze materyallerin katmanlaşmasıyla karmaşık geometrili parçaları üreten katmanlı bir imalat teknolojisi olan EYM sistemini geliştirmiştir [1-3]. EYM işleminde, yapı malzemesi başlangıçta esnek bir filamentin ham biçimindedir [4, 5]. Filament daha sonra kısmen eritilir ve parçanın oluşturulması için sıcaklık kontrollü bir ortamda ısıtılmış bir nozul vasıtasıyla ekstrüze edilir. Malzeme önceden belirlenmiş model katman üzerine iki boyutlu (x-y) katman deseni biçiminde çalışma düzleminde ince bir tabaka halinde ekstrüde edilir [1-6]. Eritilen malzeme soğur, katılaşır ve bitişik materyallerle yapışır. Bütün bir katman oluşturulduktan sonra, çalışma düzlemi, z-ekseni boyunca filament yüksekliğine (tabaka kalınlığı) eşit bir artışla ileriye doğru hareket eder ve bir sonraki tabaka bunun üstüne çöker. İlk katman yerleştirildiği tutma levhası veya masası, x-y düzleminde uzanır [6-9].



Şekil 1. Üç boyutlu eritme yığma ile parça üretim süreç şeması.

Yapılan parçaların özellikleri imalat sırasında sabitlenmiş farklı işlem parametrelerinin ayarlarına bağlıdır. Katmanlı imalat (Kİ), firmaların tasarım ve üretim döngü sürelerini önemli ölçüde düşürmesini sağlayan bilgi-sayar destekli tasarım (CAD) ile oluşturulan yeni bir üretim teknolojisidir [1-7]. Tasarımcı, modelleme için 3B paketinden bir CAD sistemi seçer. Ardından tasarım mühendisi, parçanın farklı opsiyonlarına göre optimize edilmiş imalat planı için deney tasarımı (Design of Experiment (DOE)) kullanır. Kullanıcı parçaları üretmek için kullanılan malzemeye bağlı olarak hangi makine türünün kullanılacağına karar vermelidir. FDM, makul üretim sürelerinde karmaşık geometrik şekillere sahip parçaları oluşturma kabiliyeti nedeniyle hızlı bir katmanlı imalat (Additive Manufacturing (AM)) teknolojisidir [1, 2]. Üretim süresinin azaltılması, endüstriyel pazardaki rekabet başarısının en önemli etkenidir. Çeşitli kaynaklar, geleneksel ürün geliştirme metodlarına göre katmanlı imalat gibi farklı türde katmanlı imalat tekniklerinin avantajlarını vurgulamışlardır [3-5]. Özellikle geleneksel üretim yöntemleri ile imalatı güç olan karmaşık şekilli parçaların üretiminde Kİ teknolojisi önemli avantajlar sunmaktadır. Kesintisiz üretim aynı zamanda işlem basamaklarının azaltılması olarak da görülebilir. Çünkü üretilecek parçaların karmaşıklığına bakılmaksızın herhangi bir katmanlı imalat makinesiyle yapılan üretim, çoklu aşamaları gerektiren çoğu diğer imalat süreçlerinden farklı olarak genellikle tek bir adımda gerçekleştirilir. Bu avantajlara ek olarak Kİ kullanmanın diğer avantajları ise işlem sayısındaki ve kaynak ihtiyacındaki düşüştür. Sonuç olarak Kİ kullanmanın diğer geleneksel yöntemlerden en büyük farkı hızıdır [1].

Karmaşık şekillere sahip estetik Kİ ürünlerinin üretilmesi, mevcut Kİ teknolojileri göz önüne alındığında zor değildir. Buradaki zorluk Kİ parçalarını işlevsel ve sağlam üretebilmektir. Bu sebeple, bu çalışmada üretilen Kİ parçalarının işlevselliğinin araştırılması için yapılan proseler anlatılmaktadır. Birleştirmeli yığma modellemesi ile üretilen parçaların boyutsal doğruluk tahmini geliştirilmiş ve üretim parametrelerinin optimizasyonu değerlendirilmiştir.

2 MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan 3B Yazıcı ve Malzeme

Bu çalışmada, EYM parçalar için yaygın olarak kullanılan bir materyal olan PLA plus malzemesi kullanılarak, numunelerin yapımı için açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 2). Parçanın CAD modeli SolidWorks paket programında hazırlanıp, malzeme oluşturulması için FDM makinesine giriş uzantısı (.stl) formatına dönüştürülmüştür. Parçalar, 0.150 mm sabit katman kalınlığına sahip PLA plus eriyik malzemenin yığılması yoluyla katmanlar halinde oluşturulmuştur. Dream aker tamamen yerli tasarım olup Prusa vb. açık kaynak kodlu yazıcılara benzer özelliktedir. LCD kontroller sayesinde bilgisayardan bağımsız çalışabilmektedir. Tablo 1'de teknik kapasite özellikleri, Şekil 2'de açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı görülmektedir.

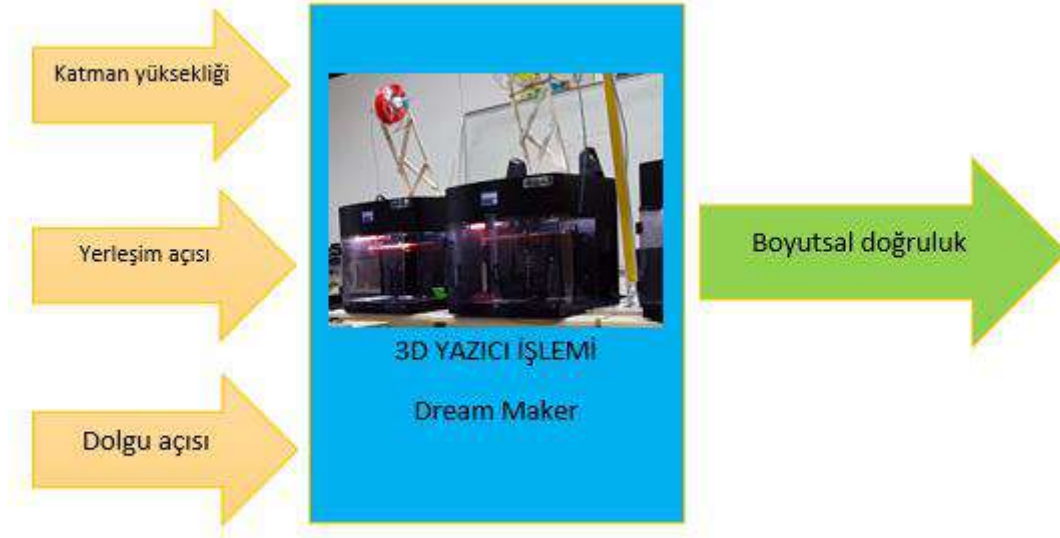
Tablo 1. Kullanılan açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcının teknik kapasite özellikleri

Baskı boyutu:	200 × 200 × 200 mm
Maks çözünürlük:	0.1 mm-0.4 mm
XY eksen konumlandırma doğruluğu:	0.012 mm
Nozul çapı:	0.4 mm
Giriş voltajı:	100 V-240 V
Çalışma gerilimi:	12 V
Uyumlu yazılım:	Cura, Slic3r
Dosya biçimi:	STL, G-kodu
Baskı Malzemesi:	PLA
Malzeme Çapı:	1,75 mm

**Şekil 2.** Açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı

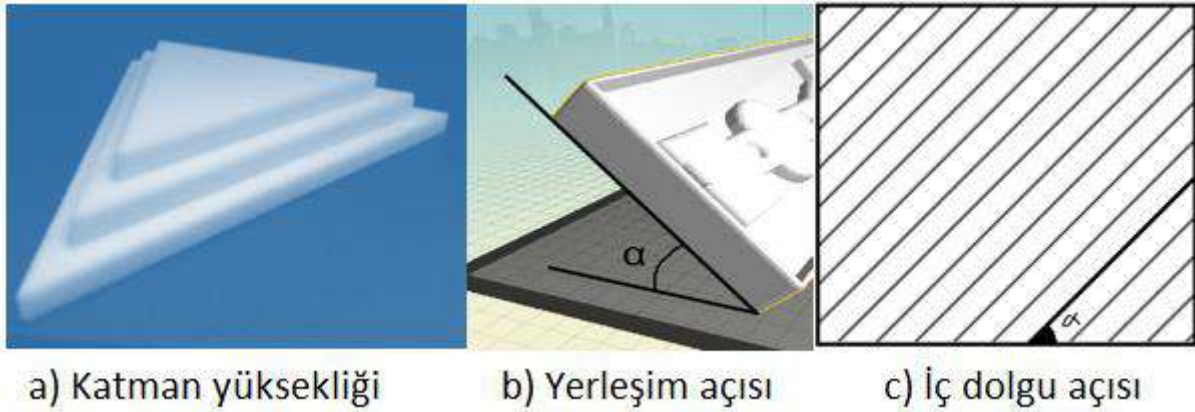
2.2. Taguchi Metodu

Taguchi yöntemi, tasarım optimizasyonu için etkili yöntem sağlayan ve yaygın kabul gören bir tekniktir. Dünya genelinde ürün tasarımı ve proses optimizasyonu için sıklıkla kullanılmaktadır. Deney işlem parametreleri arasındaki etkileşimini incelemek için Taguchi tekniğini kullanılmıştır. Taguchi, her deney için farklı parametrelerin kombinasyonlarını ve seviyelerini veren Ortogonal dizi açısından deney planını önermektedir. Bu çalışmada, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterildiği gibi boyutsal doğruluk tepki karakteristikleri üzerindeki etkileri incelemek üzere katman kalınlığı, parça yönlendirme açısı ve dolum açısı gibi üç önemli işleme parametresi üzerinde durulmuştur.



Şekil 3. Deney tasarımı işleme parametreleri ve deney tepki parametresi gösterimi.

EYM nozulundan biriken katmanın yüksekliği, parçanın yönlendirme açısı ve imal edildiğinde parçanın nasıl konumlandırılacağı (doldurma açısı) Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. İşleme parametrelerinin gösterimi.

Tablo 2'de gösterildiği gibi üç parametre ve üç seviye nedeniyle, mevcut çalışma için uygun Ortogonal dizi Tablo 3'te gösterildiği gibi L9 [5] şeklindedir.

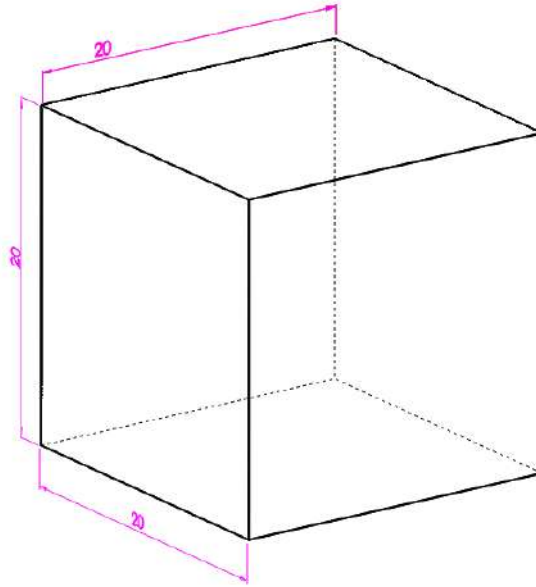
Tablo 2. Parametreler ve seviyeleri

Parametre	Sembol	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Tabaka kalınlığı	A	mm	0.1	0.2	0.3
Yönlendirme açısı	B	Derece	0	15	30
Dolum açısı	C	Derece	0	30	60

Tablo 3. L9 Ortogonal dizisi

Deney	Katman Yüksekliği (mm)	Yerleşim açısı (derece)	İç dolgu açısı (derece)
1	0,1	0	0
2	0,1	30	30
3	0,1	60	45
4	0,15	0	30
5	0,15	30	45
6	0,15	60	0
7	0,2	0	45
8	0,2	30	0
9	0,2	60	30

3B baskı modelleri tipik olarak STL adlı bir dosya biçiminde dağıtılır. 3B yazıcı dilimleyici yazılımı, bir STL dosyasını bir 3B yazıcıyla anlaşılabilen G koduna dönüştürmek için gereklidir. Üretilecek parçalar SolidWorks modelleme yazılımı kullanılarak modellendi ve STL dosyası olarak ihraç edildi. STL dosyası, FDM Cura yazılımına aktarıldı. Parça imalatında PLA plus kullanılmıştır. Boyutsal doğruluk testi, numune boyutlarını X ve Y yönlerinde ölçerek dijital kumpas kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 5'te boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü için kullanılan numunenin boyutları verilmiştir.

**Şekil 5.** Boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü için kullanılan numunenin boyutu.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

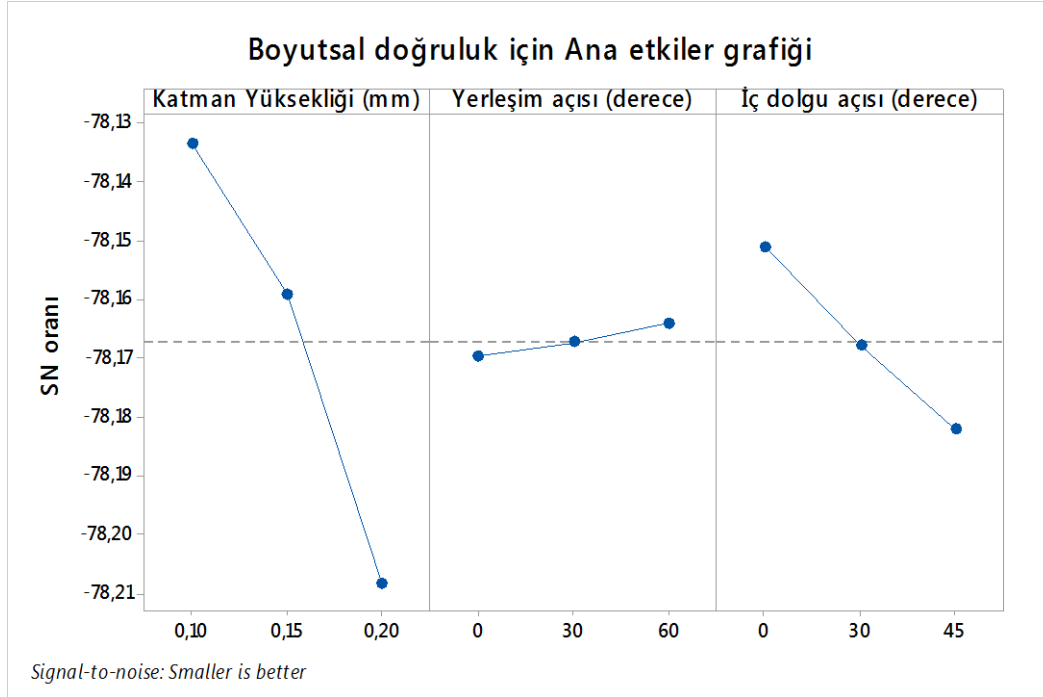
Tablo 4'te çeşitli işlem parametrelerinin kombinasyonları için boyutsal doğruluk ölçüleri deney sonuçları verilmektedir.

Tablo 4. Üç boyutlu yazıcı parametrelerinin kombinasyonları ve deney sonuçları

Deney	Katman Yüksekliği (mm)	Yerleşim açısı (derece)	İç dolgu açısı (derece)	Boyut doğruluğu (mm ³)	Sinyal gürültü oranı (S/N)
1	0,1	0	0	8055,075	-78,1214
2	0,1	30	30	8075,46	-78,1433
3	0,1	60	45	8069,175	-78,1366
4	0,15	0	30	8084,985	-78,1536
5	0,15	30	45	8105,445	-78,1755
6	0,15	60	0	8080,725	-78,1490
7	0,2	0	45	8160,81	-78,2347
8	0,2	30	0	8112,81	-78,1834
9	0,2	60	30	8134,995	-78,2071

3.1. S/N Oranı ve Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi, istatistiksel olarak önemli parametreler ve bu parametrelerin boyut doğruluğu üzerine katkısının yüzdesini oluşturmak için kullanılmıştır. Taguchi tekniğinde, deneysel değer ile istenen değer arasındaki sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon sinyal-gürültü oranına dönüşmüştür. Taguchi'nin felsefesi, kalite ve değişkenlik arasındaki ilişkiyi değerlendirmenin üç genel yolunu içerir. Bunlar; nominal daha iyi bir yaklaşım, küçük daha iyi yaklaşım ve büyük daha iyi bir yaklaşımdır. Bu çalışmada daha küçük iyidir fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 6'da boyutsal doğruluk için ana etkileri göstermektedir. S/N oranlarının değerlerine dayanarak, boyutsal doğruluk için optimum değerler S/N oranının nominal değerleri ile elde edilir. Şekilde gösterilen S/N oranının ana etkilerinden, S/N oranı, artan katman kalınlığı, yerleşim açısı ve dolgu açısı ile azalmaktadır. S/N oranının analizine dayanarak, optimum boyutsal doğruluğu elde etmek için optimize edilmiş işlem parametreleri 0.2 mm katman yüksekliği, 0° yerleşim açısı ve 45° dolgu açısıdır.



Şekil 6. Boyutsal doğruluk için ana etkiler grafiği.

Tablo 5. Parametrelerin boyut doğruluğu optimum S/N oranı sıralaması

Seviye	A	B	C
1	-78,13	-78,17	-78,15
2	-78,16	-78,17	-78,17
3	-78,21	-78,16	-78,18
Fark	0,07	0,01	0,03
Sıralama	1	3	2
Optimum değer S/N	-78,21	-78,17	-78,18

3.2. Doğrulama Deneyi

Optimum işlem parametrelerinin performanslarını teyit etmek için doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir optimum koşul için elde edilen tepki özellikleri Tablo 6'da verilmiştir. Optimize parametrelerin boyutsal doğruluk üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu verilen tabloda açıkça görülmektedir.

Tablo 6.Tüm parametreler için boyut doğruluğu doğrulama deneyi

Katman Yüksekliği (mm)	Yerleşim açısı (derece)	İç dolgu açısı (derece)	Boyut doğruluğu (mm ³)	Boyut doğruluğu tahmini (mm ³)	fark (%)
0,1	0	0	8055,07	8054,29	0,010
0,1	30	30	8075,46	8067,52	0,098
0,1	60	45	8069,17	8077,91	-0,108
0,15	0	30	8084,98	8093,72	-0,108
0,15	30	45	8105,44	8104,66	0,010
0,15	60	0	8080,72	8072,78	0,098
0,2	0	45	8160,81	8152,86	0,097
0,2	30	0	8112,81	8121,54	-0,108
0,2	60	30	8134,99	8134,21	0,010

4. SONUÇLAR

İşlem parametreleri Taguchi'nin L9 Ortogonal dizisini kullanarak FDM işlemi için optimize edilmiştir. Bununla birlikte Varyans analizi kullanılarak önemli süreç parametreleri belirlenmiştir. Deneysel sınırlar içerisinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Boyut doğruluğu için; 0.2 mm tabaka kalınlığı, 0 derece yerleşim açısı ve 45 derece dolum açısı.
- Katman yüksekliği S/N oranları arasındaki değişime bakıldığında, 3. seviye ile 1. Seviye arasında ki fark % 0,1 ve 3. seviye ile 2. seviye arasındaki fark % 0,06 olarak tespit edilmiştir. Sayısal olarak bu değerler çok küçük olmasına rağmen imalatla hassas üretim için çok önemlidir.
- Üretilen üç boyutlu küp parçanın hacim boyut ölçülerinde en etkili parametre katman yüksekliği olmuştur.
- Üretilen üç boyutlu küp parçanın hacim boyut ölçülerinde en düşük etkiyi parça oryantasyonu yani yazdırma tablasındaki açı göstermiştir. Parçanın yazdırma tablasına ilk katman yerleşme açısının istatistiksel bir etkisi olmadığı görülmüştür.
- Doğrulama deneyi başarılı bir şekilde tüm deney parametreleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Boyut doğruluğu (mm³) tahmin değerleri ile deneysel veriler arasındaki fark % 1'i geçmemiştir.

TEŞEKKÜR

KÜ-BAP01 / 2016-61 proje numaralı bu çalışma Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğü BAP kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğüne teşekkür eder. Yazarlar; , Uzaras 3B yazıcı merkezi yönetim kurulu başkanı Mustafa Serdar Uzaras'a teknik destekleri için teşekkür eder. Yazarlar ayrıca Kastamonu Üniversitesi mühendislik ve mimarlık fakültesi dekanlığına vermiş olduğu maddi manevi desteklerden ötürü teşekkürü bir borç bilir ve teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [14] Diane, S.A., Chu, K.R., and Montgomery, D.C. 1997. Optimizing stereolithography throughput. *Journal of Manufacturing Systems*, 16.4, 290-303.
- [15] Antonio, L. et al. 2015. On the geometric accuracy of RepRap open-source three-dimensional printer. *Journal of Mechanical Design* 137.10, 101703.
- [16] Galantucci, L. M., et al. 2015. 2015. Analysis of dimensional performance for a 3B open-source printer based on fused deposition modeling technique. *Procedia CIRP* 28, 82-87.
- [17] Abbas, A.R., et al. 2012. Application of the Taguchi approach to improve performance of the alignment-layer printing process in liquid crystal displays. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226.7, 1241-1248.
- [18] Krishnan, K., and Kumar, G.S. 2015. An experimental and theoretical investigation of surface roughness of poly-jet printed parts: This paper explains how local surface orientation affects surface roughness in a poly-jet process. *Virtual and Physical Prototyping* 10.1, 23-34.

- [19] Ganzi, S., and Narayana, K. L. 2017. A Review on Fabricating Procedures in Rapid Prototyping. *3B Printing: Breakthroughs in Research and Practice. IGI Global*, 1-21.
- [20] Valerga, A.P. et al. 2015. Preliminary study of the influence of manufacturing parameters in fused deposition modeling. *Annals of DAAAM & Proceedings* 26.1.
- [21] Chennakesava, P., and Narayan, Y.S. 2014. Fused Deposition Modeling-Insights. *Proceedings of the International Conference on Advances in Design and Manufacturing ICAD&M. Vol. 14*.
- [22] Zaragoza, J., and Medellín, H.2014. Design for Rapid Prototyping, Manufacturing and tooling: Guidelines. *Proceedings ASME*.

GEOMETRICAL TOLERANCES FOR ADDITIVE MANUFACTURING: AN OVERVIEW^a Binnur SAĞBAŞ, ^b Aslı GÜNAY BULUTSUZ^a Yildiz Technical University, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Turkey, bsagbas@gmail.com,^b Yildiz Technical University, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Turkey,
asligunaya@gmail.com**Abstract**

Additive manufacturing (AM) is a high priority technology that provides technical and economic advantages in comparison with traditional manufacturing methods. In AM processes the work pieces are manufactured layer-by-layer directly from a 3-D digital model, without molds, fixtures, tools, etc. This versatile manufacturing process gives opportunity to obtain customized products with complex geometries, freeform shapes, internal cavities and lattice. This developing technology has been used in wide range of industrial applications such as automotive industry, aircraft industry, patient specific prosthesis and artificial organs. However, there are some restrictions waiting for determinations and improvements for usage of additive manufacturing to end use part production. One of the most important restrictions is geometrical tolerances. The geometrical deviations of AM process depends on different factors such as process type, Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS) and Selective Laser Melting (SLM) and process parameters such as build direction, layer thickness, support structure related specification, and scan/track direction. In this paper literature studies about geometrical tolerances in AM are reviewed and the implications of AM processes are reported to decrease limitations about dimensional accuracy and increase part quality, functionality, and performance of the AM product.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, geometrical tolerance, dimensional accuracy**EKLEMELİ İMALATTA GEOMETRİK TOLERANSLAR: GENEL BAKIŞ****Özet**

Yüksek öncelikli bir teknoloji olan eklemeli imalat (Eİ) geleneksel imalat tekniklerine göre ekonomik ve teknik avantajlara sahiptir. Eİ tekniğinde nihai ürün 3 boyutlu olarak, doğrudan, tabaka tabaka imal edilmektedir. Yöntem bu esnada herhangi bir kalıba, sabitleyiciye, maçaya veya takıma ihtiyaç duymamaktadır. Bu yönüyle oldukça çeşitli, karmaşık geometrileri, serbest yüzeyleri ve iç boşlukları kolayca imal edebilmektedir. Gelişmekte olan bu teknoloji otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde kullanılabilirken, hastaya özel protez, yapay organ imalatı gibi biyomedikal konularda da uygulama alanı bulmaktadır. Bu olumlu özelliklerinin yanında, eklemeli imalatta nihai ürün ile ilgili çözülmeyi bekleyen bir takım sorunlar ve imalat kısıtları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi geometrik toleranslardır. Eklemeli imalatta geometrik sapmalar kullanılan Eİ tekniklerine (Birleştirmeli Yığılma Modelleme, Seçici Lazer Sinterleme, Seçici Lazer Ergitme) ve imalat parametrelerine (yığılma yönü, kullanılan katman kalınlığı, destek sisteminin yeri) bağlı olarak değişim göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında Eİ tekniği ile elde edilen nihai ürünlerin geometrik toleransları konusunda bir literatür çalışması gerçekleştirilmiş ve özellikle Eİ yöntemleri için geometrik tolerans limitlerini düşürmeye, boyutsal doğruluğu artırmaya, nihai ürün kalitesini ve eklemeli imalatın performansını iyileştirmeye yönelik çalışmalar derlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli imalat, 3 Boyutlu Yazıcı, Geometrik Tolerans, Boyutsal Doğruluk

1. Introduction

Industrial journey that started with Industrial Revolution and steam engine (1.0) and continued with electricity (2.0), computer and automation (3.0) has dramatically advanced via technological developments. Nowadays this journey is in the midst of fourth stage of industrial and technological developments known as Industry 4.0; "Cyber Physical Systems". These systems will make it possible to collect and analyze data through manufacturing systems such as machine to machine, additive manufacturing-3D printing, robotics and turn them into Cyber-Physical Production Systems by enabling faster, more flexible, more efficient and more productive processes [1,2].

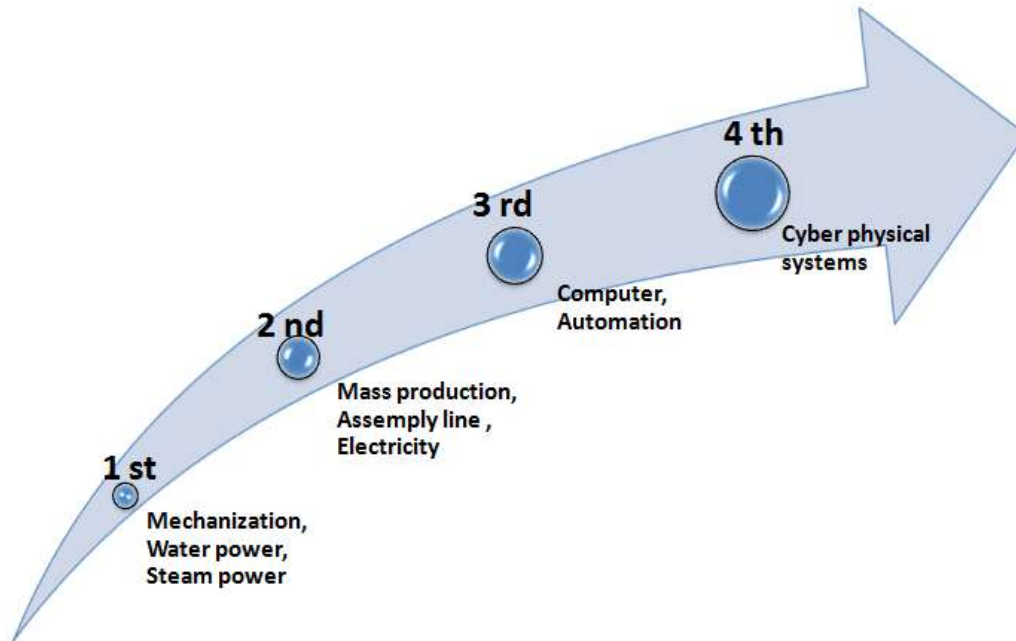


Figure 1. Stages of Industrial Revolution

Additive manufacturing is a layer-by-layer manufacturing method without using molds, fixtures, tools but 3D digital model. It has come insight in the 1980s for the first time and has mostly been used for rapid prototyping since the date [4,5] In recent years, by the technological developments companies have just begun to adopt additive manufacturing used for Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, and Rapid Tooling. With Industry 4.0, these additive manufacturing methods will be prevalently applied for job production with design advantages like complex geometries, freeform shapes, light weight, internal cavities and lattice. For example, aerospace companies have already used 3D printing technologies for obtaining reduced aircraft weight with complex designs and lower expenses [1]. Besides aerospace, additive manufacturing applications can be seen in different fields such as mechanical engineering, medicine, fashion and art with increasing industrial pertinence [6, 7].

In additive manufacturing the final shape of a product is produced by building up layers while a solid mass and subtractive methods (such as turning) are used in conventional manufacturing. The layers are deposited in the x-y, building plane while the third dimension is generated by layer-by-layer repetitive deposition in the [8]. Feedstock, turned in to 3D objects, may be in powder, sheet or wire form of the materials. Polymer (i.e. acrylonitrile-styrene-butadiene (ABS), polycarbonate (PC), polylactide (PLA), toughened polystyrene, nylon, toughened polycarbonate, polyurethane, Poly-Eter-Eter-Keton (PEEK)) [9], metal (i.e. Ti-6Al-4V, Inconel 718/625, Stainless Steel (316L, 304), Al-alloys (AlMgSi, AlCu), Intermetallics (NiTi, γ-TiAl), CoCrMo alloys), ceramic and composite materials can be processed by AM methods [10]. There are different types of AM processes for building up 3D geometries from polymer and metal materials, suc as, Fused Deposition Modeling (FDM) and Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), Direct Energy Deposition (DED), Binder jetting, Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) [11]. This

versatile manufacturing process gives opportunity to obtain customized products with complex geometries, freeform shapes, internal cavities and lattice. While these geometries are not feasible or very costly with traditional manufacturing processes, companies have started beginning to use AM as a tool for reducing time to market, improving product quality, functionality and reducing waste of raw material and cost of manufactured products [12,13].

Although usage of AM provides these advantages, it is still limited to utilize AM for end-use part manufacturing because there is a gap about geometrical tolerances of AM processes [14-23]. Therefore the purpose of this paper is to make an overview about geometrical accuracy of additive manufacturing from literature studies. More over it is aimed to provide a basis for our experimental studies about the subject in the near future.

2. Geometrical Tolerances in Conventional Manufacturing

The tolerance of a part is specified by the geometric tolerancing. For determining the geometrical tolerances, the manufacturer should be aware of investigation method of final products and uncertainty sources of the method. Geometrical tolerances have been explained in detail by several standards such as ISO 129:1985 (Dimensioning), ISO 3274:1996 (Surface texture), ISO 14253-1 (Inspection), ISO16610-1 (Filtration), ISO 14660-1 (Geometric features) and so on [24-28]. These standards are developed by the Technical Committee ISO/TC 213. Geometric Product Specifications (GPS) aim to determine macro-micro geometrical specifications which include dimensional and geometrical tolerances and surface properties. The basic geometrical tolerances of a work piece are form, profile, orientation, location and runout tolerance. Each of the basic tolerance also divided into sub groups. For instance, form tolerances built up of straightness, flatness, circularity and cylindricity while profile tolerances contain profile of a line and profile of a surface. Angularity, perpendicularity and parallelism are the sub group of orientation tolerances. Position, concentricity and symmetry are location and circular runout, total runout are sub group of runout tolerances [29].

Moreover GPS includes dimensional and geometrical verification principles for these properties in order to enlighten uncertainty of measuring equipment and uncertainty occurred during calibration. The GPS standardization guides with this aim by giving the basic layout and explanation of drawing indications [30].

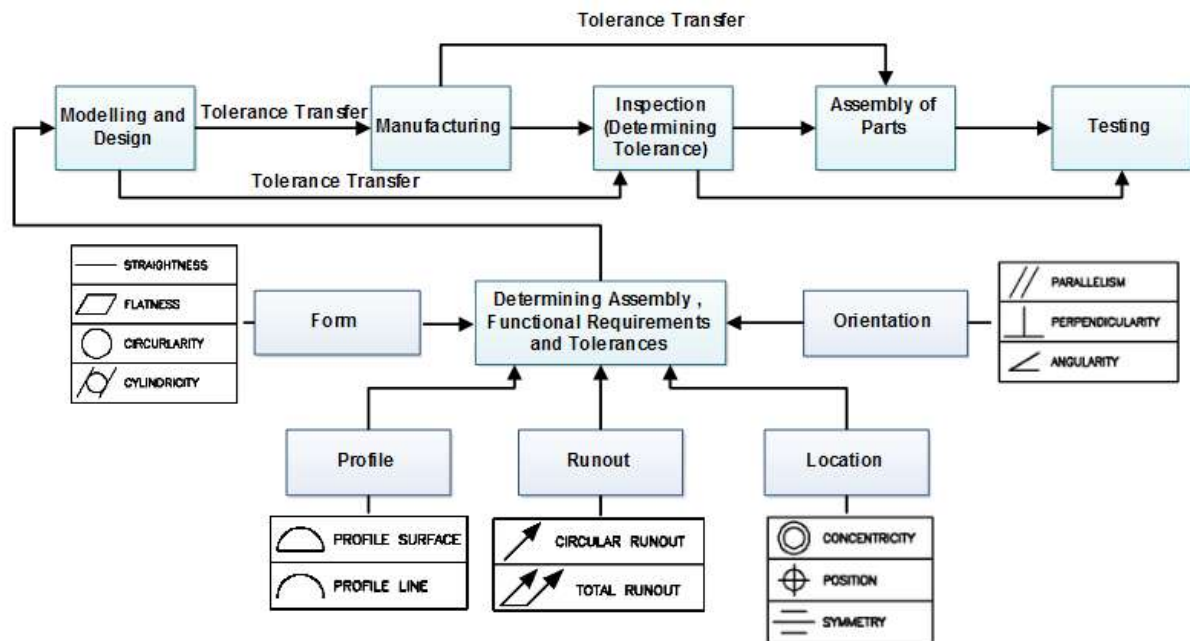


Figure 2. The tolerance transfer in a product life cycle and types of geometrical tolerances. Modified from ref. [31,32]

Starting from modelling and design step the tolerances of a part must be transferred to manufacturing and assembly based tolerances on different dimensions with different datum features. This transformation is

called as tolerance transfer and it must be applied without compromising desired function of the product [32]. The tolerance transfer in a product life cycle and types of geometrical tolerances can be seen in fig. 2.

3. Geometrical Tolerances in Additive Manufacturing

Quality of a work piece implies material, dimensional, geometric and surface properties, specified by a designer, by a manufacturer and verified by a part/product inspector respectively. Part quality in terms of dimensional, geometric, and surface is specified and verified, using GPS and related ISO (International Standards Organization) standards, mentioned in previous section, developed for the work piece produced by traditional manufacturing methods [12,24-28,33]. Because the production methodology, shapes, material and structures of products manufactured by AM, are different from traditional manufacturing there is a need for development of AM based specification and verification standards. The capability of AM technologies provides solution for some difficulties of traditional manufacturing such as assembly, tool accessibility, toolpath generation, undercutting features, complex shapes [34,35].

Despite of numerous advantage of AM the final geometry is needed to be improved in order to meet international standard limits. The inherent imperfections of AM process should be inspected under divided main titles for influencing factors in order to improve final product quality and reduce manufacturing costs. Geometrical specifications can be propagated to other views of the products such as determining product tolerances during 3D design, manufacturing method, and quality control method after manufacturing. All of this still need communication inside [32,36]. The consistency of the final product is affected from many possible different factors can be seen in Ishikawa diagram in fig.3.

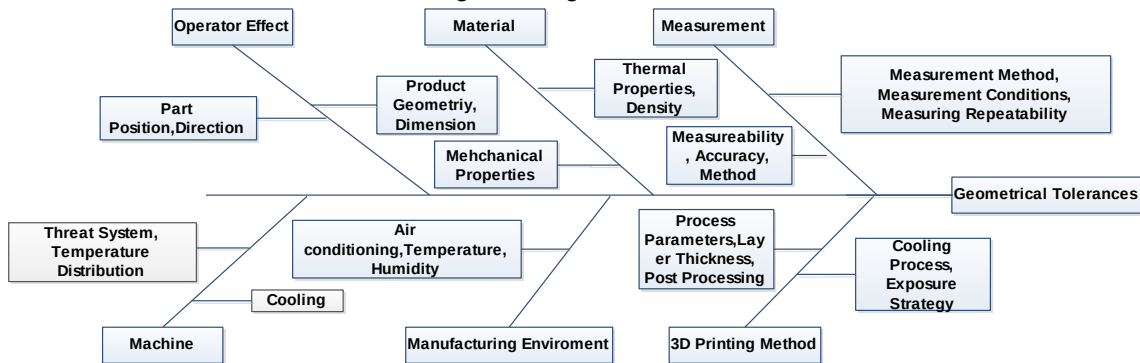


Figure 3. Ishikawa Diagram for Additive Manufacturing Processes. Modified from ref. [14].

For example for FDM method the layer thickness is determined during the 3D design step which effects strongly mechanical and surface quality of geometric part. Layer thickness selection depends on the used materials, the material outer geometry, inner geometry, surface properties and so on. Steps of AM can be seen in fig. 4.

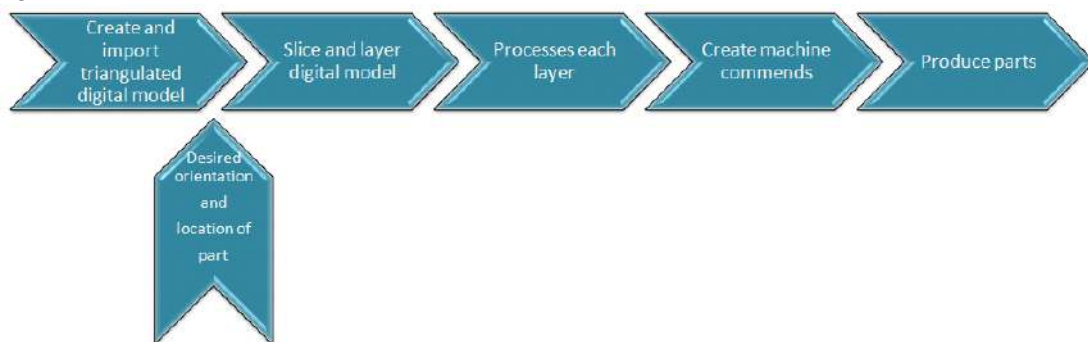


Figure 4. Steps of AM Technology. From creating digital model to produce parts [12].

Stereolithography (STL) file format, which is basically consist of triangulated geometry, is the most widely used format for digital model of the manufactured workpiece. The triangulation precision and number of the

triangles in STL defines the precision of the manufactured workpiece. For instance to obtain free form surfaces large number of triangles are needed than a flat surface. For elimination of the limitations about STL format, American Society of Testing and Materials (ASTM) standards committee has developed a new Additive Manufacturing File (AMF) standard which is eXtended Markup Language (XML)-based format and is part of ASTM 2915 standard [12,37].

Geometrical tolerances of the final product, manufactured by AM technologies, are influenced by the method of AM processes such as FDM, SLM and SLS. In literature studies, mostly dimensional and geometrical tolerances of FDM based AM products have been investigated. Sood et al.[38] studied on the dimensional accuracy of length, width, thickness and diameter of an ABS part manufactured by FDM method. They researched the effect of process parameters such as layer thickness, air gap, raster width, raster angle and part build orientation, by using the Taguchi method. They reported that optimum parameters for decreasing the dimensional variations of the part were different. As a result of this, the common factor settings which simultaneously show minimum deviation in all the responses had been obtained by using grey Taguchi method. Mohamed et al. [39] reported a study about usage of I-optimality criterion for determination effect of FDM process parameters such as layer thickness, air gap, build orientation, road width, raster angle and number of contours on deviation in length, width and thickness of a part. They concluded that optimum parameter settings were different for all three responses and best solution was achieved by I-optimality criterion. Moreover, Mahesh et al., [40] reported freeform surface deviations up to +2.5 mm depending on different nominal dimensions of the parts manufactured by FDM processes. Nuñez et al. [41] studied the effect of part density and layer thickness on dimensional accuracy and flatness of a part manufactured by FDM with ABS material. Lieneke et al. [7] investigated the effect of geometrical factors spatial alignment and nominal dimension on dimensional accuracy of a part in FDM processes. They tried three spatial alignments along the x-, y-, and z-axis and reported that the average deviations range between +0.03 mm and +0.50 mm in the x alignment, between +0.06 mm to -0.30 mm in the y alignment and between +0.12 mm and +0.47 mm in z alignment. Moreover, in an other study [14], the same authors investigated FDM, SLS and SLM processes with ABS-M30, PA2200 and Stainless steel 316L materials respectively. They reported that in FDM; all test specimens show an oversize independent from their spatial alignment, in SLS; all alignments show a decreasing dimensional deviation with increasing nominal dimension and in SLM; all alignments show a decreasing dimensional deviation with increasing nominal dimension.

Table 1. International Tolerance (IT) classes for various manufacturing processes [7]

Process	IT classes										
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Casting											
Sintering											
Drop forging											
Milling											
Cutting											
Turning											
Drilling											
Planning											
Stripping											
FDM											
x											
y											
z											

The classification of the derived dimensional tolerance values into the International Tolerance (IT) system according to DIN EN ISO 286-1 can be seen in table 1. It shows that the FDM process reaches IT classes

between IT09 and IT14 and it is comparable in terms of sintering and machining operations such as milling, cutting, and drilling with respect to the achievable dimensional tolerances. The results point out that the position of the tolerance zone needs to be considered [7].

4. Conclusion

Additive manufacturing (AM) has increasingly gained attention in the last decade. This versatile manufacturing process gives opportunity to obtain customized products with complex geometries, freeform shapes, internal cavities and lattice which are not feasible and costly with traditional manufacturing processes. Although usage of AM provides these advantages, it is still limited to utilize AM for end-use part manufacturing because the geometric freedoms create new challenges in maintaining and communicating dimensional and geometric accuracy of parts produced by AM. Current methods of specifying and verifying product quality are not sufficient. In conclusion, product quality specification and verification methods should be adapted to include the capabilities of AM techniques.

5. References

- [1] Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., and Harnisch, M., "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries", http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives_Industry.4.0_2015.pdf, 9 th April 2015.
- [2] Lasi, H., Kemper, H.G., Fettke, P., Feld, T., Hoffmann, M., "Industry 4.0", Business & Information Systems Engineering, (2014), 239-242.
- [3] Lobo, F. A., "The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES)", Journal of Innovation Management, JIM 3, 4 (2015), 16-21.
- [4] Levy G. N., Schindel, R., Kruth, J.P., "Rapid Manufacturing and Rapid Prototyping with Layer Manufacturing (LM) technologies, State of the art and future perspectives", CIRP Annals – Manufacturing Technologies, 52 2, (2003), 589-609.
- [5] Berger, U., Hartmann, A., Schmid, D., Additive Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing, Europa-Lehrmittel, (2013).
- [6] Wohlers, T., Wohlers Report 2013 – Additive Manufacturing and 3D Printing State of the industry, Annual Worldwide Progress Report (2013).
- [7] Lieneke, T., Denzer, V., Adam, G.A.O., Zimmer, D., "Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling", Procedia CIRP 43 (2016) 286 – 291.
- [8] Gibson, I., Rosen, D., Stucker. B., Additive Manufacturing Technologies, 2nd Edition, Springer, New York, 2015.
- [9] Forster, A.M., Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, May 2015.
- [10] Leinenbach, C., "Material Aspects in Metal Additive Manufacturing", LANL Workshop, Santa Fe, 20-21 July 2015.
- [11] Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., Babu, S. S., "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing", International Materials Reviews, (2016).
- [12] Bandyopadhyay, A., Bose, S., Additive Manufacturing, CRC Press, (2016).
- [13] Coykendall, G., "Additive Manufacturing: Processes and Standard Terminology", Edmonds Community College, (2012).
- [14] Lieneke, T., Adam, G. A. O., Leuders, S., Knoop, F., Josupeit, S., Delfs, P., Funke, N., and Zimmer, D., "Systematical Determination of Tolerances for Additive Manufacturing by Measuring Linear Dimensions", Conference: Solid Freeform Fabrication Symposium, At Austin TX, USA, August 2015.
- [15] Gregorian, A.; Elliott, B.; Navarro, R.; Ochoa, F.; Singh, H.; Monge, E.; Foyos, J.; Noorani, R.; Fritz, B.; Jayanthi, S., "Accuracy Improvement in Rapid Prototyping machine (FDM-1650)". International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, (2001).
- [16] Byun, H.S.; Lee K.H., "Design of a New Test Part for Benchmarking the Accuracy and Surface Finish of Rapid Prototyping Processes", Lecture Notes in Computer Science, 2669, (2003), 731-740.
- [17] Boschetto, A., Bottini, L., "Accuracy prediction in fused deposition modeling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology", 73, (2014), 913-928.

- [18] Brøtan, V., "A new method for determining and improving the accuracy of a powder bed additive manufacturing machine", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, (2014), 1187-1195.
- [19] Dimitrov, D., Van Wijck, W., Schreve, K., De Beer, N., "Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing", *Rapid Prototyping Journal*, 12, (2003), 42-52.
- [20] Cooke, A.L., Soons J.A., "Variability in the Geometric Accuracy of Additively Manufactured Test Parts", 21st International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, (2012).
- [21] Brajlili, T., Valentan, B., Balic, J., Drstcensek, I., "Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines", *Rapid Prototyping Journal*, 17, (2011), 64 – 75.
- [22] Tang, Y., Loh H.T., Fuh, J.Y.H., Wong, Y.S., Lu, L., Ning, Y., Wang, X., "Accuracy Analysis and Improvement for Direct Laser Sintering", *Innovation in Manufacturing Systems and Technology*, (2004).
- [23] Noriega, A., Blanco, D., Alvarez, B.J., Garcia, A., "Dimensional accuracy improvement of FDM square cross-section parts using artificial neural networks and an optimization algorithm", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, (2013), 2301-2313.
- [24] ISO 129:1985 Technical drawings -- Dimensioning -- General principles, definitions, methods of execution and special indications
- [25] ISO 3274:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Nominal characteristics of contact (stylus) instruments
- [26] ISO 14253-1:2013 Geometrical product specifications (GPS) -- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment -- Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications
- [27] ISO 16610-1:2015 Geometrical product specifications (GPS) -- Filtration -- Part 1: Overview and basic concepts
- [28] ISO 14660-1:1999 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Geometrical features -- Part 1: General terms and definitions
- [29] Drake, P. J., *Dimensioning and Tolerancing Handbook*, McGraw-Hill, U.S.A. (1999).
- [30] Villeneuve, F., Mathieu, L., *Geometric Tolerancing of Products*, Publisher: John Wiley and Sons, (2013).
- [31] Hong, Y. S., and Chang, T. C., "A Comprehensive Review of Tolerancing Research," *Int. J. Prod. Res.*, 40 (11), (2002) 2425–2459.
- [32] Ameta, G., Lipman, R., Moylan, S., Witherell, P., "Investigating the Role of Geometric Dimensioning and Tolerancing in Additive Manufacturing", *Journal of Mechanical Design*, 137 (2015).
- [33] ISO 1101:2012, "Geometrical product specifications (GPS)—Geometrical tolerancing—Tolerances of form, orientation, location and run-out," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (2012).
- [34] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., *Additive Manufacturing Technologies, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer Verlag, New York, (2009).
- [35] Boschetto, A., Bottini, L., "Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37 (2016) 103–114.
- [36] Witherella, P., Herronb, J., Ametac, G., "Towards Annotations and Product Definitions for Additive Manufacturing", *Procedia CIRP* 43 (2016) 339 – 344.
- [37] ASTM ISO/ASTM52915-13, *Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1*, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013)
- [38] Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., "Improving dimensional accuracy of fused deposition modeling processed part using grey Taguchi method", *Materials and Design*, 30 (2009) 4243–4252.
- [39] Mohamed, O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L., "Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion", *Measurement*, (2016) 81 174–96.
- [40] Mahesh, M., Wong, Y.S., Fuh, J.Y.H., Loh, H.T., "Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes", *Rapid Prototyping*, 10 2 (2004) 123-135.
- [41] Nuñez, P.J., Rivas, A., García-Plaza, E., Beamud, E., Sanz-Lobera, A., "Dimensional and surface texture characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS plus", *Procedia Engineering*, 132 (2015) 856–63.

Hızlı Prototipleme Yaklaşımı ile Ortez üretimi: Kaynak Araştırması

İsmail ŞAHİN^a, M. İ. SARI^b ve Tolgahan ŞAHİN^b

^aG.Ü. Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Ankara, Türkiye,
isahin@gazi.edu.tr

^bG.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Ankara, Türkiye,
mismailsari@gmail.com, tolga_han38@hotmail.com

Özet

Hızlı prototipleme yaklaşımları yenilikçi ürün elde etme potansiyeli açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu fırsatlar bilimin tüm alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kas – iskelet sistemi bozukluklarının tedavi süreçleri bunların arasındadır. Ortezler kas – iskelet sistemi bozukluklarının tedavi süreçlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ortotik cihazların imalatında kullanılan geleneksel yöntemler bireysel çözümler sunmaktan ziyade genel çözümler sunar. Bu durum hastalarda hem konfor hem de tedavi süreci açısından dezavantaja yol açar. Bu dezavantajların ortadan kaldırılmasında ortezlerin kişiye özel tasarımı ve imali son yıllarda yoğun bir çalışma alanıdır. Hızlı prototipleme yaklaşımları bu çalışmalarda öne çıkmaktadır. Ortezlerin kişiselleştirilmesinde hızlı prototipleme yaklaşımlarının kullanılması, fonksiyonellik ve geometrik uygunluk açısından (ölçü tamlığı, ergonomi vb.) önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışmada ortez tasarım ve imalatında hızlı prototipleme yaklaşımlarını kullanan çalışmalar incelenmekte ve geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ortez, Hızlı Prototipleme, 3B yazdırma

Sorumlu Yazar: İsmail ŞAHİN, isahin@gazi.edu.tr

Ortheses Production with Rapid Prototyping Approach: A Literatur Review

Abstract

Rapid prototyping approaches offer significant opportunities in terms of potential innovative products. These opportunities are widely used in all disciplines of science. Among these are the treatment processes of musculoskeletal system disorders. Orthoses are used extensively in the treatment of musculoskeletal disorders. Conventional methods used in the manufacture of orthotic devices offer rather general solutions than offering individual solutions. This leads to disadvantages for patients both in terms of comfort and treatment process. The special design and manufacture of orthosis for the removal of these disadvantages is an intense field of work in recent years. Rapid prototyping approaches stand out in these studies. The use of rapid prototyping approaches in the personalization of orthoses provides significant advantages in terms of functionality and geometric fit (dimensional accuracy, ergonomics, etc.). In this study, studies using rapid prototyping approaches in the design and manufacturing of orthoses are examined and compared with traditional manufacturing methods.

Keywords: Ortheses, Rapid Prototyping, 3D Printing

1. GİRİŞ

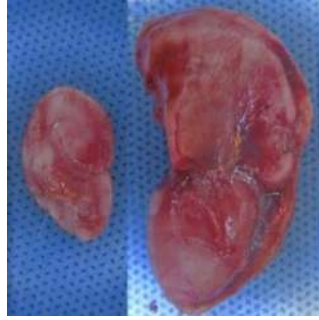
1970'lerde bazı deneyler yapılmasına rağmen hızlı prototiplemeye yönelik çalışmaların başlangıcı 1980'li yılların sonu olarak kabul edilir. Fakat o dönemde kullanımı profesyoneller ile sınırlı kalmıştır [1]. İlk aşamada mimarlar, sanatçılar ve ürün tasarımcıları tarafından yeni tasarımlarının prototiplerini veya maketlerini yapmak için kullanılmıştır [2]. Kullanım sınırlılığının nedeni makinelerin ve kullanılan hammaddelerin yüksek maliyetiydi. Günümüzde geniş çaptaki hammadde (plastik, polimer, süper alaşımlar, titanyum, paslanmaz çelik, seramik vb.) kullanım imkânı ile birlikte maliyetler düşmüştü ve bu sınırlılık ortadan kalkmıştır. Böylece her sektörde 3B baskı teknolojisinden faydalanılmaya başlanmıştır. Artık 3B baskı yapabilen cihazlar ile deniz aracından canlı hücreye, yemekten kıyafete kadar çok geniş bir yelpazede üretim yapabilmek mümkündür. Artık 3B yazıcılar ile dişli gibi basit nesneler 1 saatten kısa bir sürede üretilmektedir [2].

Günümüzde 3B baskı teknolojisi ile üretilen ürünler günlük hayatımıza girmeye başlamıştır. Artık 3B baskı teknolojisi ile düşük enerji tüketimine sahip araçlar imal edilebilmektedir (Şekil 1). 44 saat içinde 3B baskı yöntemi ile karbon ve elyaf takviyeli ABS plastik ile üretilen Strati bunun yakın örneklerindendir [3].



Şekil 1. IMTS 2014' de 'Strati' [3]

Günümüzde tıbbi cihaz şirketleri, 3B baskı teknolojisinin en önemli müşterilerindendir. Diş hekimliği uzmanları ve kraniofasiyal rekonstrüktif cerrahlar, 1990'ların sonundan itibaren ABD' de eğitim ve cerrahi planlama için üst düzey 3B baskı makineleri kullanıyor olsa da, son on yılda hastalar için özel tasarım implantlar basmaya başlamışlardır [4]. Gelişen 3B baskı teknolojisi laboratuvarında canlı hücreler ile organ ve doku üretimini mümkün kılmaktadır. Bu amaçla 1999 yılında ABD'de bulunan Wake Forest Araştırma Enstitüsü'nde yürütülen bir araştırmada laboratuvar ortamında canlı hücrelerden üretilen bir organ insana nakledilmiştir [5]. Artık biyomedikal şirketleri gerçek vücut parçalarının dokusunu ve yapısını birebir taklit eden 'ultra-gerçekçi' 3B basılmış organları ve diğer dokuları imal edebilmektedirler [6].



Şekil 2. Cornell araştırmacıları tarafından canlı kıkırdak hücrelerinden 3B baskı makinesi ile üretilmiş bir kulak kepçesi

Ortez, vücutta organ kaybının olmadığı ancak organın anatomik, fizyolojik ve mekanik yapısında bozukluğun olduğu durumlarda söz konusu bölgeyi düzeltmek, desteklemek, hareketsiz konuma getirmek veya fonksiyon kazandırmak amacıyla kullanılan medikal üründür [7]. Ortezler hastaya özel tasarım gerektiren medikal ürünlerdir. Üretimlerinde plastik, alüminyum, deri, çelik vb. malzemeler kullanılmaktadır. Hali hazırda kullanılan statik üst ekstremité ortezlerinin (temel opponens splinti, uzun opponens splinti, başparmak spica splinti, el istirahat splinti, bilek splintleri vb.) ve alt ekstremité ortezlerinin (UCBL, submalleolar, supramalleolar, leaf-spring AFO, eklemlili AFO, rigid AFO, grafo vb.) ciltte zedelenme, kontraktürler, enfeksiyon vb. komplikasyonları bulunmaktadır. Söz konusu ortezler kullanıldığı bölgede terlemeye neden olmakta ve bu terleme kötü kokulara sebebiyet vermektedir. Tasarımlarından dolayı oldukça hantal ve hacimli bir yapıya sahip olan ortezlerin, su ile temasının kısıtlı olması da hastalar açısından günlük hayatta zorluklar oluşturmaktadır. Ülkemizde ortez üretiminin büyük bir bölümü özel firmalar tarafından yapılmaktadır. Dolayısıyla piyasada ki ürünlerde fiyat ve kalite açısından farklılıklarla karşılaşmaktadır.

3B baskı teknolojisi daha hafif, görünüm olarak daha zarif, kullanıcının su ile temasını kısıtlamayan, terlemeye neden olmayan ortez üretimini mümkün kılmaktadır. Tasarım esnasında 3B tarayıcı cihazlar kullanmak yanlış ölçü alma ve hastaya uyumsuzluk gibi sorunların en az düzeye inmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda 3B baskı teknolojisi ile ortez üretiminde maliyet ve ürün kalitesi bakımından belli bir standardın yakalanabileceği düşünülmektedir.

2. TÜRKİYE' DE ORTEZ KULLANIMI

Ortezler fonksiyonlarına göre statik ve dinamik olarak, kullanıldığı bölgeye göre ise üst ekstremité, alt ekstremité ve spinal (gövde) ortezleri şeklinde sınıflandırılırlar. Statik ortezler uygulandığı eklem hareketini kısıtlamak için kullanılır iken dinamik ortezler uygulandığı bölgenin fonksiyonunu arttırmak için kullanılır.

Üst ekstremité ortezleri kol, önkol, el, el bileği ve parmak rahatsızlıklarının tedavisinde kullanılan medikal ürünlerdir. El tedavisinde kullanılan ortezler splint olarak adlandırılırlar. Splintler statik, yarı dinamik ve dinamik olmak üzere 3 grupta sınıflandırılırlar.

Alt ekstremité ortezleri diz, kalça, ayak, ayak bileği ve bacak tedavisinde kullanılırlar. Alt ekstremité ortezlerinin adlandırılmasında kullanıldığı bölgenin baş harfleri kullanılır. FO (Foot Orthosis, ayak ortezi), AFO (Ankle-Foot Orthosis, ayak bileği ortezi), DAFO (Dynamic-Ankle-Foot Orthosis), KAFO (Knee-Ankle-Foot Orthosis, diz-ayak bileği-ayak ortezi), HKAFO (Hip-Knee-Ankle-Foot Orthosis, kalça-diz-ayak bileği-ayak ortezi) vb. şekilde adlandırılırlar.

Spinal (gövde) ortezler, omurga, boyun ve gövdenin tedavisinde kullanılan ürünlerdir. Spinal ortezlerin görevi, kullanıldığı bölgenin hareketini kısıtlamak veya bölgeyi hareketsiz kılmaktır.

Ortezler hastaya özel olarak, devlet kurumları ya da özel kurumlar tarafından üretilirler. Ortezin hastaya özel şekilde üretilmesi ve uygulanması çok önemlidir. Hastaya uygun üretilmeyen ve hastanın ihtiyacını karşılamayan ortez, hastanın tedavisinin eksik kalmasına ve bağımsızlığını tam olarak elde edememesine neden olacaktır [8].

Ülkemizde engelli nüfusun sayısal verisini elde edebileceğimiz her hangi bir kayıt sistemi mevcut değildir. Dolayısıyla engel nitelikleri konusunda da büyük bir bilgi eksiği vardır. Devlet İstatistik Enstitüsü ve Özürlüler İdaresi Başkanlığı tarafından, 2002 yılında gerçekleştirilen 'Türkiye Özürlüler Araştırması' ülkemizdeki tek kapsamlı ulusal özürlülük araştırmasıdır [9]. Türkiye Özürlüler Araştırması'nda yer alan verilere göre toplam nüfus içerisinde ki engelli nüfusun oranı %12,29 iken ortopedik engelli nüfusun oranı %1,25'dir.

Türkiye' de ortez ve protez alanında ki ilk çalışmalar II. Abdülhamid devrinde başlamış, ilk devlet üniversitesi atölyesi ise Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Ortopedik Cerrahi Bölümü bünyesinde kurulmuştur [10]. SGK Genel Müdürlüğü'nden elde edilen verilere göre ülkemizde Kasım 2006 ve Kasım 2011 dönemleri arasındaki 5 yıllık süreçte 19381 ortez uluslararası ortez terminolojisine uygun olarak reçelendirilmiş, tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bu ortez uygulamaları kendi içerisinde sınıflandırıldığında 9588'i alt ekstremité ortezi, 1579'u üst ekstremité ortezi ve 8214' ü omurga ortezi şeklinde uygulanmıştır. El-el bileği ortezlerinin elde edilen verilerden daha fazla miktarda uygulandığı düşünülmektedir. Bu veriler haricinde SGK dışındaki kurum ve kişiler tarafından karşılanmış olan veya hazır olarak uygulanmış ortezler de vardır. Ayak-ayak bileği ve el-el bileği ortezlerinin daha çok bu kapsamda olduğu tahmin edilmektedir. Çalışmada elde edilen veriler Çizelge 1'de ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Çizelge 1. Türkiye'de ortez uygulamaları [10]

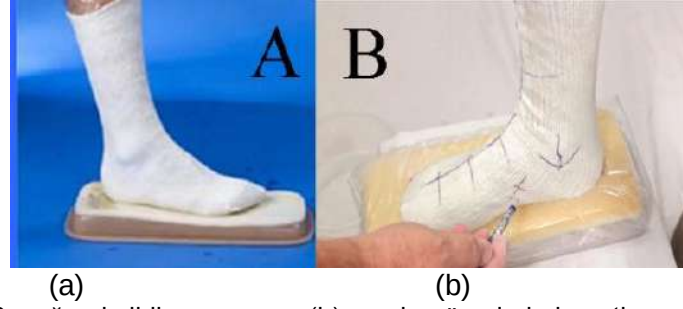
Alt Ekstremité Ortezleri	(%49,4)	Sayı
Uzun Yürüme		7837
Uzun Yürüme Ortezi(Lateral Eklemli)		7131
O Bain Ortezi		497
Thomas Uzun Yürüme Ortezi		209
Diz Ortezi (KO)		488
Eklemsiz Plastik KO		225
Eklemli KO		150
Rekurvasyon Ortezi		113

Kalça Ortezleri		1694
DKÇ Ortezleri		1498
Scottish Rite Ortezleri		196
Diğer		565
Sarmiento Ortezleri		482
AFO (Pes ekinovarus)		83
Omurga Ortezleri	(%42,4)	8214
Knight Korse		5973
Milwaukee/Boston Skolyoz Korseleri		1095
Hiperekstansiyon Korse		769
TLSO Korse		338
Steindler Tip TLSO Korse		39
Üst Ekstremitte Ortezleri	(%8,2)	1579
Sarmiento Ortezleri		1002
Epikondilit Ortezi		232
Statik Kol Abduksiyon Ortezi		168
Dinamik Kol Abduksiyon Ortezi		70
Poliform El-Bilek-Dirsek Ortezi		52
Parmak Kontraktür Ortezi		34
Dirsek Kontraktür Ortezi		21
TOPLAM		19381

3. GELENEKSEL YÖNTEM İLE ORTEZ ÜRETİMİ

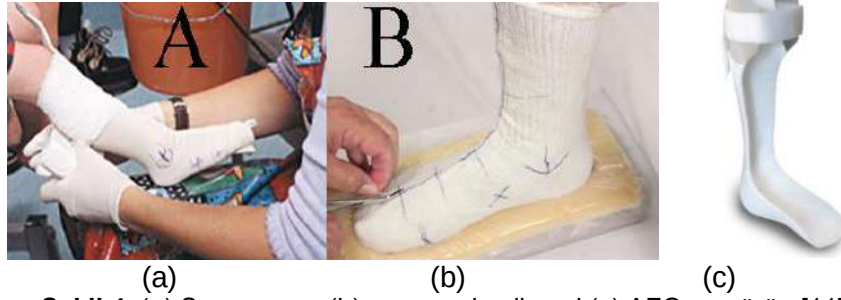
Ortezler, protez ve ortez teknikeri/teknisyeni tarafından hastaya özel olarak, doktorun verdiği reçeteye göre, dayanıklı, kaliteli ve biomekanik prensiplere göre üretilirler. Teknisyenler/teknikerler ortez yapımında ölçme ve kontrol aletleri, bandaj malzemeleri, tutkal, oksijen, asetilen, alçılar, kaynak makineleri, freze aletleri, torna kalemleri, markalama aletleri ve şekil verebilmek için ısıtıcı cihazlar kullanırlar.

AFO, geleneksel üretim yönteminin en fazla uygulandığı ortez çeşitlerinden birisidir. Yetenekli bir ortopedi teknisyeninin AFO üretimi 4 saate kadar sürebilir [11]. Geleneksel yöntem ile ortez üretiminin en önemli aşaması olarak hastanın uygun pozisyonda model edilmesi kabul edilebilir. AFO üretiminde öncelikle hasta bir sandalyeye oturtulmalı ve hastanın alt ekstremitesi biyomekanik açıdan uygun şekilde konumlandırılmalıdır. Sandalyede uygun pozisyonda konumlanan hastanın bacağına çorap giydirilir (Şekil 3-a). Çorabın üzerinde kemik çıkıntıları kalem ile işaretlenir (Şekil 3-b). İşaretleme yapıldıktan sonra çorabın üzerine tibia ile uyumlu bir şekilde plastik destek konumlandırılır.



Şekil 3. (a) Bacağa giydirilen çorap ve (b) çorabın üzerinde işaretleme yapılması [11]

Konumlandırılan plastiğin ardından bacağın ortasından başlayacak şekilde siva sargısı ile çorabın üzeri sarılır (Şekil 4-a). Siva kuruduktan sonra tibia boyunca, işaretlenen noktalara dikkat edilerek kesilerek kalıp açılır (Şekil 4-b).



Şekil 4. (a) Siva sargısı (b) sargının kesilmesi (c) AFO son ürün [11]

Hastadan çıkarılan kalıp uygun şekilde zimbalanarak sağlamlaştırılır. Çıkarılan kalıbın üzeri sıcak termoplastik ile kaplanır. Termoplastiğin sıcak olması el ile şekil vermeyi mümkün kılar. Soğuyan malzeme kesilerek çıkarılır. Frezeleme işlemi yapılarak düzeltilmesi gereken yerlere son işlem uygulanır. Bandajları monte edilen AFO teslimata hazır hale gelir (Şekil 4-c). Depolama gerekçelerinden dolayı, kliniklerdeki çoğu bacak kalıbı tipik olarak 2 aydan daha uzun süre tutulamaz [11]. Bu da AFO'ya yeniden ihtiyaç olması halinde tüm işlemlerin hastaya baştan uygulanması anlamına gelmektedir.

4. 3B BASKI YÖNTEMİ İLE ORTEZ ÜRETİMİ

3B baskı teknolojisi ile ortez üretiminde üç temel aşama bulunmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla şu şekildedir;

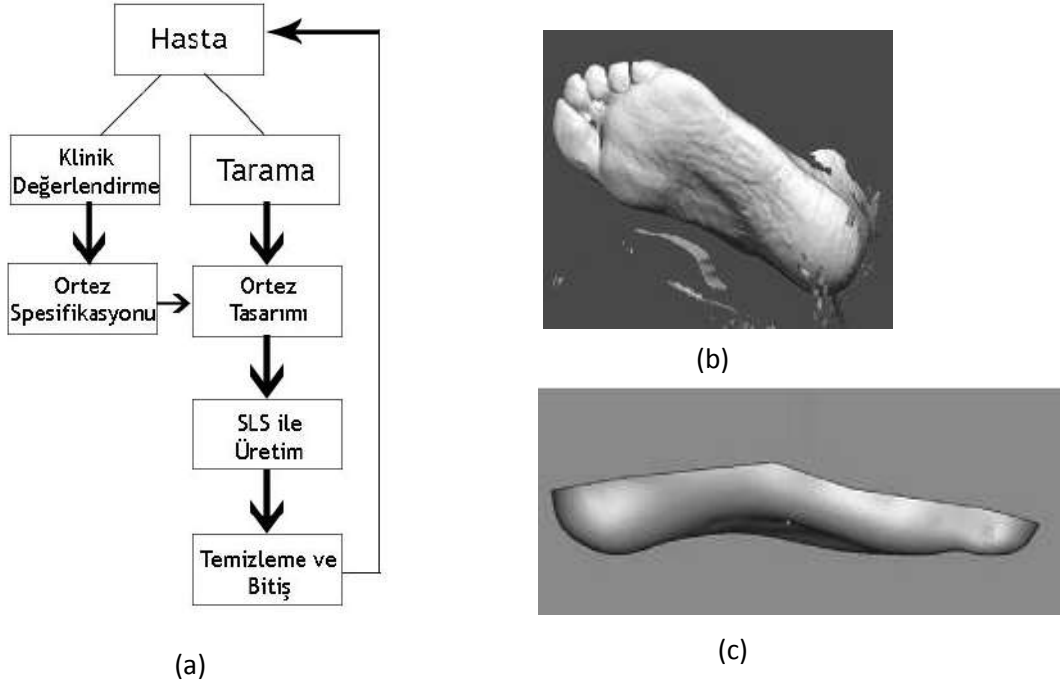
- Hastanın uygun pozisyona konumlandırılması ve uygulama yapılacak uzvunun 3B tarayıcı ile taraması,
- Taramadan elde edilen verilerin bilgisayar ortamında işlenmesi ve ortez modelinin oluşturulması,
- Elde edilen modelin uygun bir 3B yazıcı yoluyla üretilmesi.

3B baskı yöntemi ile ortez üretimi ile ilgili çalışmalar iki ana başlık altında incelenmiştir:

- Alt Ekstremitte Ortezi üretimi
- Üst ekstremitte ortezi üretimi

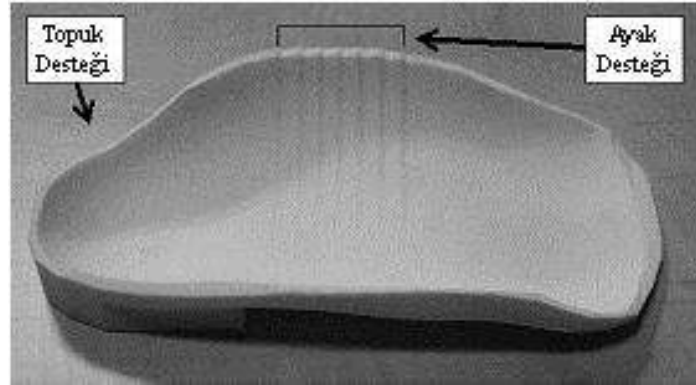
4.1. 3B Baskı Yöntemi İle Alt Ekstremitte Ortezi İmalatı

Pallari ve arkadaşları Romatoid Artrit (RA) hastalarının tedavisine yönelik olarak FO üretmiştir [12]. Şekil 5'te hızlı prototip oluşturma aşamaları verilen çalışmada imal edilen FO farklı yaş, boy ve kiloda ki 7 hastaya uygulanmıştır. Uygulamadan sonra hastaların yürüyüşleri ve rahatlıkları incelenmiştir. Yapılan inceleme ve araştırmalar neticesinde imal edilen FO'nun RA tedavisinde reçetelendirilmiş ortez kadar iyi etki gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Klinik değerlendirmelerle spesifikasyonu yapılan ortezin geometrisi ayağın 3B tarayıcılarla taraması ile oluşturulmuştur (Şekil 5). Taramanın doğruluğunu arttırabilmek için ayak 2-3 defa taramıştır.



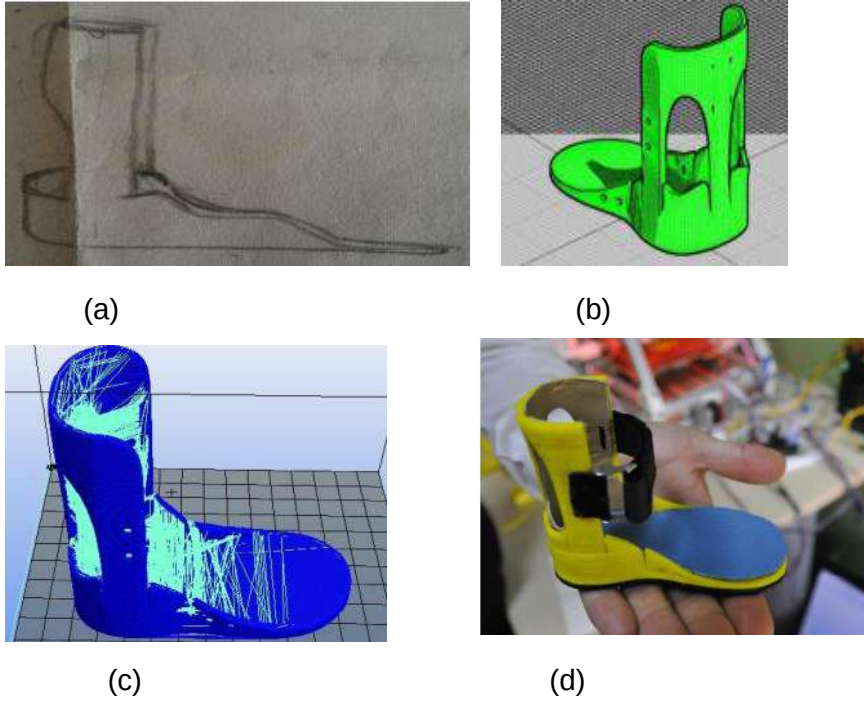
Şekil 5. (a) FO Üretim Aşamaları (b) Ham ayak taraması (c) Ayağın katı modeli [12]

Ortezin imalatında 3D Systems firması tarafından geliştirilen bir Nylon 12 olan DuraForm PA (SLS) ürünü kullanılmıştır. Bu ürün Birleşik Devletler Farmakopesi (USP) sınıf VI sertifikasına (plastik malzemelerin biyoyumlu olmasına ve deri ile temas durumlarında kullanılmasına izin veren sertifika) sahip bir üründür [13]. 3B yazıcı ile yazdırılan FO makineden çıkartıldıktan sonra temizliği yapılmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. 3B yazıcı ile imal edilen FO [12]

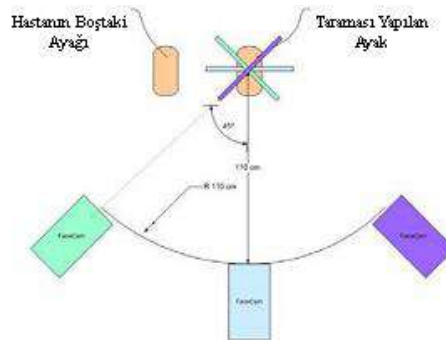
3B yazıcı ile ortez üretimi ile ilgili bir başka çalışma Aydın ve Küçük tarafından gerçekleştirilmiştir [14]. Çalışmada 3B yazıcı ile bir AFO prototipi imal etmişlerdir. İmal edilen AFO ülkemiz literatüründe 3B yazıcı ile üretildiği bilinen ilk AFO olma özelliğine sahiptir. Çalışmada öncelikle bir 3B yazıcı açık kaynak kodlu donanımın geliştirilmesi yoluyla imal edilmiş ve sonrasında açık kaynak kodlu yazılımın iyileştirilmesiyle yoluyla kontrol edilmiştir. Açık kaynak kodlu yazıcıların özelliği kendi bileşenlerinin yaklaşık olarak yarısını üretebilme imkânına sahip olmalarıdır [15]. Çalışmada, AFO hastaya uygulanmadığı için 3B tarama gerçekleştirilmemiştir. Öncelikle kâğıt üzerinde bir AFO tasarlanmıştır (Şekil 7). Kâğıt üzerinde son şekline karar verilen AFO Autodesk firması tarafından geliştirilen 3ds Max programında 3B olarak modellenmiştir. 3B modellemesi gerçekleştirilen AFO, 'Slic3r' programı ile 2B katmanlarına ayrıştırılmış ve AFO'nun G-kod dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Katman ayrıştırma işlemi tamamlanan model baskıya hazır hale getirilmiştir. Baskıya hazır hale gelen AFO açık kaynak kodlu 3B yazıcı ile imal edilmiştir. İmalatta poliaktik asit malzeme kullanılmıştır. Yazdırma işlemi yaklaşık olarak 8 saat sürmüştür. İmal edilen AFO, prototip olarak üretilmiştir. Dolayısıyla hasta üzerinde uygulanmamıştır.



Şekil 7. (a) Kağıt üzerinde AFO tasarımı (b) 3B model (c) 2B katmanlara ayırma (d) 3B yazıcı ile imal edilen AFO [14]

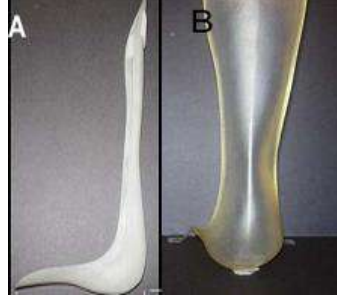
Cook ve arkadaşlarının çalışması 3B tarayıcı ve yazıcı kullanarak pedortez üretimi üzerinedir. Çalışmada ortez geometrisi 3B tarayıcı kullanarak çıkartılmıştır [16]. Elde edilen tarama verisi CAD/CAM programı ile düzenlenmiştir. Yapılan düzenlemelerin ardından ortezin sert kenarları 3D Systems firmasına ait olan seçici lazer sinterleme (SLS) yapan 3B yazıcı ile iç bölgedeki yumuşak yüzeyler ise SLA 5000 3B yazıcısı ile imal edilmiştir.

Alt ekstremitte ortezi uygulamasına yönelik olarak yürütülen bir başka çalışmada AliMed firması tarafından üretilen *Type C-90 Superior Posterior Leaf Spring* alt ekstremitte ortezi model alınmıştır [11]. Çalışma kapsamında yapılan tarama işleminde üç adet CCD kamera ve bir adet projektöre sahip çok sensörlü bir sistem kullanılmıştır [17]. Tarama işlemi dizden başlayarak ayak bileğine doğru yapılmıştır. Tarama yapılırken arka planda beyaz fon kullanılmıştır. Aynı zamanda ayağın üç farklı noktadan taraması yapılarak doğruluk payı artırılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. 3D FaceCam 500 3B tarayıcı ile ayak taraması [11]

Model oluşturulduktan sonra farklı hammaddeler kullanılarak iki farklı AFO imal edilmiştir. İlk üründe Accura 40 fotopolimer reçinesi kullanılırken ikinci üründe DSM Domos 9120 Epoxy fotopolimeri kullanılmıştır. Accura 40 ile üretilen AFO'nun (Şekil 9-a) daha sert, DSM Domos 9120 Epoxy ile üretilen AFO'nun (Şekil 9-b) daha esnek olduğu görülmüştür [11].



Şekil 9. Farklı malzemelerle üretilen AFO'lar (a) Accura 40 (b) Epoxy [11]

Milusheva ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise 3B yazıcı ve tarayıcı kullanarak ayak bileği ortezi imal edilmiştir [18]. Çalışmada 3B modelin ortaya çıkartılmasında hastanın tomografi görüntüleri ve 3B tarama verileri kullanılmıştır. Elde edilen tarama verileri seçici lazer sinterleme (SLS) 3B yazıcısı ile imal edilmiştir. Modellemeden önce gerçekleştirilen tarama işleminde iki yöntem kullanılabilir. İlk yöntemde direk taramak istenen uzun taraması gerçekleştirilir (Şekil 10-a), ikinci yöntemde ise uzun balmumu kalıbı çıkartılarak bu kalıbın 3B taraması gerçekleştirilir (Şekil 10-b).

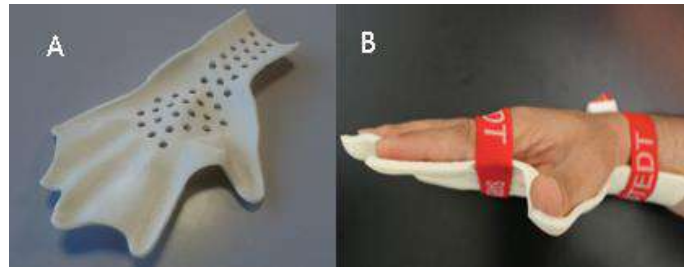


Şekil 10. (a) Balmumu kalıp elde edilmesi (b) 3B nokta bulutu [18]

4.2. 3B Baskı Yöntemi İle Üst Ekstremité Ortezı İmalatı

3B tarayıcı ve yazıcılar ile ortez imalatı çalışmalarında her ne kadar alt ekstremité ortezleri daha fazla yer kaplıyor olsa da üst ekstremité ortezlerinin imalatına yönelik çalışmalar da mevcuttur.

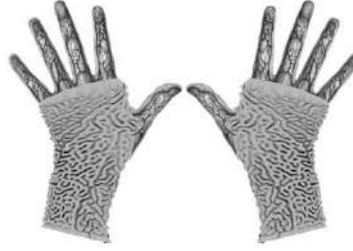
Baronio ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen araştırmada bir üst ekstremité ortezi tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir [19]. Çalışmada öncelikle bilekten parmak ucuna kadar tarama gerçekleştirilmiştir. Tarama işlemi neticesinde elde edilen nokta bulutu yazılım aracılığıyla düzenlenmiş, yanlış noktalar temizlenmiş ve noktaların son düzenlemesi yapılmıştır. CAD/CAM programında ortezin katı modellenmesi tamamlanmıştır. Tasarımı ve modellenmesi tamamlanan 3B yazıcı ile imal edilmiştir (Şekil 11). İmalatta hammadde olarak ABS plastik kullanılmıştır. İmalatın tamamlanması 11 saat sürmüştür.



Şekil 11. (a) 3B yazıcı ile imal edilmiş ortez, (b) Ortezin kullanımı [19]

Oxman tarafından tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen 'Carpal Skin' isimli bir bilek splinti prototipi, karpal tünel sendromunun tedavisini amaçlamaktadır [20]. Oxman'ın ürettiği splint vücut ile birlikte çalışan biyometik bir üründür (Şekil 12). 'Carpal Skin', hastanın ağrı haritasına göre damarlara sert diğer kısımlara yu-

muşak etki uygulayarak hastayı rahatlatmayı amaçlamaktadır. Sertlik değişiminin kontrolünde hayvan derisinin sertlik değişimi kontrolünden esinlenilmiştir [21].



Şekil 12. 'Carpal Skin' isimli splint [20]

Bir diğer çalışmada farklı modellerde el bileği splintleri üretilerek bir çalışma yapılmıştır [22]. Yapılan çalışmada farklı modellerde el bileği splintleri farklı CAD/CAM programları ile modellenmiş ve farklı 3B yazıcılar ile üretimleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde el bileği splinti imalatı için en uygun baskı ve modelleme yöntemine karar verilmeye çalışılmıştır (Şekil 13).



Şekil 13. Bazı el bileği splintleri [22]

Palousek ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında; bir el bileği ortezi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır [23]. Yapılan çalışmada el bileğinin taramasında üzerinde 10 megapiksel çözünürlüğünde dört adet kamera bulunan bir tarayıcı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tarama sonucunda 48.058 noktaya sahip nokta bulutu elde edilmiştir. Geometrisi düzeltilen ve işlemleri tamamlanan ortezin imalatında ABS plastik kullanılmıştır. İmalat 9,5 saat civarında tamamlanmıştır (Şekil 14).



Şekil 14. (a) Ortezin 3B modeli, (b) 3B yazıcı ile imal edilen ortez, (c) ortezin kullanımı [23]

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Ortezler hastaya özel imal edilmesi gereken medikal ürünlerdir. Geleneksel yöntem ile ortez üretimi hem zahmetli, hem masraflı hem de vakit açısından dezavantajlıdır. Günümüz teknolojisi tüm bu parametrelerin değişmesine neden olmuştur. 3B baskı teknolojisi ile hastaya özel ortez tasarımı ve imalatı artık sadece birkaç saatte gerçekleştirilebilmektedir. İmal edilen ortezler hem konforlu, hem ucuz hem de estetikdir.

Alanda yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda dünya genelinde, 3B tarayıcılar ve yazıcılar ile ortez üretimi konusunda sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Ülkemizde ise bu konudaki çalışma sayısı yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Bunun yanında yapılan çalışmaların tamamına yakınının alt ekstremité ortezlerinin tasarımı ve uygulanması üzerine olduğu tespit edilmiştir. Çalışmaların, alt ekstremité ürünleri içerisinde daha çok AFO ve FO üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Alt ekstremité ortezlerinin hastaya özel olarak tasarlanması ve uygulanması, çalışmaların bu alanda yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Hastaların üst ekstremitte tedavilerinde özel tasarım ürünlerden ziyade hazır medikal ürünleri tercih ettikleri düşünülmektedir. Hali hazırda 3B baskı teknolojisi ile ortez üretimi alanındaki çalışmalar sınırlı sayıda olsa da gün geçtikçe bu alandaki çalışma sayısı artmaktadır. Ülkemizde de bu konuda yeni çalışmalar yapılması kaçınılmazdır. İlerleyen teknoloji ve düşen maliyetler neticesinde önümüzdeki yıllarda hastaların kendi ortezlerini kendilerinin üretebileceği öngörülmektedir.

Referanslar

1. Canessa E., Fonda C., Zennaro M., "Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development", 1st ed., The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Italy, 2013.
2. Berman B., "3-D printing: The new industrial revolution", Business Horizons, Kelley School Of Business , Indiana University, Indiana, USA, 2012.
3. Richardson M., Will F., Napper R., "Car Design For Distributed Microfactory Production", Australian Transport Research Forum, Sydney, Australia, 2015.
4. Oliker, A., "3D Printing: Revolutionizing Medicine", Americas Quarterly, New York, USA, Spring 2015.
5. Kosheutova N. V., "3D Printers In Medicine, It Present And Future", International Conference On Information Technologies In Science, Administration, Social Services And Medicine, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 2014.
6. Web: http://www.nature.com/scitable/blog/scibytes/3d_printing_resshapes_medicine?isCommentShow=N, 2014, ziyaret tarihi: 12.02.2017
7. Alsancak S., "Ortez ve Protez Tarihçesi", Ankara Üniversitesi Dikimevi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Yıllığı, 2000;1.
8. Engelli ve Yaşlı Hizmetleri Genel Müdürlüğü, "Ortopedik Hazır ve Ismarlama Protez Ortez Teknik El Kitabı", Karmen Matbaa, İstanbul, 2014.
9. Özürlüler İdaresi Başkanlığı (ÖİB), Devlet İstatistik Enstitüsü (DİE), "2002 Türkiye Özürlüler Araştırması", 2. Baskı, Devlet İstatistik Enstitüsü Matbaası, Ankara, 2009.
10. Alsancak S., Altınkaynak H., Güner S., "Sosyal Güvenlik Kurumu verilerine göre Türkiye'de hastaya özel yapılarak uygulanan protez ve ortezlerin sayısal çeşitlilik analizi", Fizyoterapi Rehabilitasyon, 2013;24(1):99-103.
11. Mavroidis C., Ranky R. G., Sivak M. L., Patriitti B. L., DiPisa J., Caddle A., Gilhooly K., Govoni L., Sivak S., Lancia M., Drillio R., Bonato P., "Patient Specific Ankle-Foot Orthoses Using Rapid Prototyping", Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, UK, 2011;8:1.
12. Pallari J. H. P., Dalgarno K. W., Woodburn J., "Mass Customization Of Foot Orthoses For Rheumatoid Arthritis Using Selective Laser Sintering", IEEE Transactions On Biomedical Engineering, 2010;57:7.
13. web: <https://www.3dsystems.com/materials/duraform-pa>, Ziyaret tarihi:12.02.2017.
14. Aydın L., Küçük S., "Üç Boyutlu Yazıcı ve Tarayıcı ile Hastaya Özel Medikal Ortez Tasarımı ve Geliştirilmesi", Politeknik Dergisi, 2017;20 (1):1-8.
15. Wittbrodt B. T., Glover A. G., Laureto J., Anzalone G. C., Oppliger D., Irwin J. L., Pearce J. M., "Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3D printers", Mechatronics, 2013;23(6):713-726.
16. Cook D., Gervasi V., Rizza R., Kamara S., Liu X. C., "Additive Fabrication Of Custom Pedorthoses For Clubfoot Correction", Rapid Prototyping Journal, 2010;16(3):189-193.
17. Web: https://www.researchgate.net/figure/235263126_fig6_Figure-6-The-3D-FaceCam-500TM-system, Ziyaret tarihi:18.02.2017.
18. Milusheva S. M., Tosheva E. Y., Hieu L. C., Kouzmanov L. V., Zlatov N., Toshev Y. E., "Personalised Ankle-Foot Orthoses Design Based On Reverse Engineering", In Proceedings of the 5th Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 2006:12-14.
19. Baronio G., Harran S., Signoroni A., "A Critical Analysis of a Hand Orthosis Reverse Engineering and 3D Printing Process", Applied Bionics and Biomechanics, 2016.
20. Oxman N., "Structuring materiality: design fabrication of heterogeneous materials", Architectural Design, 2010;80(4):78-85.
21. Web: <http://www.materialecology.com/projects/details/carpal-skin>, Ziyaret tarihi: 22.02.2017.
22. Paterson A. M., Bibb R., Campbell R. I., Bingham G., "Comparing additive manufacturing technologies for customised wrist splints", Rapid Prototyping Journal, 2015;21(3):230-243.
23. Palousek D., Rosicky J., Koutny D., Stoklásek P., Navrat T., "Pilot Study Of The Wrist Orthosis Design Process", Rapid Prototyping Journal, 2014;20(1):27-32.

3D YAZICI İLE ÜRETİLEBİLEN SAVONIUS TÜRBİN KANADI TASARIMI

Kaan ASLAN, Süleyman Çınar ÇAĞAN, Berat Barış BULDUM
barisbuldum@mersin.edu.tr

Mersin University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 33343 Ciftlikkoy,
Mersin / TURKEY

ÖZET

Hızlı prototipleme, bilgisayar destekli tasarım (CAD) çizimlerinden ön model elde etmemizi sağlayan imalat teknolojisidir. Hızlı prototipleme cihazları vasıtasıyla bilgisayarda çizimi yapılmış her türlü ürünün ön modelini çok kısa bir süre içerisinde elde etme imkanı sağlamaktadır. Bu çalışmada, günümüzde yaygınlaşan hızlı prototipleme yöntemlerinden biri olan 3D yazıcı ile üretilmesi mümkün olan savonius türbin kanadı tasarımı yapılmıştır. Savonius rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisi yardımıyla elektrik üretimi sağlayan dikey eksenli rüzgar türbinleridir. Bu çalışmanın amacı, savonius türbin kanatlarının zarar gördükleri ya da deformasyona uğradıklarında 3D yazıcı teknolojisi sayesinde hızlı bir şekilde yeni kanadın üretilip, deforme olmuş ya da hasar gören kanadın değiştirilebilmesidir. Bu tasarım sürecinde uygun olan malzeme, kanat tasarımı ve 3D yazıcı yöntemi seçimi incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Savonius türbini, 3D yazıcı, Türbin kanadı tasarımı

SAVONIUS TURBINE ROTOR DESIGN PRODUCED BY 3D PRINTER

ABSTRACT

Rapid prototyping is a manufacturing technology that enables us to obtain a preliminary model from computer aided design (CAD) drawings. Through the rapid prototyping devices, it is possible to obtain the preliminary model of any product drawn in the computer in a very short time. In this study, Savonius turbine wing design which can be produced by 3D printer which is one of the rapid prototyping methods which is becoming widespread nowadays is done. Savonius wind turbines are vertical axis wind turbines that provide electricity generation by means of wind energy. The purpose of this work is to replace the damaged wing of a new wing, deformed or damaged by rapid 3D laser printer technology when the Savonius turbine blades are damaged or undergoing deformation. In this design process, the choice of suitable material, wing design and 3D printer method is examined.

Keywords: Savonius turbine, 3D printer, Turbine rotor design

1. GİRİŞ

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri, her yönden gelen rüzgârı yakalayabilecek nitelikte olduğu ve rotasyon mekanizmalarına, dümenlere veya rüzgâr yönünde olan konik işlemeye ihtiyaç duymadığı savunulmaktadır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin elektrik jeneratörleri, çevreye yakın konumlandırılabilir ve kolayca ulaşılabilir. Düşey eksenlerde rüzgâr türbinleri olmak üzere iki ayrı tip var: Darrieus ve Savonius rüzgâr türbinleri [1].



Şekil 1: Savonius Türbinleri

Savonius rüzgâr türbini, 1992 yılında Finlandiya'lı mühendis S.J. Savonius tarafından piyasaya sunulan, bir rotoru kullanan dikey eksen makinesidir. En basit biçiminde, karşıt yönlerde merkezi bir mile sabitlenmiş iki kepçe ya da iki yarım silindirden meydana gelmektedir. Her kepçe ya da yarım silindir rüzgârları yakalar ve böylece şaftını döndürür, karşı kepçeyi ya da yarım silindiri rüzgâr akışına sokmaktadır. Daha sonra bu kepçe veya yarım silindir, işlemi tekrarlar ve böylece milin daha fazla dönmesine ve tam bir rotasyona dönüşmesine neden olmaktadır. Bu işlem rüzgârın olduğu süre boyunca devam etmektedir. Milin döndürülmesi bir pompa veya küçük bir jeneratörü kullanmak için kullanılmaktadır [2].

Hızlı prototipleme ise, bilgisayarda üç boyutlu tasarımı yapılmış bir çizimin direk olarak elle tutulur bir modele dönüştürme yöntemidir. Hızlı prototipleme cihazları sayesinde bilgisayar ortamında 3 boyutlu çimi yapılan bir tasarımın saatler içerisinde bire bir modelini elde edilebilmektedir. Hızlı prototipleme yöntemlerinden biri olan 3D yazıcılar son yıllarda kullanımı ve gelişimi artmıştır.



Şekil 2: Ofis ortamında 3D yazıcı Örneği

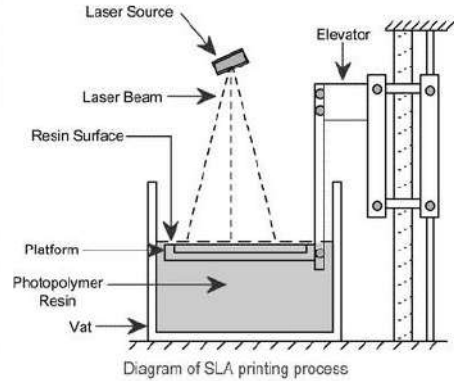
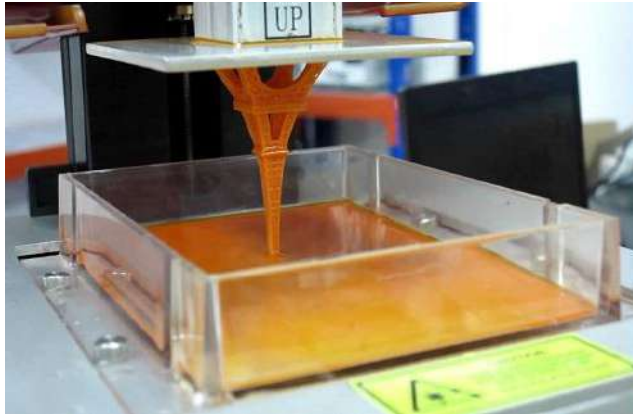
3D yazıcının tanımı tam doğru değildir. Bu alandaki bazı uzmanlar 3D yazıcıyı mürekkep püskürtmeli baskı kafalarına sahip bir birime katman bazlı olarak oluşturan birimlerle sınırlarken, bazıları bu terimi nispeten düşük maliyetli ve kullanımı kolay olan hızlı prototipleme makinelerinin ofis veya tüketici sürümleri için kullanırlar. Fakat görüldüğü üzere 3D yazıcı terimi, farklı malzemelerdeki parçaların ve ürünlerin üretimi için kapsamlı bir yetenek yelpazesi sunan birçok süreç ve teknolojiyi kapsar. Esasen, tüm süreçler ve teknolojilerin ortak noktası, kalıplama / döküm yöntemi içeren geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, katmanlı bir işleme olup katmanlarının yürütülmesi biçimidir. 3D yazıcılar, geleneksel renkli lazer veya mürekkep püskürtmeli yazıcılara benzer şekilde çalışır, ancak çok renkli mürekkep kullanmadan, 3D yazıcı, tabaka bazında bir görüntüye yavaş yavaş bir şekil vermektedir. Ayrıca 3D yazıcılar her bir katmanın tam olarak nasıl oluşturulacağını belirlemek için her bir ürünün binlerce kesitini ölçen 3D CAD yazılımını kullanmaktadır. Günümüzde birçok çeşitte 3D yazıcı tipleri ve bu yöntemlere göre malzeme seçenekleri bulunmaktadır [3].

Bu çalışmanın amacı 3D yazıcıda üretilen savonius rüzgâr türbin kanadı tasarlamak, uygun 3D yazıcı yöntemini ve malzemeyi belirlemektir.

2. 3D YAZICI YÖNTEMLERİ

2.1. Stereolithography (SLA) – Sıvı Bazlı 3D Yazıcı

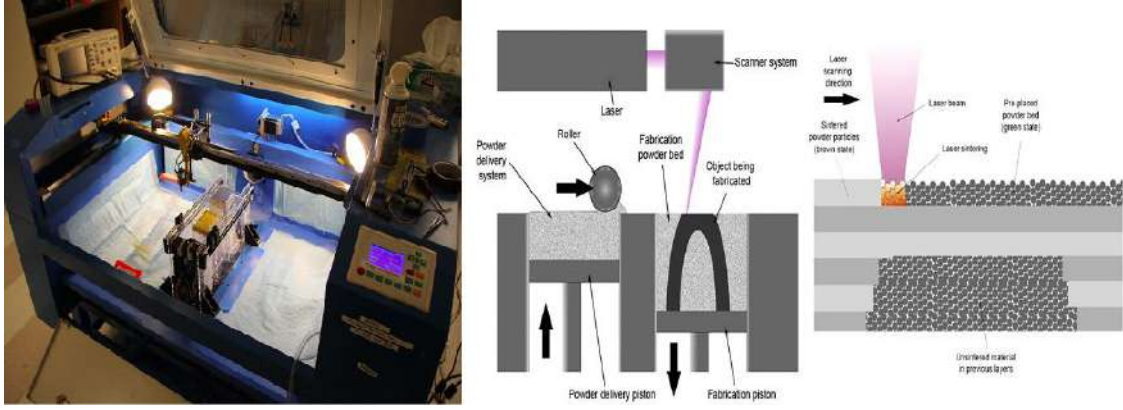
İlk ticari 3D yazıcı 1986 yılında Charles Hull tarafından icat edilen Stereolithography adlı bir tekniğe dayanmaktadır. Stereolithographic 3D yazıcılarda, akışkan reçinenin ardışık katmanları, UV ışınları veya lazerler kullanılarak sertleştirilmektedir. Her tabaka kaynaştırıldıktan sonra delikli tabla çok az indirilmektedir. UV / lazerle bir dilim daha izlenmektedir ve sertleştirilmektedir. Bu işlem, eksiksiz bir nesne yazdırılana kadar tekrarlanmaktadır. Bu teknoloji, ince yüzey kalitesi ve hassasiyeti nedeniyle mücevher sanayiinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Baskılı nesneler, parçaları güçlendirmek için kür sonrası işlem gerektirdiği için doğrudan kullanılmamaktadır [3,4].



Şekil 3: Sıvı bazlı 3D yazıcı örneği ve şematik gösterimi

2.2. Selective Layer Sintering (SLS) – Toz Bazlı 3D Yazıcı

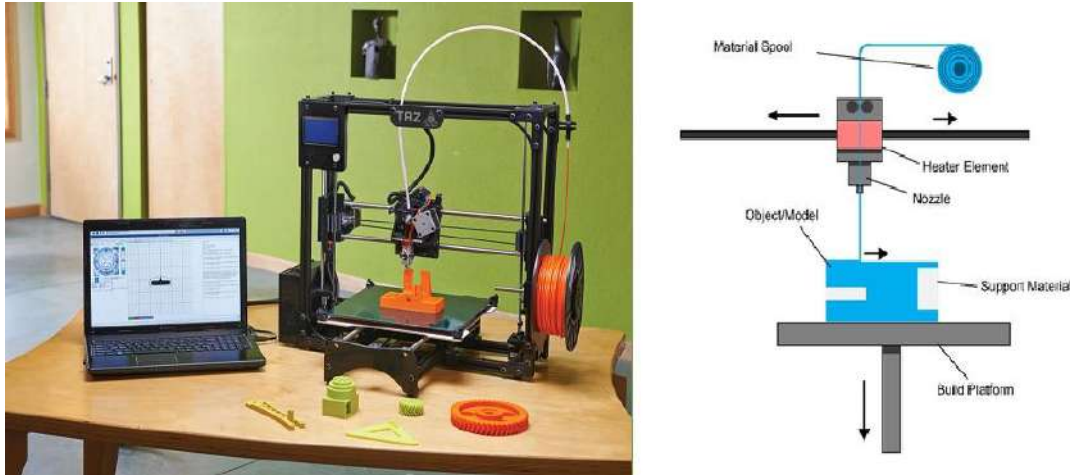
Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Texas Üniversitesi'nden Dr. Carl Deckard, Austin Üniversitesi'nden öğretim üyesi Dr. Joe Beaman ve DARPA'nın sponsorluğunda 1980'lerin ortalarında geliştirilmiş ve patentlenmiştir. Seçici Lazer Sinterlemede, bilgisayar kontrollü bir lazer, nesnenin enine kesitini küçük plastik, seramik veya cam parçacıkları üzerine çekerek platforma düşürmektedir. Lazer, kaynama noktasının hemen altına (sinterleme) veya kaynama noktasının (erime) üstüne ısıtmaktadır ve tozdaki parçacıkları katı bir formda birleştirmektedir. Bu işlem, tüm nesne oluşana kadar devam etmektedir. SLS 3D yazıcılarda üretilen parçalar snap-fit uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Parçaların basılması için toz kullanıldığından, bu makinelerin kullanımı sırasında özel bir dikkat gösterilmektedir. Bu makineler ofis ortamında kullanılmadığı gibi özel bir ortama ihtiyaç duymaktadır [3,4].



Şekil 4: Toz bazlı 3D yazıcı örneği ve şematik gösterimi

2.3. Fused Deposition Modeling (FDM): Plastik Filament Bazlı 3d Yazıcı

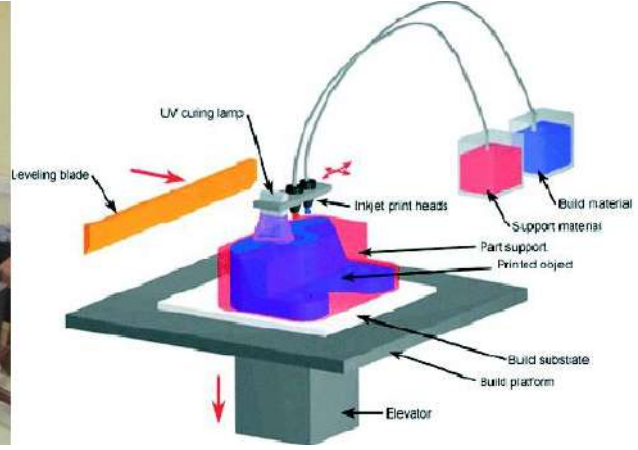
Erimiş depozisyon modellemesi (FDM), 1980'lerin sonunda Scott Crump tarafından geliştirilmiş ve 1990'da Stratasys tarafından ticarileştirilmiştir. Erimiş depozisyon modellemesi (FDM), bir plastik malzemeden oluşan filamanın ısıtılması ve ekstrüzyonlanması ile 3D prototipler oluşturmaktadır. Tipik bir FDM sisteminde ekstrüzyon nozulu, yapı platformunun üzerinde xy düzlemi üzerinde hareket etmektedir. Bu, nesnenin bir kesitini platforma çizmektedir. Bu ince tabakada plastik soğumaktadır ve sertleşmektedir. Soğuyan kesitin altındaki tabakaya bağlanmaktadır. Bir katman tamamlandıktan sonra taban bir kat daha alçalmaktadır ve bir sonraki plastik tabakasını soğuyan kesitin üzerine aynı işlemi uygulamaktadır. Bu, 3D yazıcılarda en çok kullanılan ve uygun fiyatlı bir teknolojidir. Gerçek mühendislik dereceli termoplastikleri kullandığı için yapılan parçalar daha güçlü, dayanıklı ve fonksiyonel test uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Parçaları doğru- dan ABS, PLA, naylon ve çeşitli diğer malzemeler oluşmaktadır [3,4].



Şekil 5: Plastik filament bazlı 3d yazıcı örneği ve şematik gösterimi

2.4. PolyJet / InkJet 3D Yazıcı

PolyJet mürekkep püskürtme teknolojisi, en son teknoloji fotopolimer malzemelerin çok ince katmanlarda bir yapı tepsisi katmanına, bölüm tamamlanıncaya kadar püskürterek çalışmaktadır. Her fotopolimer tabaka, püskürtülme işleminden hemen sonra UV ışığı ile kürlenmekte ve kürünü tamamlamadan hemen işlenebilen ve kullanılabilen tamamen sertleştirilmiş modeller üretmektedir. Karmaşık geometrileri desteklemek için özel olarak tasarlanmış olan jel benzeri destek malzemesi, el ve su jeti ile kolayca çıkarılmaktadır. Bu teknoloji, prototipleme uygulamaları için gerekli katı parçaları, şeffaf parçaları, kauçuk benzeri esnek parçaları basımında katkı sağlamaktadır [3,4].

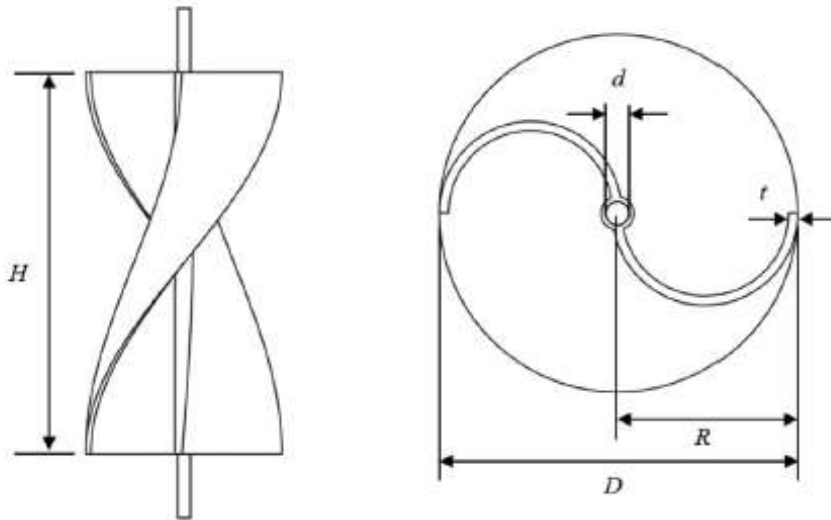


Şekil 6: PolyJet / InkJet 3D yazıcı örneği ve şematik gösterimi

3. SAVONIUS TÜRBİN KANADI

Savonius rüzgâr türbinleri, yüksek başlangıç torku, basit bir tasarım ve herhangi bir rüzgâr yönünde çalışabilme kabiliyeti gibi birçok avantaja sahiptir. Bununla birlikte düşük aerodinamik verimliliğe sahiptirler. Dolayısıyla Savonius rüzgâr türbinleri, ev ve konut elektrik üretimi gibi mikro ve küçük ölçekli rüzgâr türbini uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel (veya düz) Savonius rüzgâr türbinleri, belirli dönme açılarında negatif bir torka ve büyük bir tork varyasyonuna sahiptir. Bu sebeple Savonius rüzgâr türbinlerinin kanatlarının geometrik tasarım parametrelerinin aerodinamik özelliklerini ve etkilerini incelemek için çalışmalar yapılmaktadır [5].

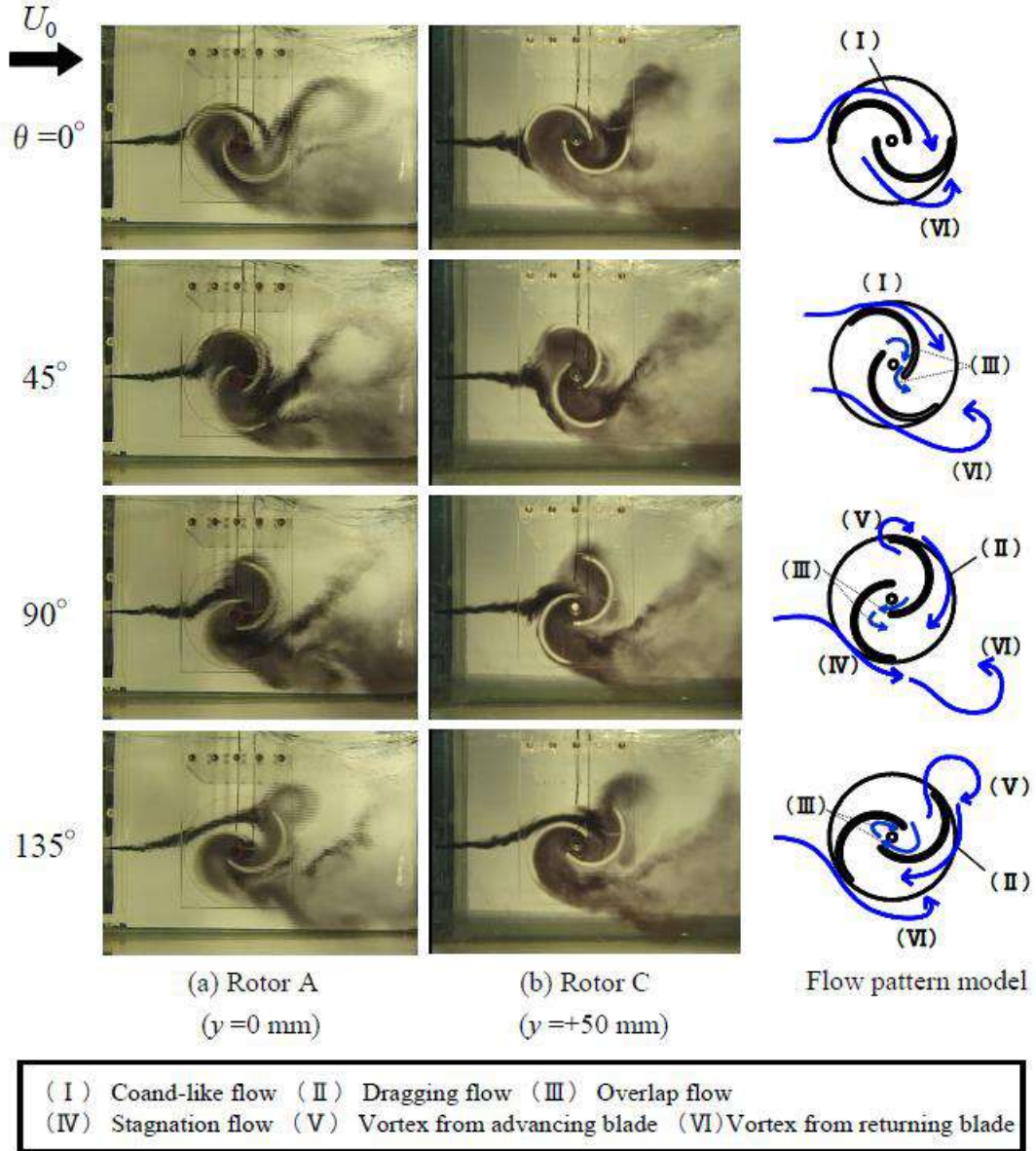
Savonius kanadı kaldırma kuvvetleri, şafta iletilen mekanik güce katkıda bulunmaktadır. Şekil 7, iki yarı dairesel profil kovalı bir Savonius rüzgâr türbininin karakteristik parametrelerini göstermektedir. Şekil 7'de, t kepçe kalınlığı, R kepçe akoru, d kova aralığı, D kanat çapı ve H kanat boyudur. Şekil 7'de, bozulmamış V hızında bir rüzgâra tabi tutulduğu düşünüldüğünde verilen açısal konumlar boyunca kanatlar dönmektedir ve kovalar yörüngelerinde hareket ederken rüzgâra farklı konturlar sergilemektedir. Bundan dolayı kanatlar sü-rükleme ve kaldırma katsayılarını çevrimsel olarak değiştirmektedirler. Böylece, sabit açısal hızda bir kanat tarafından üretilen tork, cihazın dönüşü sırasında çevrimsel olarak değiştirmektedir [2].



Şekil 7: Savonius kanadı için şematik gösterim [2]

Nakajima ve ark. [6], operasyon sırasında kanat kovalarında meydana gelen ana akışlarla bir Savonius kanadının çalışmasını açıklamıştır. Su akımında çalışan bir Savonius kanadı aracılığıyla akış görselleştirilmiştir. Savonius kanadının kovalarında meydana gelen ve bu cihazın çalışma özelliklerini etkileyen ana akış modellerini tespit etmişlerdir. Bu akış Şekil 8'de gösterilmektedir. Debi (l), dönen kova içbükey tarafındaki basıncı

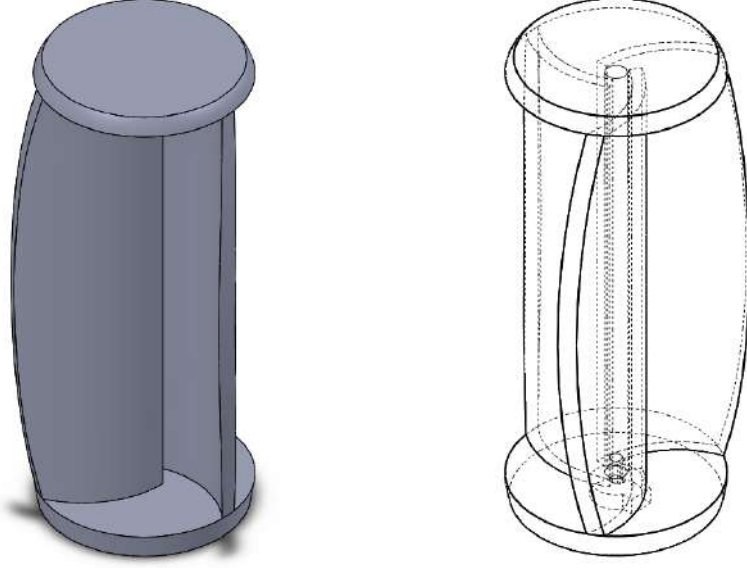
geri yükleyen bir (II) ve (III) kaldırma kuvveti üretmektedir ve (IV) rotorun gücünü etkilemektedir. Eklenen akış (I) 45 ° 'ye kadar olan açıda gözlemlenmiştir. Bu bağlı akış (I), dönen kovanın içbükey tarafına doğru sürükleyici akış (II) haline gelmiştir. Birinci akış, bir asansör üretmektedir ve bu ikinci, kepçenin içbükey tarafındaki basıncı geri yükler ve hem ortalama güç katsayısının artırılmasına katkıda bulunmaktadır. İlerleyen kepçenin ucundan (V) çıkan vorteks, 90 ° 'ye eşit olarak meydana gelir. Ayrıca dönen kovanın (VI) ucundan girdap oluşmuştur. 90 dereceden büyük olduğunda, oluşan girdap (V) ilerleyen kepçenin ucundan ayrılmıştır ve rotorun aşağısına doğru akış olarak büyümüştür. Şekil 8'de (IV) (V) ve (VI) ile tanımlanan akışlar, kanatların gücünü azaltmaya katkıda bulunmaktadır.



Şekil 8: Savonius kanadındaki akış modelleri [6]

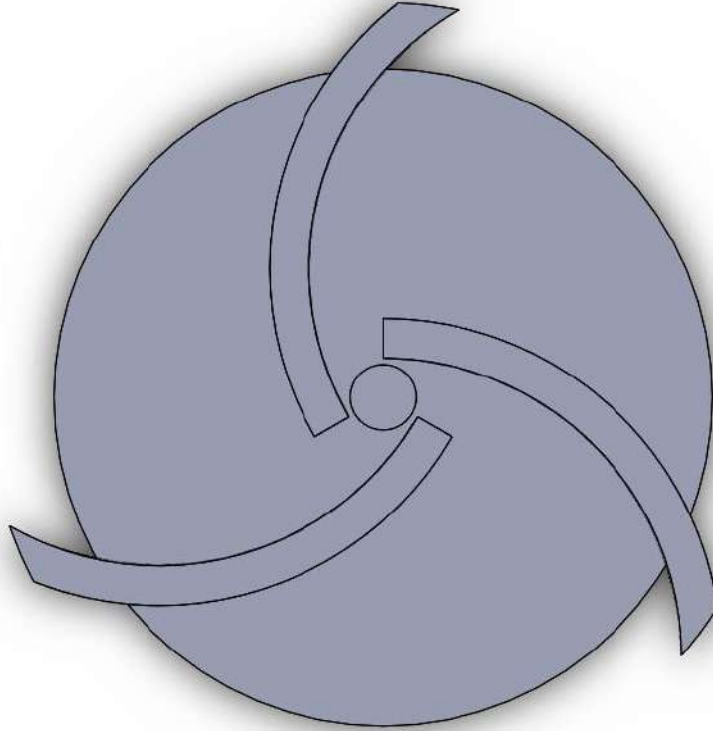
4. TASARIM

Bu tasarımda Savonius kanadının 3 kovandan oluşmasına karar verdik bu sayede rüzgâr esmeye başladığında gerekli ilk hareketi yapması ve kovanların belirli dönme açılarında negatif bir torku azaltmak amaçlanmıştır. En büyük kanat çapı 30cm orta kesimden başlayarak üst ve alt kısımlara inerken çap daralmaktadır ve son çap 25cm olmaktadır. Kanadın tam boyu 50cm olup şekil 9'da tasarımı görülmektedir.



Şekil 9: Tasarlanan Savonius Türbin kanadının izometrik görüntüleri

Şekil 10'da kanadın üst kesiti görülmektedir. Kepçe kalınlığı 1,5cm olup kepçe akorları 16cm'dir. Şekil 8'de görüldüğü ve Nakijima ve ark. Yaptığı deney doğrultusunda (III) akışın geçmesi için kovanların aralığı merkez silindire 120 derecelik açılarla 5mm uzaklığa konumlanacak şekilde yerleştirilmişlerdir.



Şekil 10: Tasarlanan Savonius Türbin kanadının üst kesit görüntüsü

Bu çalışmada kanatların deforme olduğunda ya da hasara gördüklerinde hızlı bir şekilde yerine yenilerinin üretilmesi ve değiştirmesi için tasarlanan Savonius kanadının tek bir parçadan oluşmasına özen gösterilmiştir.

5. SONUÇ

Hızlı prototipleme yöntemlerinden biri olan 3D yazıcıların türleri ve Savonius rüzgâr türbinlerinden bahsedilmiştir. Tasarımı yapılan Savonius kanadının tek parça halinde üretileceği göz önüne alındığında ve yazıcıların kullanabilecekleri malzemelere genel olarak bakıldığında FDM yöntemi ile üretilmesine karar verilmiştir. FDM yönteminin bakıldığı üzere daha hızlı, daha az maliyette ve termoplastikler sayesinde üretilecek olan kanadın daha uzun ömürlü olduğu öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Akwa J.V., Vielmo H.A., Petry A.P., Review On The Performance Of Savonius Wind Turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16: p3054-3064, 2012.
- [2] Joen K.S., Joeng J.I., Pan J.K., Ryu K.W., Effects Of End Plates With Various Shapes And Sizes On Helical Savonius Wind Turbines, Journal of Renewable Energy, 79: p167-176, 2015.
- [3] Lee C.S., Kim S.G., Kim H.J., Ahn S.H., Measurement Of Anisotropic Compressive Strength Of Rapid Prototyping Parts, Journal of Materials Processing Technology, 187–188: p627–630, 2007.
- [4] Berman B., 3-D Printing: The New Industrial Revolution, Journal of Business Horizons, 55: p155-162, 2012.
- [5] Roy S., Saha U.K., Wind Tunnel Experiments Of A Newly Developed Two-Bladed Savonius-Style Wind Turbine, Journal of Applied Energy, 137: p117-125, 2015.
- [6] Nakajima M., Iio S., Ikeda T., Performance Of Double-Step Savonius Rotor For Environmentally Friendly Hydraulic Turbine, Journal of Fluid Science and Technology, 3: p410–419, 2008.

MİKRO BOYUTTA ÜRETİM YAPAN 3D YAZICILARIN İNCELENMESİ

Süleyman Çınar ÇAĞAN, Kaan ASLAN, Berat Barış BULDUM
barisbuldum@mersin.edu.tr

Mersin University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 33343 Ciftlikkoy,
Mersin / TURKEY

ÖZET

Son yıllarda, katmanlı imalat yöntemleri birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. Katmanlı imalat yöntemi, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerinden türetilen parça kesitlerinin üst üste gelerek katmanlar oluşturarak fiziksel model elde etme yöntemidir. Geleneksel imalat yöntemlerinde, bir ürünün imalatının yapılabilmesi için ayrıntılı bir şekilde malzeme özellikleri ve parçanın geometrisinin analiz edilmesi gerekmektedir. Buna karşılık, katmanlı imalat yöntemlerinde parçanın sadece basit boyutsal ayrıntıları ve katmanlı imalatla kullanılacak malzeme hakkında genel bir bilgi yeterli olmaktadır. İmalat sektöründe; hava araçlarında, bilişim teknoloji cihazlarında, ev aletlerinde, medikal cihazlarda ve implant alanlarında mikron boyutundaki ürün, sistem ve bileşenlere olan ihtiyacın artmasından dolayı mikro boyutta üretim yapan 3D yazıcılar geliştirilmektedir. Bu çalışmanın amacı, mikro boyutta üretim yapan 3D yazıcıların ayrıntılı olarak incelenmesidir.

Anahtar kelimeler: 3D yazıcı, Katmanlı imalat, Mikro boyut üretim

INVESTIGATION OF 3D PRINTERS FOR MICRO-SCALE PRODUCING

ABSTRACT

In recent years, additive manufacturing methods have been used in many industries. Additive manufacturing method is a method of obtaining physical model by overlaying part sections derived from computer aided design (CAD) data to create layers. In traditional manufacturing methods, the material properties and the geometry of the part must be analyzed in detail in order to be able to manufacture a product. On the other hand, in additive manufacturing methods, only general dimensional details of the part and general information about the material to be used in the layered manufacturing are sufficient. In the manufacturing sector; 3D printers have been developed that produce in micro size due to the increased need for micron sized products, systems and components in air tools, IT devices, home appliances, medical devices and implant fields. The purpose of this study is to examine in detail the 3D printers that produce micro-size.

Keywords: 3D printer, Additive manufacturing, Micro scale manufacturing

1.GİRİŞ

3D baskı olarak da bilinen katmanlı imalat, nesnelerin alt katmanlı imalat yöntemleri yerine katman üzerine katman olarak 3D model verilerinden elde edilmesi için malzemelerin birleştirilmesi işlemidir [1,2]. 3D yazıcılar vasıtasıyla bilgisayarda çizimi yapılmış her türlü ürünün birebir modelini kısa süre içerisinde elde etme imkanı doğmuştur. Katmanlı üretim yöntemlerinde fiziksel modeller tabandan başlayarak katman katman yüzeylerin üst üste eklenmesiyle oluşturulmaktadır. Prototip üretiminin amacı imalat öncesi, tasarımın doğruluğunun, estetikliğinin ve işlevsel yönden yeterliliğinin değerlendirilmesi, tasarlanan modelin üretilebilirliği, montaj edilebilme ve sökülebilme olanaklarının değerlendirilebilmesidir[3].

Minyatürize / mikro ürünler / sistemler ve bileşenler konusunda gelişen teknoloji ışığında talepler artmaktadır. MEMS (mikro-elektrik-mekanik sistemler) ve mikro-sistemler, mikro-reaktörler, yakıt hücreleri, mikro-mekanik cihazlar, mikro-tıbbi bileşenler vb. gibi sistemlerde kullanılmasının yanı sıra, hava araçlarında, IT cihazlarında, ev aletlerinde, tıbbi cihazlarda ve implantlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

İmalat sektörü başta olmak üzere havacılık, uzay, sağlık, elektrik-elektronik vb. sanayiinde mikro boyutta ürünlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaca karşılık vermek için de mikron boyutunda üretim yapan 3D yazıcılar üretilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada katmanlı imalat yöntemleri, mikro boyutta imalat hakkında bilgi verilip, mikron boyutunda üretim yapan 3D yazıcılara örnekler verilerek özellikleri araştırılmıştır.

2.KATMANLI İMALAT YÖNTEMLERİ

Katmanlı imalata yönelik birçok uygulama bulunmakla birlikte, bu uygulamalar, yöntemine ve malzemelerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu temel yöntemler şunlardır:

Lazer Eritmeli Sistemler (Laser Melting/ Laser Sintering)
 Erimiş Malzeme Şekillendirme (Fused Deposition Modelling – FDM)
 Stereolithografi
 Malzeme Jeti (Material Jetting)
 Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat (Binder Jetting)

2.1.Toz Yataklı Lazer Eritmeli Sistemler (Powder Bed Laser Melting/Sintering)

Bu sistemlerde; toz içerisindeki tasarımın bir kesiti lazer ile eritilir ve üzerine yeni bir katman eritilmiş olan toz ilave edilerek gerçekleştirilir. Katmanların kalınlığı 20-100µm kadardır. Yeni teknolojik uygulamalar birden çok ve farklı güçlerde lazerleri soy gaz ortamında kullanmaktadır. Lazer eritme yöntemi de denilen bu yöntemde, “Selective Laser Melting (SLM)”, “Laser Curing” ve “Direct Metal Laser Sintering (DMLS)” gibi birçok farklı isimde ticari çözüm bulunmaktadır. Bununla birlikte, tümüyle vakum içinde uygulanan “Electron Beam Melting (EBM)” sistemi de kullanılan uygulamalardan biridir. Bu alanda bilinen tezgâhları, Avrupa’da Concept Laser, EOS, ReaLizer, Renishaw ve SLM Solutions, ABD’de ise 3D-Systems sunmaktadır. İsveçli Arcam AB firması da, Japon Matsuura ile ortak geliştirdiği elektron ışını kullanan bir çözüm sunmaktadır [5]. General Electric, Şekil 1’de gösterilen 20 küçük parçadan oluşan yakıt püskürtücü düzeneğini; toz yataklı lazer eritme yöntemi kullanarak tek yakıt püskürtücü parçası olarak kobalt krom malzemeden imal etmişler [6].



Şekil 1. GE'nin katmanlı üretim yöntemiyle imal ettiği yakıt püskürtücüsü [6]

2.2.Toz Beslemeli Lazer Eritmeli Sistemler (Powder Fed Laser Melting)

Bu sistemde, toz halindeki ham metalin istenilen noktalara lazer veya elektron ışını gibi enerji kaynakları ile ısıtılıp eritilerek püskürtme yapılır. Lazer Kaplama (laser cladding), Yönlendirilmiş Enerji Birikimi (Directed Energy Deposition), Lazer Metal Biriktirme (Laser Metal Deposition) gibi isimlendirmeler de kullanılır. Bu yöntem, kullanılan tezgâhın kabiliyetine göre 100 µm kadar ince yapıların oluşturulmasına yönelik oldukça hassas kontrol edilen bir yöntemdir. Toz Yataklı Lazer Eritmeli Sistemlerin aksine, bu yöntemde metal biriktirilen yüzey/yapı çok fazla ısıtılmaz. Bu tekniğin bir geliştirilmiş uygulamasında, Optomec firmasının “Laser Engineered Net Shaping” tekniği ile var olan bir yapıya zarar vermeden kaplaması ile tamiratlar yapılabilir. Bu teknik, oksitlenmeyi engellemek amacıyla soygaz ortamını sağlayan tezgâhlarda ve bir- çok farklı metal alaşım kullanılmaktadır [5].

2.3.Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat (Binder Jetting)

Genelde kalıp imalatı için kullanılan bu yöntemde, toz malzeme üzerine, mürekkepli yazıcılar benzeri hareketli bir kafa ile yapıştırıcı uygulanır ve üzerine yeni malzeme katmanı serilerek sertleştirilir. Yapıştırıcı ana tutucu olduğundan genel olarak daha kırılğan çözümler gerçekleştirilir. Bu uygulama metoduna yönelik en çok bilinen çözümü; döküm uygulamaları için kullanılabilecek kum kalıp benzeri erkek/dişi kalıplar için tezgâhlar üreten ExOne firması gerçekleştirmiştir [5].

2.4.Elektron Kaynağı

Nispeten lazer eritme sistemlerine benzeyen bu yöntemde, ısı kaynağı olarak elektron tabancası kullanılmaktadır. Isıtılan odak merkezine eritilecek malzeme kablo şeklinde beslenmekte ve eriyip bir katman oluşturmaktadır. Mevcut uygulamalar, çok hassas olmayan, geniş ve daha büyük miktarda imalatlar içindir. Katman katman oluşturulan kaba şekil daha sonra geleneksel imalat yöntemleri ile işlenmektedir [5].

2.5.Erimiş Malzeme Şekillendirme (Fused Deposition Modelling – FDM)

Füzyon Depozisyon Modeli (FDM), günümüzde ve yakın gelecekte potansiyel uygulama alanlarıyla en önde gelen AM tekniklerinden biridir. Diğer AM teknikleriyle karşılaştırıldığında, baskı cihazlarının düşük maliyeti ve stok malzemelerinin daha fazla bulunması FDM tekniğini eşsiz kılar [7]. “3-boyutlu yazıcı” olarak adlandırılan imalat yöntemidir. FDM işleminde, yapı malzemesi olarak plastik ve polimer malzemelerin kullanıldığı bu yöntemde, malzemeler filamentler halinde eritilip uygulama yapan hareketli bir kafaya iletilir ve katmanlar halinde üst üste yapıştırılarak şekil oluşturulur ve ortam sıcaklığında sertleştirilir. Bu yöntem genellikle hızlı prototipleme ve az sayıda seri imalat durumlarında tercih edilmektedir [7].

2.6.Stereolithografi

Bu yöntemde ışık ile kür edilebilen polimer mayi yüzeyinde lazer ile katman katman şekil oluşturulur. Bu yöntem vasıtasıyla oldukça hassas şekil verilerek düzgün yüzeyler oluşturulabilir; ancak, fotopolimer malzemeler çok kararlı değildir ve mekanik özellikleri değişkendir. Hızlı prototipleme ve bazı kalıp uygulamalarında tercih edilebilir. Ayrıca Mikrostereolithography (micro-SLA), mikroeletromekanik sistem (MEMS) bileşenleri üretimi için temiz oda ortamında yaygın olarak kullanılan tekniklerden temelde farklı olan bir 3D mikrofabrikasyon teknolojisidir [8].

3.MİKRO BOYUTTA İMALAT

Minyatürize / mikro ürünler / sistemler ve bileşenler konusunda gelişen teknoloji ışığında talepler artmaktadır. MEMS (mikro-elektrik-mekanik sistemler) ve mikro-sistemler, mikro-reaktörler, yakıt hücreleri, mikro-mekanik cihazlar, mikro-tıbbi bileşenler vb. gibi sistemlerde kullanılması yanı sıra, hava araçlarında, IT cihazlarında, ev aletlerinde, tıbbi cihazlarda ve implantlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ürünlerin imalatı son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Aynı zamanda, nanoteknoloji gittikçe daha olgun ve nüfuzlu hale geldiği için, sensörler için nano-cihazlar, iletişim ve tıbbi tedavi, nano-materyaller ve gelişmiş performanslar için kaplama / işlevsel yüzeyler gibi daha çok nanoteknoloji temelli ürünlere olan ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Bu ürünleri büyük çapta üretim ölçeğinde üretmek için makro ve nano-dünyasındaki imalatı etkin bir şekilde birbirine bağlamak esas olmaktadır. Mikro-imalat da makro imalat ve nano imalat arasındaki köprüyü oluşturmaktadır [4].

Mikro-imalat mühendisliği, tasarım, analiz, materyal, süreçler, araçlar, makineler, operasyonel yönetim usulleri ve sistemleri, vb. dahil olmak üzere mikro ürün / özelliklerin üretim zinciri içerisinde bir dizi ilgili faaliyete ilişkin genel bir terimdir. Mikro üründe büyük çeşitlilik var; bunların başlıca türleri, mikro elektronik ürünler, mikro optik elektronik sistemler (MOES), mikro elektronik mekanik sistemler (MEMS) ve mikro optik elektronik mekanik sistemler (MOEMS) olmak üzere ürün işlevleri ve / veya çalışma prensiplerinin kombinasyonlarıdır. Buna göre, bu ürünleri imal etmek için kullanılabilecek farklı yöntemler ve stratejiler bulunmaktadır. Mikro imalat, daha geniş bir bağlamda, bu ürünlerin / özelliklerin imalatıyla ilgili tüm bu yönleri kapsamalıdır. Mikro-imalat tanımı veya yerçekimi / odak noktası, genellikle farklı kaynaklardan farklılık gösterir. Mikro imalat teknikleri genellikle silikonsuz ve hatta MEMs tabanlı olmayan imalatları ifade eder. Bu nedenle, mikro imalata ilişkin yeni bir tanım, 'ölçekli konvansiyonel teknolojileri / prosesleri olan mikro ürünler / özellikler üretmek' olabilir. Bunlar, mikro-işleme (mekanik, termal, elektrik-kimyasal, elektrik boşaltma yöntemleri), mikro-şekillendirme / replikasyon, mikro-katkı maddesi (hızlı yöntemler, elektro-şekillendirme, enjeksiyon kalıplama, vb.) ve birleştirme gibi süreçleri içerir. Mikro-imalatın bir başka odak noktası, konvansiyonel, büyük ölçekli makineler / sistemler yerine minyatür makineler / sistemler ile ürünler / bileşenler imal etmektir [4]. Tablo 1'de ürünlerin / parçaların mikro-imalat teknikleriyle, özellikle de mekanik ve / veya termal mikro imalat prosesleriyle üretilebilir bazı örneklerini göstermektedir.

Hızlı prototipleme, üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım (CAD) verileri kullanarak fiziksel bir parçanın veya montajın ölçek modelini hızla üretmek için kullanılan bir grup tekniktir. Parçanın veya montajın yapımı genellikle 3D baskı veya "katmanlı katman imalatı" teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilir [9].

Tablo 1. Bazı parça ve bileşenlerin mikro imalat teknikleri [4]

Bileşenler/Parçalar	Numune geometri/şekiller	Kullanılabilir Teknikler	Tipik Parça Malzemeleri	İşleme Hassasiyeti	Tipik Ürünler / Uygulamalar
Mikro-pimler	Çaplar 0.2-1 mm aralıkta, duvar kalınlığı 50-200 mikron olası ve toleranslar <5 mikron	İleriye doğru ve geriye doğru ekstrüzyon, Mikro şekil haddeme, Mikro-işleme	Çeşitli metal türleri	Birkaç mikron-dan alt mikrona	Yonga taşıyıcı, mikro cihaz montajı, elektrik kontaktları vb. gibi çeşitli uygulamalar
Elektro-termal mekanik aktüatör	3D yapısal parçalar, çeşitli kesit geometrileri	Kimyasal aşındırma ve mikro damgalama, lazerle kesme, Mikro dövme, Mikro ekstrüzyon,	Biçim bellekli alaşımlar ve diğer metal malzemeler	Birkaç mikron	Mikro aktüatör cihazları
Mikro-dişliler	Çapları 1 mm veya daha az,	Mikro damgalama, Mikro döküm, Mikro-EDM, vb	Metaller, polimerler	Birkaç mikron-dan alt mikrona	Micro mekanik cihazlar ve saatler
Mikro mekanik sürücüler için miller	Çapları 1 mm veya daha az,	Mikro ekstrüzyon, Mikro işleme, Mikro-EDM	Çelikler ve alaşımları	Birkaç mikron-dan alt mikrona	Mikro tahrik aygıtı (örneğin; mikro mil)
Mikro dişli mili	30-50 mikron lokal özellikler	Bölgesel ısıtma ile haddelenmiş,	Metaller	Birkaç mikron-dan alt	Micro mekanik cihazlar ve saatler

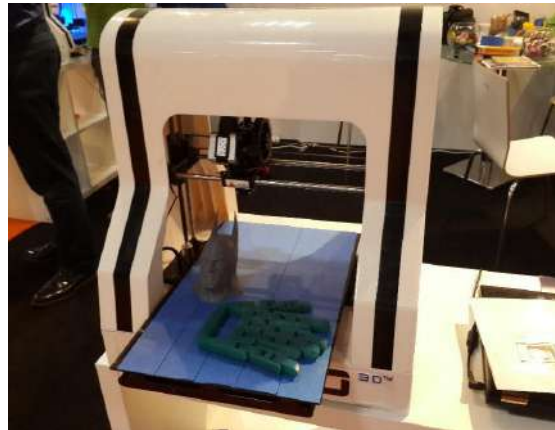
		Mikro-radyal ekstrüzyon,		mikrona	
		Mikro işleme, EDM.			
		Mikro dövme,			
Mikro vidalar	0,1-0,5 mm aralıklarındaki çaplar	Ekstrüzyon, Şekil haddeleme,	Çeşitli metal türleri	Birkaç mikron-dan alt mikrona	Mikro cihazlar, gövde ve montaj,
		Mikro-işleme.			
		Mikro-EDM,			
Mikro kalıplar, kalıplar ve zimbalar	1mm iç oyuk, 0,05'ten 1mm kadar zimba çapı	Laser kesim Mikro işleme,	Takım çelikleri, cam, toz, vb.	Birkaç mikron-dan alt mikrona	Şekillendirme işlemleri, enjeksiyon kalıplama vb.
		Sinterleme, vb.			

Katmanlı üretim (AM) olarak da bilinen 3D baskı, nesnenin ardışık katmanlarının bilgisayar kontrolü altında bir nesne oluşturmak üzere oluşturulduğu üç boyutlu bir nesneyi sentezlemek için kullanılan işlemleri ifade eder. Nesneler neredeyse her şekli veya geometriyi oluşturabilir ve bir Katmanlı Üretim Dosyası (AMF) dosyası gibi bir başka elektronik veri kaynağından veya bir 3B modelinden gelen dijital model verileri kullanılarak üretilir [9].

4. MİKRO BOYUTTA ÜRETİM YAPAN YAZICILAR

Mikro boyutta ürünlere başta imalat sanayii olmak üzere havacılık, uzay, sağlık, elektrik-elektronik vb. sanayiinde ihtiyaç duyulmaktadır. Mikro boyuttaki bu ürünleri üretimi için de 3D yazıcıları kullanmak; kolay prototip elde edilebildiğinden, zaman ve ürün geliştirme sürecinde yoğun emek harcanan ürünlerin üretimini kolaylaştırmaktadır.

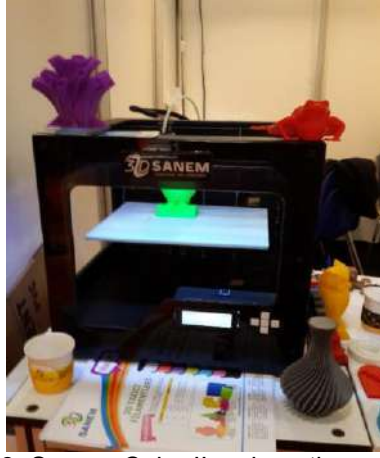
Şekil 2'de 4B mühendisliğin üretmiş olduğu üç boyutlu yazıcı ve özellikleri görülmektedir [10]. Baskı hacmi 254x228x203 mm, hassasiyeti 0,1 mm (100 mikron), nozzle çapı 0,4 mm olan bu 3D yazıcı; ABS&PLA ile baskı alabilme özelliğine sahip olup filament çapı 1,75 mm'dir.



Şekil 2. 4B Mühendislik üç boyutlu yazıcı [10]

Şekil 3'te Sanem Cube II 3 boyutlu yazıcı ve özellikleri görülmektedir. 3D Sanem firması aynı zamanda yerli filament üretici firmalardan biridir [11]. SANEM Cube II eğitim, mimarlık, inşaat, endüstriyel tasarım, otomotiv, havacılık, askeriye, mühendislik, diş ve medikal sanayi, moda, ayakkabı, takı, gözlük vb. kullanım alanlarına sahiptir. PET, PLA, ABS filamentlerin çeşitli renklerde üretimini gerçekleştirmektedir. Baskı hacmi

260x230x200 mm, hassasiyeti 100-300 mikron, nozzle çapı 0,4 mm olan bu 3D yazıcı; PET, ABS ve PLA ile baskı alabilme özelliğine sahip olup filament çapı 1,75 mm'dir.



Şekil 3. Sanem Cube II üç boyutlu yazıcı [11]

Şekil 4'te Kemiq firmasının ürettiği üç boyutlu yazıcı ve özellikleri görülmektedir [10]. Baskı hacmi 245x245x245 mm, hassasiyeti 70-400 mikron, nozzle çapı 0,4 mm olan bu 3D yazıcı; PET, ABS, PC ABS ve Nylon ile baskı alabilme özelliğine sahip olup filament çapı 1,75 mm'dir.



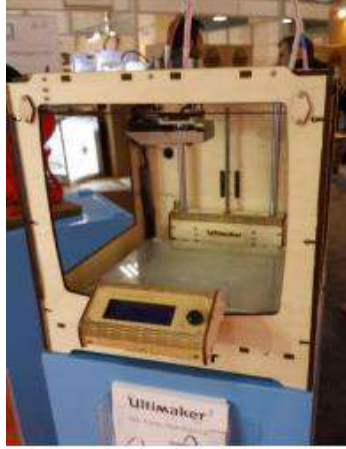
Şekil 4. Kemiq 3 boyutlu yazıcı [10]

Şekil 5'te M3D üç boyutlu yazıcı ve özellikleri görülmektedir [12]. Baskı hacmi 109x113x116 mm, hassasiyeti 50-350 mikron, nozzle çapı 0,4 mm olan bu 3D yazıcı; PLA, ABS ve Nylon ile baskı alabilme özelliğine sahip olup filament çapı 1,75 mm'dir.



Şekil 5. M3D üç boyutlu yazıcı [12]

Şekil 6'da Ultimaker marka üç boyutlu yazıcı ve özellikleri görülmektedir [13]. Baskı hacmi 210x210x205 mm, hassasiyeti 20 mikron, nozzle çapı 0,4 mm olan bu 3D yazıcı; PLA ve ABS ile baskı alabilme özelliğine sahip olup filament çapı 1,75-3,00 mm'dir.



Şekil 6. Ultimaker üç boyutlu yazıcı [13]

Şekil 7'de Ultimaker 2+, Ultimaker 2 Go markalı üç boyutlu yazıcı ve özellikleri görülmektedir [14,15]. Ultimaker 2+'nın baskı hacmi 223x223x205 mm, hassasiyeti 20-600 mikron, nozzle çapı 0,4 mm olan bu 3D yazıcı; PLA ve ABS ile baskı alabilme özelliğine sahip olup filament çapı 3 mm'tir. Ultimaker 2 Go'nun baskı hacmi 120x120x115 mm, hassasiyeti 20-200 mikron, olan bu 3D yazıcı; PLA ile baskı alabilme özelliğine sahiptir.



Şekil 7. Ultimaker 2+ ve Ultimaker 2 Go isimli üç boyutlu yazıcılar [14,15]

Şekil 8'de Formlabs Form1+ ve Form 2 isimli üç boyutlu yazıcılar ve özellikleri görülmektedir. Form1+'ın baskı hacmi 125x125x165 mm, hassasiyeti 25-50-100-200 mikron olan bu 3D yazıcılar; stereolitografi teknolojisini kullanarak üretim yapmaktadır [16,17]. Hammadde olarak Formlabs reçine kullanmakta olup 18-28 °C çalışma sıcaklığına sahiptir. Form2'in baskı hacmi 145x145x175 mm, hassasiyeti 25-50-100 mikron olan bu 3D yazıcı; stereolitografi teknolojisini kullanarak üretim yapmaktadır. Hammadde olarak Formlabs reçine kullanmakta olup 35 °C çalışma sıcaklığına sahiptir.



Şekil 8'de Formlabs Form1+ ve Form 2 isimli üç boyutlu yazıcılar [16,17]

Şekil 9'da Zortrax M200 isimli üç boyutlu yazıcı ve özellikleri görülmektedir [18]. Baskı hacmi 200x200x185 mm, hassasiyeti 90-400 mikron, nozzle çapı 0,4 mm olan bu 3D yazıcı; PLA, ABS, Flex, Hips, Glass transparan malzemeleri ile baskı alabilme özelliğine sahip olup filament çapı 1,75-3,00 mm'tir.



Şekil 8'de Zortrax M200 isimli üç boyutlu yazıcılar [18]

5.SONUÇ

Bu çalışmada, imalat sanayii başta olmak üzere havacılık, uzay, sağlık, elektrik-elektronik vb. sanayiinde mikro boyutta ürünlere ihtiyaç duyulmasından dolayı mikron boyutunda üretim yapan 3D yazıcılar araştırılmış ve özellikleri incelenmiştir. Mikron boyutundaki ürünlere ihtiyaç mikron boyutunda üretim yapan 3D yazıcıların gelişimine önemli bir katkı sunmaktadır. Gelişmiş ülkelerin düşük maliyetli üretimle rekabet edebilmesi için imalat sanayiinde daha fazla yenilik yapılması ve yeni üretim yöntemleri geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı son yıllarda, araştırmacılar mikron boyutta üretim yapan 3D yazıcıların özelliklerinin geliştirilmesi için, Ar-Ge yatırımlarıyla, çalışılmaktadır. 3D yazıcıların üretim hassasiyetleri artıkça mikron boyutunda imalatla gelişecek olup, imalat sektörünün gelişmesine katkı sunacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Guo, N., Leu M.C., "Additive manufacturing: technology, applications and research needs" Frontiers of Mechanical Engineering, 8(3), 215-243, 2013.
- [2] ASTM F2792–10 Standard terminology for additive manufacturing Technologies
- [3] Çelik İ., Karakoç F., Çakır M.C., Duysak A. "Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları" Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, sayı:31, 2013.
- [4] Qin Y., "Micromanufacturing Engineering and Technology", 1st edition, William Andrew, 2010.
- [5] STM Mühendislik&Teknoloji&Danışmanlık, "Katmanlı imalat yöntemleri ve havacılık uygulamaları" https://www.stm.com.tr/documents/file/Pdf/1.katmanli_imalat_teknolojileri_raporu__2016-08-03-14-11-28.pdf
- [6] Bhavar V., Kattire P., Patil V., Khat S., Gujar K., Singh R., "A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing", Materials Science & Technology, 2014.
- [7] Singamneni S., Roychoudhury A., Diegel O., Huang B., "Modeling and evaluation of curved layer fused deposition", Journal of Materials Processing Technology, 212(1), 27-35, 2012.
- [8] Baldacchini T., "Three-Dimensional Microfabrication Using Two-Photon Polymerization", William Andrew, 2016.
- [9] Prinz F.B., Atwood C.L., Aubin R.F., Beaman J.J., Brown R.L., Fussell P.S., Lightman A.J., Sachs E., Weiss L.E., Wozny M.J., "Rapid prototyping in europe and japan", Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers, 1997.
- [10] Çelik D., "Üç boyutlu yazıcı tasarımı, prototipi ve tersine mühendislik uygulamaları", Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.lisans tezi, 2015.
- [11] http://sanem3dfilament.com/3d_yazici.asp
- [12] <https://printm3d.com/themicro/>
- [13] <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-original>
- [14] <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-plus>
- [15] <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-go>
- [16] <https://formlabs.com/3d-printers/form-1-plus/>
- [17] <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>
- [18] <https://www.3bfab.com/urunler/3d-yazicilar/zortrax-m200>

INVESTIGATION OF 3D PRINTER BY USING MKS SBASE V 1.3 IN TERMS OF CONTROL ON THE INTERNET

3B YAZICININ MKS SBASE V 1.3 KULLANILARAK İNTERNET ÜZERİNDEN KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ

Eser ÖZENGİZ¹

eserozengiz@gmail.com

*Seyfettin GÜREL²

sgurel@erciyes.edu.tr

Sezai Alper TEKİN¹

satekin@erciyes.edu.tr

¹Erciyes University, Engineering Faculty, Department of Industrial Design Engineering, Kayseri, Turkey

²Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Turkey

ÖZET

Bu çalışmada, internet üzerinden yazdırılabilen 3B yazıcının yapımı gerçekleştirildi. Bu 3B yazıcı yapılırken seri bağlantı sistemine ilave olarak internet üzerinden bağlantı yapmasını sağlayacak donanımlar kullanılmıştır. Bu bağlantının sağlanması özel bir 3B yazıcı kartı olan MKS SBASE V 1.3 kontrol kartı ile yapılmıştır. Bu kontrol kartı direk olarak modemin LAN girişine ağ kablosu ile bağlantılı olup 3B yazıcının internet üzerinden kontrolünün sağlanmasına olanak sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3B Yazıcı, MKS SABSE V 1.3, Katı Modelleme, Ethernet

ABSTRACT

In this paper, it has been aimed to examine the manufacture and actualize the realization of 3D Printer. In addition to serial connection system for 3D printer, it is added equipment for connecting 3D Printer on Internet. It is used a special 3D printer board which name is MKS SBASE V 1.3. This control board is directly connected to input modem LAN. Therefore, this connection has given a chance to control 3D printer on the Internet. Also, it has been printed some components via the proposed 3D Printer.

Keywords: 3D printer, MKS SABSE V 1.3, Solid Modeling, Ethernet Connection

1. INTRODUCTION

Nowadays, 3D printer technology has become very popular in daily life. This technology has a basic concept which coming from the technology for assembly and paste processes. 3D Printers had started to locate on scientific area towards the 1970s. In that years, they are very big machines and extremely expensive [1]. Today, 3D Printer technology has been using many areas from jewellery to education. For instance, different types of design robots, toys and artistic design can be made by these printers. Some of hard-to-find the replacement part of the classical automobiles is beginning to produce with 3D Printers [2].

It can be seen that a technique which is used in 3D Printers much differ from processing or forming techniques. Instead of conventional sawdust removing technique, a technique which actualized with 3D printer technique, it seems to be towards material addition. In conventional production technique, there is a need for computer aided drawing, supported production materials, various manufacturing machines and raw materials. However, 3D printer does not require other equipment expect from computer aided drawing, printer that has the property of material stack and raw materials. Besides, it is known that raw material requirement and the amount of wastage is very low when it is compared to other conventional classical methods. With using 3D modeling, there is a flexible and efficient production with respect to cost of the system [3]. The 3D Printer is the device which has the ability 3D printing process. 3D printers can produce a design on a computer

without any tool. The working principle of 3D printers resembles home type printers. In paper-printers, the thickness of paper is very slim which can be neglected. However, the printing process becomes lapping multiple layers as a 3 dimensional. An accessory or machine element may be printed and used by these printers. Furthermore, it is ready to use without any machine and process [4].

The main purpose of this work is to examine the manufacture and actualize the creation of 3D Printer. In addition to serial connection system for 3D printer, it is added equipment for connecting 3D Printer on Internet. It is used a special 3D printer board which name is MKS SBASE V 1.3. This control board is directly connected to input modem LAN. Therefore, this connection gives a chance to control 3D printer on the Internet.

2. 3D PRINTER COMPONENTS

There are a lot of components in 3D Printer from electronic instruments to the Maker Base. In this study, the only part that can be given in detail is electronic instruments because chassis materials are very well-known in market and they can be easily learned. Electronic Components of 3D Printer consists of Endstop / Limit Switch, J-Head Hot End and 40 W Heater Cartridge, Step Motor (Nema 17), Mk3 AI 12V heated Table, Micro SD Card, Cooling fan, Power Supply (12 V 15 A) and Maker Base (MKS SBASE V 1.3). As a Limit switch, it is used Ramps V1.4. The duty of Limit Switch is to limit linear movement with a specific area and length. Limit Switches are located on above linear shaft or chase according with coordinates for printing header.

J-Head Hot End is an important system component where 3D Printers can be easily used. This component is a section where filament can be melted and release on heated table. With changing Nozzle, it can be arranged precision ratio [5]. It is suitable for 1.75 mm ABS and PLA filaments.

Power Supply is the device which employ for required energy to the system. It is chosen 12 V - 15 A Power Supply for electronic devices operated at voltage value 12V in 3D Printer. Maker Base is the card which controls 3D printer with the model MKS SBASE V 1.3. Some properties of Maker Base is that it has the high performance capability with using 32 Bit 100 M Cortex-M3 MCU-LPC 1768. It also supported open source coded Smoothieware Software.

3. METHOD

3D Printers can have different properties such as working axis, types of motors, minimum and maximum dimensions of produced pieces, type of extruder, shapes of different structures and chassis shapes. During this working, it is selected proper electronic card selection compatible with chassis construction and control. To construct chassis, the initial step is to print materials in another printer which are in the form of STL format. Then, it has been got chassis with printed materials. The chassis of printer is shown in Figure-1.



Figure-1. The Chassis of 3D Printer

After that, it is loaded “Smoothieware” software and “congif” files into SD card. Initially, due to the fact that it is not update card, PC does not define card. From “Smoothieware driver, it is downloaded “Update Driver Software” in PC and then it is called “smoothieware.inf” and update process has finished.

For making MKS SBASE V 1.3 cable connections, it is primarily connecting with step motor to the socket inputs on MKS SBASE V 1.3. The vital issue is here to connect the motor to the socket what axis we want to work. Then, it is made switch connections. There is a 6 endstop/switch input, but three of them are enough. Next, extruder and cooling fan connections is made on the card where connections displayed in figure 2. The final step is to make the connection of Power Supply.

The Controlling 3D Printer is possible only two ways. If it is wanted to control our printer as a serial, it must be connected to printer USB input to the PC's USB input with connection cable. If we want to control printer in network, it must connected to LAN input with network cable on modem to the network input on the control card. These connections are shown in Figure-2.

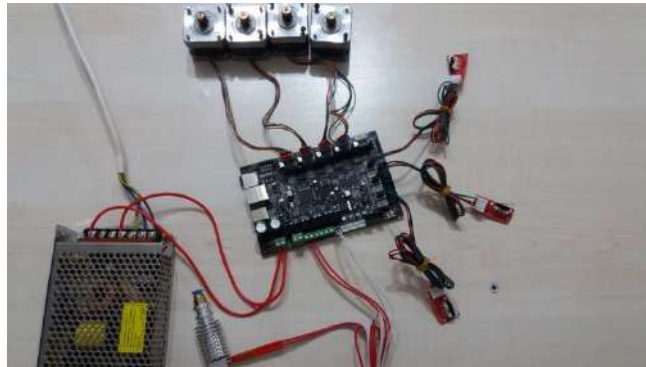


Figure-2. Cable Connections

When all the components are located on 3D printer, it should extend cable connections. Making this change, our designed 3D Printer turns to be Figure-3.



Figure-3. The Internet connected 3D Printer

To validate Ethernet connection of 3D Printer, firstly it should be connected control board to the modem with network cable. Then, it can be reached IP addresses which are connected to our network devices. This process can be realized by the software is called “Advanced IP Scanner” and it is reached control board’s IP address as shown in Figure 4.

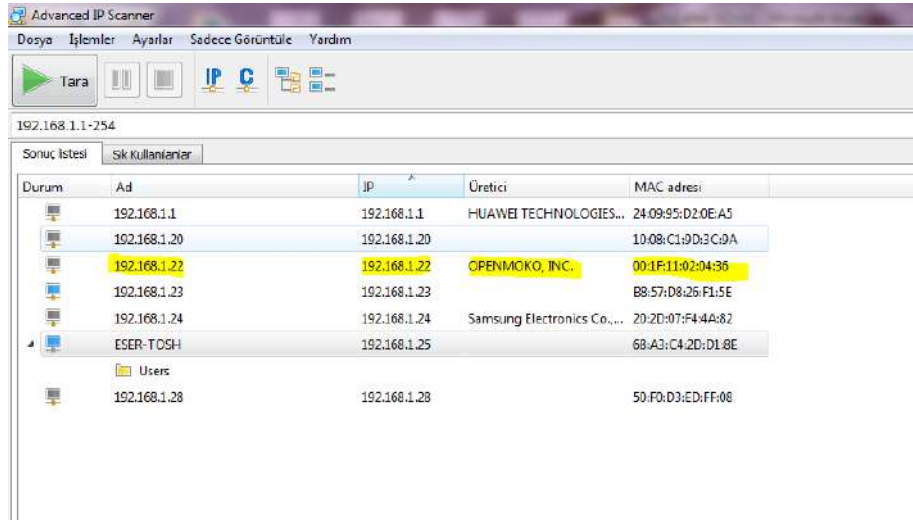


Figure-4. The Internet connection of 3D Printer

After getting IP address, it is required to change some configuration settings from the file named “config”. Hence, there should be some changes network section in configuration file. The first change is to replace “false” with “true” in configuration table’s first row. After this change, the control board will be ready to use. Afterwards, if it is used dynamic IP, then there must be changes in codes which are related to IP. The reason for this replacement is to familiarize 3D printer to the control board.

If it used dynamic IP, the same method which applied to in first case is applied. The only difference is to change in addressing code “auto” section as a “true”. This operation is valid for defining IP address not as a dynamic but as a static.



Figure-5 Smoothie web interface

Next step is to connect 3D printer to web interface. In order to connect interface, it is written Internet browser's address tool IP address. After some seconds, it will be connected web interface. Owing to the fact that it is used as software "Smoothieboard", interface for our design is again going to be Smoothie web interface shown in Figure 5.

After solving all problems and making calibration process, it is downloaded some components in STL format. Using with Slicer programme, these components convert into GCODE format. Later on, it is uploaded in 3D printer and it is printed some components in 3D Printer as shown in Figure 6.



Figure-6. Sample parts printed in 3D printer

4. CONCLUSION:

In this study, it can be designed all the components of 3D Printers. With the help of this, both software and hardware parts of 3D Printers can be replaced and easy to solve any error during operation. The most vital advantage of this 3D printer is to have capability of controlling an interface via on Internet. Consequently, this design gives user chance to deal with multi-tasking at the same time .This design is also cost effective compared to other 3D Printer in market. Moreover, MKS SBASE V 1.3 is used as control card in our design. This control card is also printer card and it may be used different chassis constructions in 3D Printers.

5. REFERENCES:

- [1] Kruth, J. P., Leu, M. C. and Nakagawa, T.,1998. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. **Annals of the Cirp**, **47** (2): 525-540.
- [2] Karaarslan, M. H. 2015. 3 Boyutlu yazdırma teknolojisi: sosyoekonomik etkileri için yeni ufuklar. **Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi**, **10** (1): 10-15.
- [3] Miller, J. S., 2012. Rapid casting of patterned vascular networks for perfusable engineered three-dimensional tissues. **Nature Materials**, **11**(2):768-774.
- [4] Zopf, D. A., 2013. Bioresorbable airway splint created with a three-dimensional printer. **NEJM**, **368** (101):2043-2045.
- [5] Patrick, H. D., 2014. 3D printer extruder. (Web page: <https://www.buildyourcnc.com/item/3D-Printer-Component-extruder>) (Date accessed: November 2016).

3D YAZICILAR İÇİN ÇOKLU FİLAMENT TUTUCU TASARIMI

Doç.Dr. Mustafa BOZDEMİR

Kırıkkale Üniversitesi, KMYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yahşihan/KIRIKKALE
mustafabozdemir@kku.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, üzerinde birden çok sayıda farklı özellikteki filament rulolarını taşıma kapasitesi bulunan bir filament malzeme tutucu sistemin tasarımı sunulmuştur. Bu modelinin uygulama parçaları FDM 3D yazıcı kullanılarak imal edilmiştir. Modüler yapıya sahip paçalar, bir prototip çalışması olarak montaj edilmiştir. Farklı yazıcı modellerine uyum sağlayabilmesi amacıyla yükseklik ayarı vardır. Aktif kullanılmayan filament telinin diğer rulolara dolaşmasını engelleyen tel kilit sistemi yerleştirilmiştir. Kolay filament değişim sistemi ve 3D yazıcı baskı başlığına düzgün tel akış sağlayan hizalayıcı mekanizması bulunmaktadır. 3D yazıcılar için filament rulolarının yönetimini kolaylaştıran çok amaçlı komple taşıyıcı sistemdir.

Anahtar Kelimeler: 3D Yazıcı, Eriyik Yığıma Modelleme (FDM), Filament malzeme tutucu

MULTI-FILAMENT HOLDER DESIGN FOR 3D PRINTERS

In this work, we have presented a design of a filament material holder system with the capacity to carry multiple numbers of different filament rollers. The application parts of this model are manufactured using FDM 3D printer. The modules with modular structure are assembled as a prototype work. There are height adjustments to accommodate different printer models. A wire lock system is installed to prevent the active filament strand from circulating through the other rolls. There is an easy filament exchange system and an aligner mechanism that ensures smooth wire flow to the 3D printer print head. It is a multipurpose complex conveyor system that facilitates the management of filament rollers for 3D printers.

Keywords: 3D Printing, Fused Deposition Modelling (FDM), Filament Material Holder

1. Giriş

Hızlı prototipleme, bilgisayarda hazırlanan üç boyutlu CAD çizimlerinden direk olarak elle tutulur fiziksel modeller elde etmemizi sağlayan imalat teknolojisidir. Hızlı prototipleme cihazları vasıtasıyla bilgisayarda çizimi yapılmış her türlü ürünün birebir modelini saatler içerisinde elde etme imkânı doğmuştur. Hızlı prototipleme cihazları kendi içerisinde farklılıklar göstermekle beraber prensipleri aynıdır. Bu yöntemde fiziksel modeller tabandan başlayarak katman katman yüzeylerin üst üste eklenmesiyle oluşturulur. Hızlı prototipleme teknolojileri ürün geliştirme süreçlerinde yaşanan problemlere çözümler getirmektedir. Bilgisayarda çizilen tasarımların seri üretime geçmeden önce prototiplerinin hazırlanması ve bu prototiplerin çeşitli testlerden geçmesi gerekmektedir. Bu süreç geleneksel yöntemlerle yapıldığında günler hatta haftalarca sürebilir. Hızlı prototipleme ile bu süreç saatler içerisinde gerçekleştirilir ve elde edilen prototipler hem görsel hem de fonksiyonel açıdan test edilebilirler. Olası tasarım değişikliklerine bu prototipler üzerinden karar verilerek gerekli değişiklikler süratle uygulanır [1].

3 boyutlu üretim, masaüstü imalat yada ingilizce “additive manufacturing” katkısız üretim olarak da bilinen bir üretim yöntemidir. Hızlı prototipleme olarak bilinen bu teknolojiye 3 boyutlu bilgisayar tasarımı gerçek bir objeye dönüştürülür. 3 boyutlu sayısal model STL formatına dönüştürülür ve 3D yazıcıya gönderilir.

Üç boyutlu baskı teknolojisi 1980 li yıllarda başlamıştır. Buna rağmen 2010 yılından sonra adı daha fazla duyulmaya başlanmış ve günümüzde çok daha yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir. Bunun nedenleri olarak medyada daha fazla yer almaya başlaması, birçok sayıdaki girişimci firmaların bu teknolojiye yatırım yapması, akademik çevrelerin ilgi göstermesi, teknolojinin birçok alanda getirdiği kolaylıklar ve avantajların yanı sıra üretim maliyetlerinin düşmesi gösterilebilir. 2012 yılı itibari ile üç boyutlu yazıcıların market hacmi 2.2 milyar dolara erişmiş ve 2011 yılına göre %29 lük bir artış göstermiştir. Üç boyutlu yazıcılar büyük oranda kendi parçalarını basabilir.

3D yazıcılar hızlı protip üretim amaçlı kullanılan yazıcılardır. Farklı 3D yazıcı teknolojileri bulunmakla birlikte, en yaygın kullanım FDM teknolojisi olarak gösterilebilir. Bu teknolojiye, plastik tel malzeme olan filament, bir

bobin üzerine sarılarak yazıcıya yüklenir. Bobin üzerinden alınan tel malzeme ekstrüzyon başlığına çekilerek eritme noktasına kadar ısıtılır. Eriyen plastik püskürtme nozülünden, yatay ve düşey hareketi sayısal olarak kontrol edilerek, istenilen profili elde edecek şekilde tabla üzerine akıtılır [2].

Günümüz 3 boyutlu yazıcı teknolojisi birçok farklı teknolojiyi kapsamaktadır. Bu teknolojiler, lazer sinterleme, fused deposition (bileşimli yığma), polimer kürlleme gibi sıralanabilir. Yaygın kullanıma ve farklı tasarıma sahip olsa da temelde en çok kullanılan teknoloji "fused deposition modeling" tekniği ile çalışan cihazlardır. Bu teknikte bilgisayarda üç boyutlu modeli bulunan cisim 2 boyutlu katmanlar halinde yığılarak üç boyutlu ürün elde edilir. Bu prosesi gerçekleştirmek ise günümüz makine imalat sektöründe üç eksenli bir CNC nin kontrolünden ibarettir. Kontrol kartı ve CNC ile iletişimde olacak bir yazılım ve malzeme yığma özelliğine sahip bir takımdır. FDM bir yazılım prosesi ile baslar, yazılım STL formatındaki modelleri matematiksel olarak katmanlara ayırır ve bu katmanları üst üste inşa etmek üzere 3 eksenli CNC kontrollü bir cihaza gönderir. Genellikle termoplastik malzemeler kullanılır. Termoplastik malzemeler termoset malzemeler ile karşılaştırıldığında defalarca eritilebildikleri ve belirli sıcaklık aralığında sıvılaşabildikleri için bu teknoloji için oldukça uygun malzemelerdir. Termoplastik malzemenin düzgün bir şekilde yığılabilmesi için erime sıcaklığına ısıtılmış bir nozuldan ekstrude edilmesi gerekmektedir. Bu nozul bilgisayar tarafından kontrol edilerek parça geometrisini simüle edecek şekilde hareket ettirilir ve termoplastik malzemenin yığılması ile beraber parça 2 boyutlu katmanlar halinde tablaya yığılır ve üretilmiş olur. Bu işlem günümüzde en çok hızlı prototipleme ve 3 boyutlu yazıcı alanlarında kullanılmaktadır. 3d printing, 3 boyutlu üretim, 3d yazıcı olarak da bilinir [3].

Hızlı prototipleme teknolojilerinde uygulamada en yaygın kullanılan teknolojinin SLA olduğu görülmektedir. Bu yöntem yüksek doğrulukta, renkli parçalar üretebilmektedir. Ancak parçalarda çarpılma ve büzülme olabilmektedir. Mukavemetli parçalar yapılacağına SLS, FDM, EBM ve SDM teknolojileri tercih edilebilir. Özellikle SLS, EBM ve SDM teknolojileri metal model üretimini mümkün kılmaktadır. Büyük boyutlu modeller üretileceğinde LOM tercih edilir. Ancak modellerin mekanik özellikleri iyi değildir. MJM ve 3DP yöntemleri basit ve kolay kullanılabilen sistemler olup üretim hızları yüksektir. MJM sistemlerinde üretilen modellerin yüzeyleri daha düzgündür. 3DP sistemleri ile renklendirme yapılabilir. FDM, 3DP ve Polyjet sistemleri ofis ortamında rahatlıkla kullanılabilir. Hızlı prototipleme teknolojisi, imalat uygulamalarında, medikal / dental implant yapımında, kavramsal modellemede, doğrudan döküm kalıbı ve parça üretiminde, hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretiminde, mimari uygulamalarda, uzay/otomotiv sanayinde, hızlı kalıp imalatında, eğitim amaçlı her türlü donanımın yapımında vetakı sektörü gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Bir hızlı prototip üretiminde ilk adım, herhangi bir CAD yazılımı ile veya bir lazer ya da optik bir tarayıcı yardımı ile tersine mühendislik yaparak parçanın 3D CAD modelinin oluşturulmasıdır. CAD yazılımları ile hızlı prototipleme makineleri arasında veri transferini sağlamak için bir veri ara yüzüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veri ara yüzü STL (Stereo Lithography) formatıdır [4].

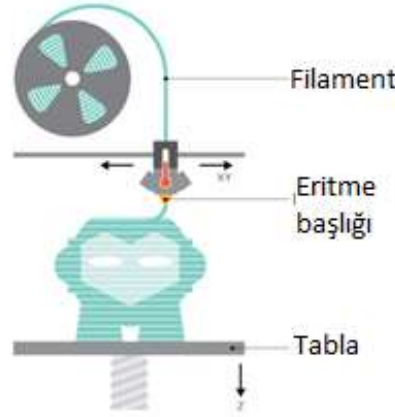
3D yazıcı katman katman inşa ederek gerçek objeyi oluşturur. 3D Yazıcılar bilgisayarda tasarlanmış ya da 3 boyutlu olarak taranmış modelleri, birçok farklı malzeme kullanarak çok hızlı ve ekstra bir kalıba ihtiyaç duymadan üreten cihazlardır.

2. FDM Yazıcı Teknolojileri

FDM teknolojisi ile çalışan 3D Yazıcılar genellikle ABS ve PLA gibi termoplastik polimer malzemeler kullanılmaktadır. Filament formundaki malzeme yüksek sıcaklığa sahip bir nozul yardımı ile eritilerek katmanlar halinde inşa edilir. Özellikle baskı malzemesi olarak plastik kullanılan 3D yazıcı modelleri çok popülerdir. Eriyik Yığma Modelleme (FDM) yapan yazıcılarda ısı ile şekillendirilebilen termoplastik polimer malzemeler (PLA, ABS) kullanılmaktadır.

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler. Akrilonitril bütadien stiren veya kısaltılmış ismi ile ABS, (kimyasal formülü $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_x$) kalıp yolu ile üretilen ürünlerde çok yaygın olarak kullanılan hafif ve sert bir polimerdir. Borular, otomotiv parçaları, koruyucu kasklar ve oyuncaklar kullanım alanlarında birkaçıdır [5].

Bu plastik malzemeler özel rulolara sarılarak, belirli çap ve renk özelliklerinde yazıcılarda kullanılmaktadır. Bu rulolar bazen 3D yazıcının kendi üzerinde bulunan özel filament bölmelerine yerleştirilirken, bazı modellerde rulolar cihazın dışarısında kontrol edilmektedir. Şekil 1 'de 3D yazıcı sistemi ve çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 1. FDM yazıcının çalışma prensibi

En yaygın kullanıma sahip olan üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu bir nesnenin sanal olarak katmanlara bölünmesine ve her bir katmanın eritilen ham madde dökülerek üst üste gelecek şekilde basılmasına dayanır.

3. FDM İçin Filament Malzemeler

FDM tip 3D yazıcılar için genellikle 1.75 mm ve 3 mm olmak üzere iki farklı çapta filament malzemeler kullanılmaktadır. Genellikle FDM 3D yazıcı extruderi bu ikisinden birini kullanacak şekilde tasarlanmaktadır. 3 mm'lik filament için en büyük çap 3 mm ve ortalama filament çapının 2.88 mm olması en idealidir. En düşük tel çapının 2.86 mm olması istenmektedir. 1.75 mm filamentlerde, bu değer filamentin ortalama çapıdır. Yani filament için en büyük çap 1.80 mm, en küçük çapın ise 1.70 mm arasında olması gereklidir. Farklı değerlerde üretilen filamentler, extruder de tıkanma yapabilir. Filamentler piyasadan 2 şekilde tedarik edilmektedir. Makaraya sarılmış yada makaraya sarılmadan yumak halinde satılabilir. Makaraya sarılmış olanları 3D yazıcının yanına ya da üstüne asılabilir. Ancak kullanımı zordur yazıcının yanına ya da üzerine asmanız mümkün olmayabilir. FDM 3 boyutlu yazıcılarda kullanılabilecek birçok filament malzemesi olmasına rağmen, en yaygın kullanılanlar ABS ve PLA filamentlerdir. Bu iki malzemenin de kendine özgü özellikleri vardır. Malzemelerin seçilmesinde kişisel tercihler ve nerede kullanılacağı önemlidir. Bazı 3D yazıcılar ABS ile baskı alınmasını desteklememektedir[6].



Şekil 2. Filament makarası ve farklı renk filamentleri

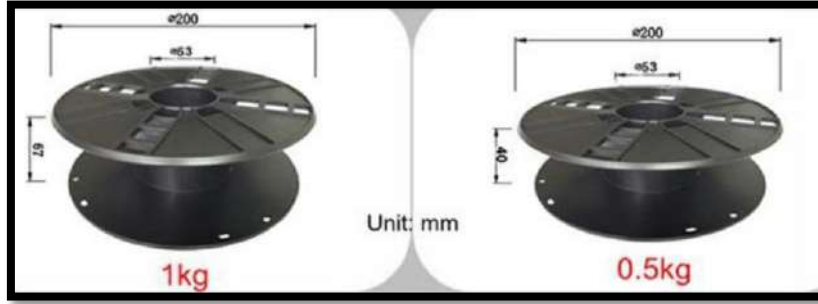
Şekil 2'de PLA ve ABS malzemeden imal edilmiş filament malzemeler görülmektedir. PLA filamentler, mısır nişastası ve şeker kamışı gibi bitkisel ürünlerden elde edilen plastiklerden yapılır. Bu nedenle yeşil plastik olarak adlandırılır. Diğer plastik türlerine göre doğada daha çabuk yok olur ve çevreye zarar vermez. Genellikle gıda ürünlerinin ambalajlarında kullanılır. ABS filamentler, petrol kökenli hammaddeler kullanılarak elde edilir. PLA'ya göre daha dayanıklıdır daha zor kırılır. Bu nedenle, kasklar, lego parçaları, araba tamponları gibi dayanıklılık gereken alanlarda yaygın olarak kullanılır.

Tablo 1. ABS ve PLA malzemelerin karşılaştırılması [6]

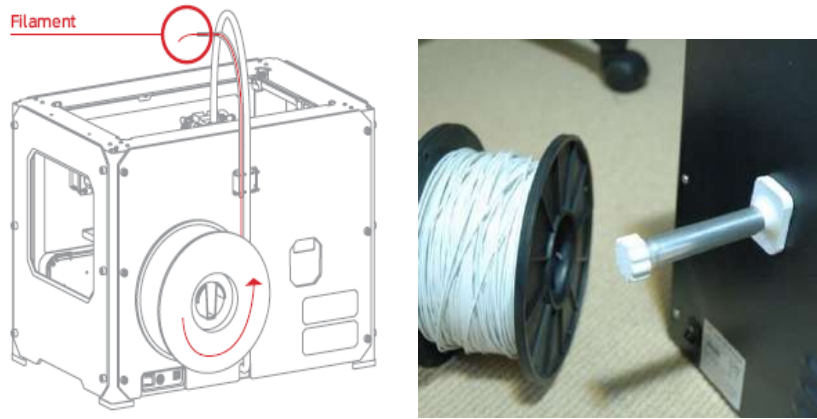
ABS	PLA
Ekstruder sıcaklığı ~ 225 °c	Ekstruder sıcaklığı ~ 180 - 200 °c
Sıcak yüzey gerekli	Sıcak yüzey kullanılması iyi olur gerekli değil
Optimum soğutma sistemi iyi sonuçlar verir	Yüksek soğutma sayesinde en iyi sonucu verir
Filament toleransı çok küçüktür	İnce detaylar iyi kalibre edilmiş 3d yazıcılarda elde edilir
Çatlama, Katman Ayrılma ve Çekilme eğilimlidir.	Kenarlarda ve çıkıntılarda Kıvrılmaya Eğilimlidir.
Daha esnektir	Daha gevrektilir.
Sıcak Plastik Kokusu Yayar ve Rahatsız Edicidir.	Pek Rahatsız Edici Olmayan Bir Kokusu Vardır.
Petrol türevidir	Bitkilerden üretilir

4. Filament Tutucu Tasarımı

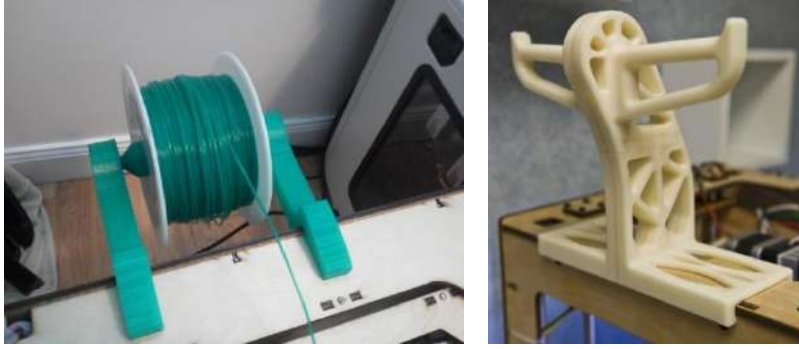
FDM 3D yazıcılarda kullanılan filament malzemelerin satışı, en yaygın 1 kg ve 0.5 kg ağırlıklarda makaralara sarılarak yapılır. Bu makaralar firmalara göre farklılık göstermekle birlikte genellikle Şekil 3’ de görüldüğü gibi biçim ve ölçülerde imal edilir.

**Şekil 3.** Filament makarası ve farklı renk filamentleri

Filament makaraları 3D yazıcılara dönme serbestliği sağlayan ve rahat tel akışı oluşturacak bir pozisyonda yüklenir. Tel akışı ekstruder dişlisinin filamenti çekmesiyle ve başlığın X-Y eksenini üzerindeki hareketiyle gerçekleştirilir. Filament tutucu üretici firmalar tarafından genel yazıcının arkası, yan veya üstünde bir yüzeyde noktaya sabitlenir. Şekil 4’de bir 3D yazıcının üzerine filament makarasının nasıl yerleştirileceği gösterilmiştir. Bazı 3D yazıcı modellerinde gövde üzerinde oluşturulan bir boşluk içerisinde üstü kapaklı olarak yerleştirilen yazıcı modelleri bulunmaktadır.

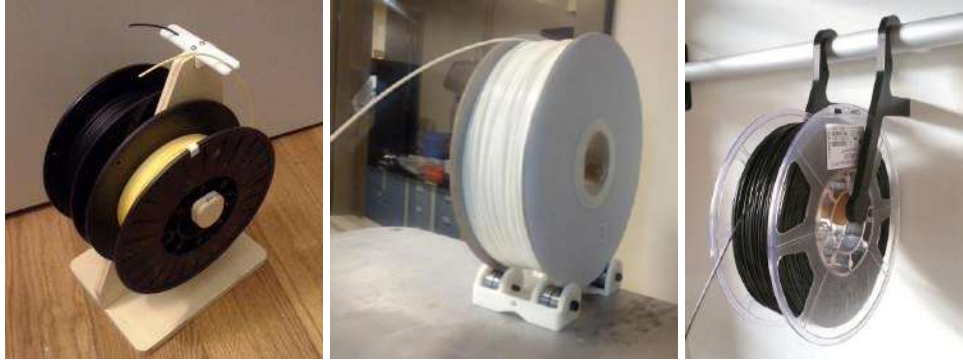
**Şekil 4.** Gövdeye bağlı filament taşıyıcı modeli

Şekil 5’ de yazıcı üst yüzeyine filament yüklemek için yapılmış tasarım örnekleri görülmektedir. Bu tür modeller için tekli yada çoklu filament taşıyıcı şekilleri isteğe göre yazıcı üzerine yerleştirilir.



Şekil 5. Gövde üstüne yerleştirilmiş tekli ve çoklu taşıyıcı [7]

Bazı durumlarda kullanıcı istekleri ve çevresel şartlar nedeniyle taşıyıcı sistem tamamen hareketli olarak düşünülebilir. Bu durumda taşıyıcı sistem o anda filament nerede durması gerekiyorsa, oraya konumlandırılabilir. Bu yapıya uygun taşıyıcı sistemlere ait yere ve yükseğe takılan modeller ait örnekler Şekil 6’ da görülmektedir.



Şekil 6. Masanın üstü ve duvara asmalı filament taşıyıcı modelleri [8]

Filament taşıyıcı eksenin yere paralel olduğu tüm bu modellere sahip taşıyıcılara alternatif olarak tasarlanmış, yere dik konumlu, dikey eksenli taşıyıcı modeli Şekil 7’ de görülmektedir. Bu model filament taşıyıcı sistemlerinde de tekli yada çoklu filament yüklemesi yapılabilir.



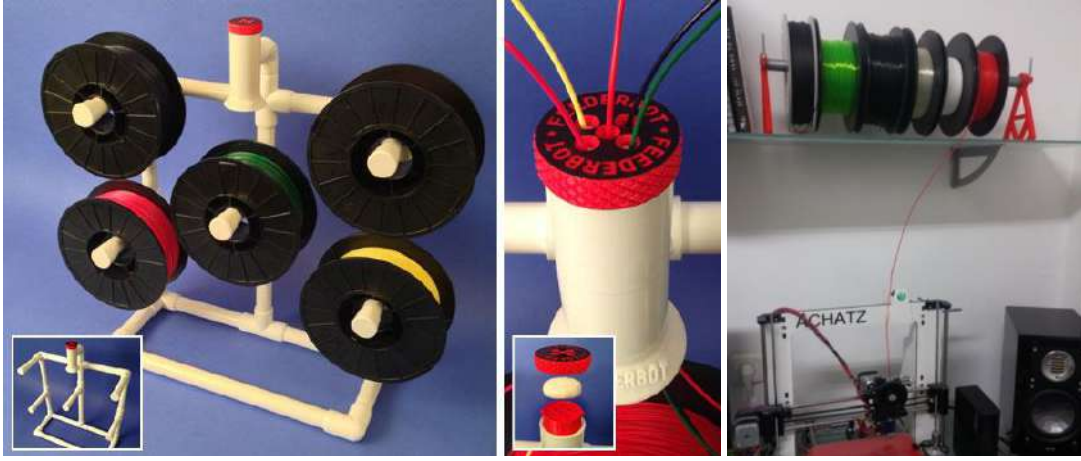
Şekil 7. Dikey eksenli taşıyıcı tasarımları [9]

Uzun süre dışarıda kalacak filament malzemelerin oda içerisindeki nem ve ortam şartlarından etkilenmemesi sağlamak amacıyla kapalı kutu şeklinde tasarlanan filament tutucu modeli Şekil 8’de görülmektedir. Bu tip kutularda kapaklar arasına ve filament malzemenin dışarı çıkış noktalarına hava geçirmezliği önleyici sızdırmazlık elemanları yerleştirilir.



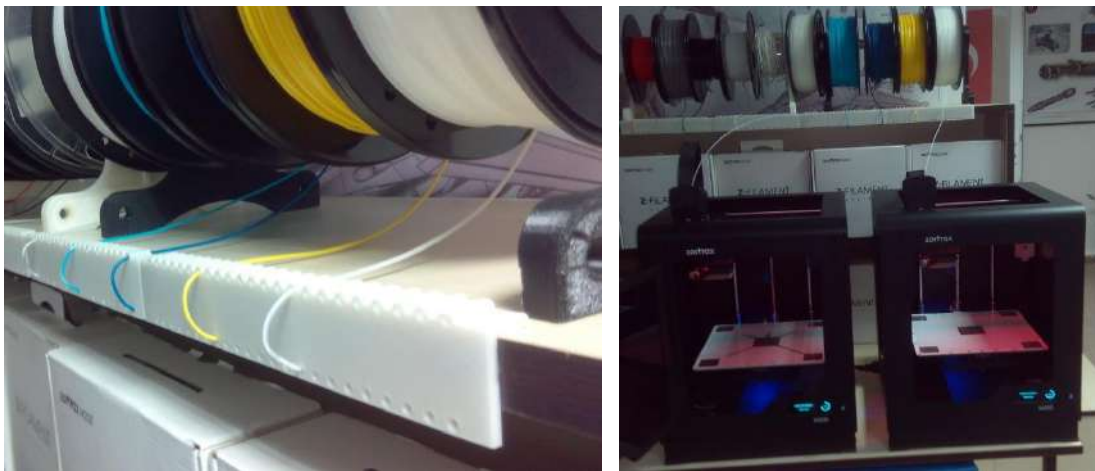
Şekil 8. Koruyucu kapaklı taşıyıcı sistemler [10]

Filament taşıyıcı sistemler çoğu zaman kullanıcıların 3D yazıcıların konumlandırma durumu, kullandıkları malzemenin özellikleri, filamentin kullanıma süresi, yazıcıya aynı anda yüklenebilen filament sayısı gibi değişkenler filament tutucunun nasıl tasarlanacağını yönlendirir. Şekil 9'de özel amaçlı üretilmiş değişik filament tutucu örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 9. Özel amaçlarla tasarlanmış çoklu filament taşıyıcılar [11]

Şekil 10' bu çalışma kapsamında tasarlanan ve prototipi üretilen tutucu sistem görülmektedir. Bu sistemin diğerlerinden en büyük farklı, çoklu sistem taşıyıcı sistem olmasına rağmen, tel akışı kontrol sistemi ve kilitleme sistem özelliği bulunmasıdır.



Şekil 10. Geliştirilen filament tutucu sistem

Geliştirilen bu filament tutucu, laboratuvar çalışma masasına uygun olarak, yazıcının üstündeki masanın çıkıntısına yerleştirilerek yer tasarrufu sağlanmaktadır. 1kg lık 10 adet filamenti aynı anda çalışabilen 2 farklı 3D yazıcı için taşıyabilen bir sistemdir. Kullanılmayan filament uçları Şekil 10'da görülen kilitleme gözeneklerine takılarak, filament uçlarının sabitlenmesi sağlanır. Şekil 11' de çok sayıda ve farklı özellikteki filament yüklenmiş sistemin çalışma anı görülmektedir. Bu sistem kullanılarak farklı renk ve malzeme özellikleriyle yapılacak çalışmalarda, imalat dışı sürenin azaltılması ve hızlı filament değişimi sunmaktadır.



Şekil 11. Tasarlanan tutucu sistemin çalışma anı görüntüsü

5. Sonuç

Bu çalışmada, FDM tip 3D yazıcılarda filament malzeme bağlama sistemleri incelenmiştir. FDM teknolojisi ile çalışan 3D Yazıcılar genellikle ABS ve PLA gibi termoplastik polimer malzemeler kullanmaktadır. FDM 3D yazıcılarda kullanılan tekli ve çoklu sistem polimer malzeme taşıyıcı filament malzeme tutucu yapıları örneklerle sınıflandırılarak gösterilmiştir.

Ayrıca birden çok sayıda farklı özellikteki filament rulolarını taşıma kapasitesi bulunan bir filament malzeme tutucu ve taşıyıcı sistemin tasarımı sunulmuştur. Bu tasarım modelinin uygulama parçaları 3D yazıcı kullanılarak basılmış ve modüler yapıya sahip bir prototip çalışması olarak montaj edilmiştir. Farklı yazıcı modellerine uyum sağlayabilmesi amacıyla yükseklik ayarı, aktif kullanılmayan filament telinin diğer rulolara dolaşmasını engelleyen tel kilit sistemi, kolay rulo değişim sistemi ve 3D yazıcı baskı başlığına düzgün tel akış sağlayan hizalayıcı mekanizmasıyla 3D yazıcılar için filament rulolarının yönetimini kolaylaştıran çok amaçlı komple taşıyıcı sistemdir.

Kaynaklar

1. https://tr.wikipedia.org/wiki/H%C4%B1zlı%C4%B1_prototipleme, 2017.
2. http://www.physicstoday.org/resource/1/pht-oad/v64/i10/p25_s1?bypassSSO=1, 2017.
3. <http://www.3byazici.com/2012/05/3-boyutlu-yazicilar-nasil-calisir.html>, 2016.
4. Çelik İ., Karakoç F., Çakır M Duysak A., *Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları*, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Sayı 31, Ağustos 2013.
5. https://tr.wikipedia.org/wiki/Akrilonitril_b%C3%BCtadien_stiren, 2017.
6. <http://www.3boyutlu-yazici.com/malzemeler/filament-alirken-dikkat-edilmesi-gerekenler/>, 2016.
7. <http://forum.typeamachines.com/viewtopic.php?t=119>, 2016.
8. <https://www.meetup.com/CT-Hackerspace/messages/boards/thread/37986832>, 2016.
9. <http://www.thingiverse.com/thing:508896>, 2017.
10. <https://3dprint.com/tag/3d-printed-filament-spool-holder/>, 2017.
11. <http://prototypesupply.com/spool-holders/>, 2017.

3D YAZICILARLA KULLANICIYA ÖZEL SİLAH KABZASI TASARIMI

Doç.Dr. Mustafa BOZDEMİR

Kırıkkale Üniversitesi, KMYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yahşıhan/KIRIKKALE
mustafabozdemir@kku.edu.tr

ÖZET

Barut gazının itici gücüyle mermi fırlatan silahlara ateşli silah denir. Hafif ateşli silahlar ise genellikle bir kişi tarafından taşınabilen küçük çaplı silahlardır. Ateşli silahların kullanımı sırasında, silah ile insan arasındaki temas ve birleşim noktası silah kabzasıdır. Doğru ve kullanıcıya uygun tasarlanmış bir silah kabzası sayesinde, rahat ve güvenli bir kavramanın yapılmasının yanında uzun süreli tutuşlarda el yorgunluğunun da en aza indirilmesi sağlanır. Rahat ve güvenli bir tutuş amacıyla tasarlanmış silah kabzasının ergonomik tutma hatları, tetik kontrolünü artırarak ve ateş sırasında hedefteki doğruluk değerini artırmaktadır. Kavramayla silah geri tepme etkisi ve namlu ucu şahlanması gibi silah atış doğruluğunu etkileyen olumsuz faktörlerin kontrolü kabza aracılığıyla daha kolay sağlanabilir.

Bu çalışmada, kişiye özgü bir silah kabzasının bilgisayar destekli tasarımı yapılmıştır. Bu kabzanın 3D yazıcı yardımıyla basılması sırasında, uygulanması gereken tasarım ve imalat süreçleri anlatılmıştır. Örnek bir kabza tasarımı üzerinde 3D yazıcı baskı parametreleri incelenerek, kabza imalatında 3D yazıcıların uygunluğu tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ateşli Silah, Silah Kabzası, Ergonomik Tutuş, Bilgisayar Destekli Tasarım

USER-SPECIFIC PISTOL GRIP DESIGN WITH 3D PRINTERS

Guns that shoot bullets with the driving force of a gunpowder gun are called firearms. Light firearms are small arms that can usually be carried by a person. During the use of firearms, the contact and junction between the weapon and the human is the gun brass. Drop-in replacement for factory pistol grip has sculpted, ergonomic contours designed to provide an exceptionally comfortable, secure grip that minimizes hand fatigue, enhances trigger control, and improves weapon handling during sustained rapid fire. Also helps reduce hand fatigue during long periods in the ready position. A wide, hand-filling palm swell and gently curved finger grooves provide plenty of support, while molded-in stippling and vertical grooves on the blackstrap help you maintain a firm grip with wet hands. Sweeping, integral beavertail allows a high hand position for outstanding recoil control.

In this study, a computer-aided design of a weapon-specific crane was made. The design and fabrication processes that need to be applied during the manufacture of this masonry 3D printer are described. By examining the 3D printer printing parameters on a sample pistol grip design, the suitability of 3D printers in handle manufacturing is discussed

Keywords: Firearm, Pistol Grip, Ergonomic Grip, Computer Aided Design

1. Giriş

Askeri sistemlerin teknoloji odaklı gelişimi ve sivil alandaki teknolojilerin askeri uygulamasının giderek artmasıyla, güvenlik ve savunmanın ana eksenini teknoloji ve bilgi üstünlüğüne oturtmuştur. Bu alandaki üstünlük, teknoloji yönetiminde benimsenen akılcı ve sürdürülebilir politikalarla mümkün olmakta ve bu amaçla izlenen politikalar ve yapılan Ar-Ge harcamaları, askeri üstünlük ve caydırıcılığın önemli bir göstergesi olarak kullanılmaktadır [1].

Sektördeki ürünlerin olgunlaşma döneminin giderek kışalmasına paralel olarak yenilik ve yaratıcılığa dayalı yeni teknolojilerin geliştirilmesi, dünyada rekabet edebilmenin bir ön koşulu haline gelmekte, ARGE faaliyetleri ve uzun dönemli yatırım politikalarının önemi gün geçtikçe artmaktadır [2].

İnsanların büyük bir çoğunluğunda silah denilince; sadece ateşli silahın anlaşıldığı yolunda yaygın ve yanlış bir değerlendirmenin varlığı söz konusudur. Halbuki ateşli silahların yanında, daha bir çok alet, araç ve gerecin de silah kapsamına girdiğini bilmeliyiz. Ancak tüm silah yapıların ve sistemlerin ana yapısı incelendiğinde, silahların tasarımı ve balistik incelenmesi konuların hep gündemde olduğu görülmektedir [3].

Yapılan silah tasarımları ve bunlara ait balistik hesaplamalar nihai sonuca ulaşmada birbirini tamamlamaktadır. Tasarım işlemi için iç-diş balistik hesaplamalar namlu boyutlandırması için çok önemlidir. Tasarım işlemi

silah çalışmalarında vazgeçilmez unsurlardan birisidir. Tasarım kelime anlamı olarak fikir, kavram ve bir sonuca uygun çözüm bulmaktır [4].

Klasik tasarım tekniklerindeki eksiklerin görülerek, düzeltilmesi için tasarım işleminin formülize edilmesine yönelik ilk çalışmalar özellikle 2.Dünya savaşı sıralarına rastlar. Bundan sonraki zaman dilimlerinde sürekli gelişerek, yeni daha esnek temsil teknikleri olan tasarım yöntemleri üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır [5]. Öğrencilerin yada tasarımcıların kişisel beceri yada tecrübelerine gerek kalmadan, tasarım işlemini bilimsel ve formüle edilebilen işlemlere bölmek ise sistematik tasarım işlemidir. Öğrenci yada tasarımcının bilişsel, duyuşsal veya devinsel giriş davranışları tasarım işlemi içerisinde değerlendirilebilmektedir. Böylece, tasarım eğitiminde bilgisayarların teknolojilerini kullanmak zorunda kalmışlardır. Yeni bilgi teknolojilerinin gelecekteki gereçlerden daha karmaşık olması onların kullanım yollarını artırdığı gibi kullanım zorluğunu da artırmaktadır[6].

Sistematik tasarım teknikleri kullanılarak yapılacak bilgisayar uygulamalarında başarının artırılması amacıyla tasarım işleminin sistematik basamaklarına ve ana fonksiyon yapılarına uyum sağlanmalıdır. Mekanik sistemlerin ve silah sistemlerinin sistematik tasarımı içerisinde elde edilen tüm bilgiler; fonksiyonlar, formüller, çizimler, grafikler, katı modeller vb. şekillerde temsil edilebilir. Tasarım esnasında problemin yapısına uygun seçilmeyen bir temsil biçimi kullanılacak olur ise, elde edilecek çözümün gerçekleştirilme başarısını etkileyecektir. Bilgi temsillerinin seçiminde tasarım işlemi merkezinde bulunan bilgisayar veya insan karar vericinin durumuna göre uygun bir seçim yapılmalıdır [7].

2. Ateşli Silahlar

Silah; “uzaktan ya da yakından canlıları öldürebilen, yaralayan, etkisiz bırakan, canlı organizmaları hasta eden, cansızları parçalayan, yok eden araç ve aletlerin tümüne” denir. Başka bir tanıma göre silah; “saldırıya da savunma amacıyla kullanılan düzenek, aygıt ve araçların” genel adıdır.

Bir silahın mermisine, ateşlenen barut gazıyla itici güç vererek hedefe ulaştırmaya yarayan aletlere ateşli silah denir[8]. Başka bir tanıma göre; mekanik bir kuvvetle içerisinde bulunan sert cisimleri belirli mesafelere kadar ulaştıran ve orada da bu sert cismin etkisiyle tahribat yaratan aletlere ateşli silah denir. Bu iki tanıma göre ateşli silah; özel şekil ve niteliği bulunan mermiyi barut gazı basıncı ile uzak mesafelere atabilen aletler olarak tanımlanır. Çeşitli vasıtalar yardımıyla veya birden fazla kişi tarafından kullanılan ağır ve tahrip gücü yüksek olan, namlu çapı 60 kalibreden büyük olan uzun menzilli silahlardır[9].

Şekil 1’ de ateşli silahlara en yaygın kullanım örneği olan bir tabancanın kesit halinde çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 1. Tabanca çalışma prensibi

Tabanca ve tüfek gibi silahlar polis ve askeri güçler tarafından sıklıkla kullanılan silah türleridir. Bireysel kullanılabilen tahrip gücü daha düşük olan silahlardır. Çalışma prensipleri, elle ilk başta kurulan bir mekanizma bir mermiyi fişek yatağına alır ve ardından tetiğe basıldığında horoz veya iğne fişeğe çarpar ve fişekğin içindeki barut ateşlenir. Barutun oluşturduğu basınçla çekirdek namlu içerisindeki yivler ve setler sayesinde dönerek çıkar ve hedefe gider[10]. Tabanca ve tüfek gibi nişan alınmasında insan unsuru bulunan ve barutun ateşlenmesi sırasında geri tepme oluşturan silahlarda, silahın kavranması ve sabit tutulması önemli bir ihtiyaçtır.

Uzun namlulu hafif silahlar genellikle omuza dayalı olarak atış yapılan mekanizma, kundak, dipçik ve namlu olmak üzere dört ana parçadan oluşan silahlardır. Bunları savaş tüfekleri ve av tüfekleri olmak üzere iki başlıkta inceleyebiliriz. Savaş tüfekleri yiv ve setli olup, uzun menzil ve tahrip gücü yüksek olan silahlardır[11]. Kundak ve namlu altında kullanıcıya silah hakimiyeti sağlamak amacıyla tutamak yerleri bulunmaktadır.

3. Silah Kabzası Görevleri

Tüm ateşli silahlarda silah tutamağı bulunur ve insan ile silahın ortak buluşma noktasını oluşturur. Silahın boyutuna göre 2 noktalı kavrama veya tek noktalı kavrama prensibiyle tasarlanabilir. Tabanca ve tüfek sistemlerindeki ana el tutamağına kabza denilmektedir. Kabza silah hakimiyeti, tetik kontrolü ve hedef almada etkin rol oynamaktadır.

Kabza silah sistemlerinde tutulacak yer yada sap demektir. Ok atılan yayın tutulduğu yerde kabza olarak adlandırılır. Şekil 2’de silahlara ait kabza örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2. Silahlarda kullanılan kabza örnekleri

Ateşli silahların kullanımı sırasında, silah-insan arasındaki temas ve birleşim noktası silah kabzasıdır. Doğru ve kullanıcıya uygun tasarlanmış silah kabzası sayesinde, rahat ve güvenli kavramanın yapılmasının yanında uzun süreli tutuşlarda el yorgunluğunun da en aza indirilmesi sağlanır. Rahat ve güvenli bir tutuş amacıyla tasarlanmış silah kabzasının ergonomik tutma hatları, tetik kontrolünü artırarak ve ateş sırasında hedefteki doğruluk değerini artırmaktadır. Kalibresine bağlı olarak oluşacak silah geri tepme etkisi ve namlu ucu şahlanması gibi silah atış doğruluğunu etkileyen olumsuz faktörlerin kontrolü kabza aracılığıyla daha kolay sağlanabilir. Şekil 3’de aynı tür silaha ait farklı tip malzemelerden yapılmış kabza çeşitleri görülmektedir. Kabza malzemesi olarak metaller, plastik, kauçuk, çeşitli ahşap türleri, değerli kemik ve dişler kullanılabilir. Bazı kullanıcılar için rahat tutuşla birlikte desen, renk ve farklı süslemeleri olan kabzalar tercih edilmektedir.



Şekil 3. Farklı tür malzemelerden üretilmiş silah kabzaları

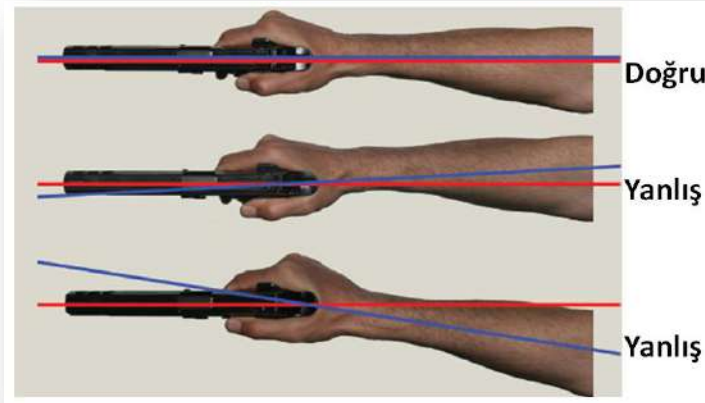
Şekil 4’de ortopedik olarak tasarlanmış değişik tabanca kabzaları görülmektedir. Ortopedik tasarımda ergonomik parmak boşlukları, sürekli aynı şekilde bir tutuş sağlar. Kaydırmaz yüzey dokusu, ateşleme sırasında silah hakimiyetini artırır. Kauçuk yada pürüzlü yüzey dokuları iyi bir tutuşa yardımcı olur. Rahat tutuş, kararlı ve kolay tetik kontrolü sağlar. Ortopedik kabzalar standart olarak belirli temel boyutlarda imal edilirler. En iyi ortopedik ve etkili silah kabzası, kullanıcının kendi parmak yapısı ve el ölçüsüne göre yapılabilenlerdir.



Şekil 4. Ortopedik silah kabza türleri

4. Kişiyi Özel 3D Tasarım

Sağlam ergonomik tabanca kabzası tasarlanırken kullanıcı isteklerinin yanı sıra tasarımda göz önünde bulundurulması gereken önemli kriterler vardır. Tasarımlarda ana hedef, kullanıcıya rahat bir tutuş sağlamanın yanında, atış performans ve doğruluğunu artırmaktır. Ayrıca silah üretici firmaların ürettiği profesyonel amaçlı kabzalarda, değişik iklim ve hava şartlarında kullanıma imkan sağlayacak ayrıntılar bulunabilmektedir. Aşırı sıcaklarda ve nemli ortamlarda ihtiyaç duyulan tutuş konforu ve uygun havalandırma kanalları tasarımda unutulmamalıdır. Özel amaçlı kabza tasarımlarında boyut, şekil, yüzey, güvenlik, sertlik, yerleştirme, çevre, depolama vb., tasarım kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır. Bazı sıra dışı insan uzuv boyutları, ortopedik problemler ve yanlış tutuş teknikleri nedeniyle Şekil 5’de görülen kabza kaynaklı nişanlama hataları oluşmaktadır.

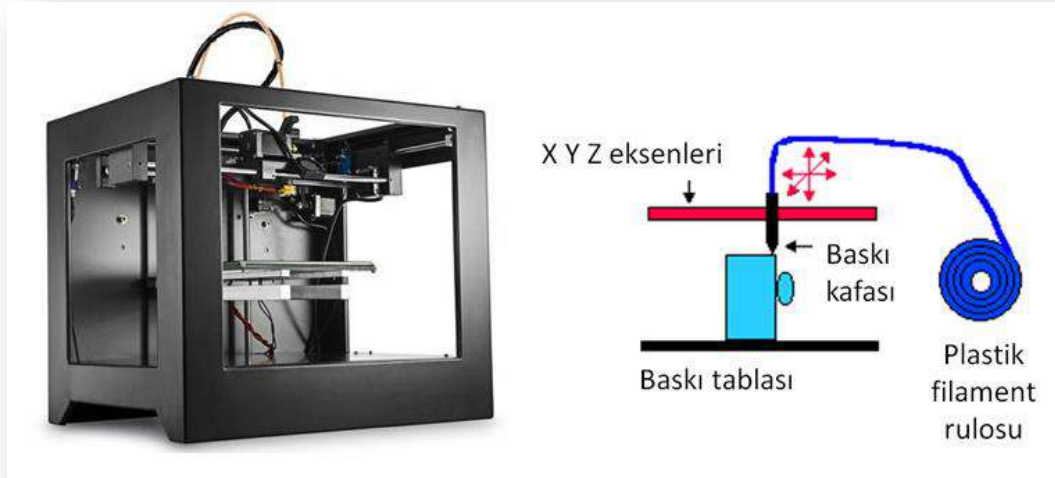


Şekil 5. Silah tutuşundan kaynaklı hedefleme hataları

Atış disiplini, atıcının bireysel özellikleri ve tekniği, Şekil 5’de görülen tutuş hatalarına neden olabilir. Bu nedenle özel atıcılık müsabakalarında ve özel silah kullanıcılarında kendi el ve vücut yapısına uygun tasarlanmış silah kabzalarının kullanılması uygun olmaktadır. Özel amaçlı kabza üretimi plastik, ahşap veya metallerden yapılabilmektedir. 3D yazıcı teknolojilerinde meydana gelen hızlı gelişme ve baskı kalitesindeki artış, silah kabzası üretimini de olumlu yönde etkileyecektir. 3D yazıcı kullanılarak ev ortamında bile, kullanıcılar kendi kabza tasarımlarını gerçeğe çevirebilirler.

3D Yazıcı bilgisayar üzerinde tasarlanmış ve ya 3 boyutlu olarak taranmış modelleri, bir çok farklı malzeme kullanarak çok hızlı ve ekstra bir kalıp yada fiyktüre ihtiyaç duymadan üreten bir cihazlardır. FDM teknolojisi ile çalışan 3D Yazıcılar genellikle ABS ve PLA gibi termoplastik polimer malzemeler kullanmaktadır. Hızlı prototipleme teknolojisi, imalat uygulamalarında, medikal/dentalimplant yapımında, kavramsal modellemede, doğrudan döküm kalıbı ve parça üretiminde, hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretiminde, mimari uygulamalarda, uzay/otomotiv sanayinde, hızlı kalıp imalatında, eğitim amaçlı her türlü donanımın yapımında ve takı sektörü gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Bir hızlı prototip üretiminde ilk adım, herhangi

bir CAD yazılımı ile veya bir lazer ya da optik bir tarayıcı yardımı ile tersine mühendislik yaparak parçanın 3D CAD modelinin oluşturulmasıdır [12].



Şekil 6. 3D yazıcı ve çalışma yapısı

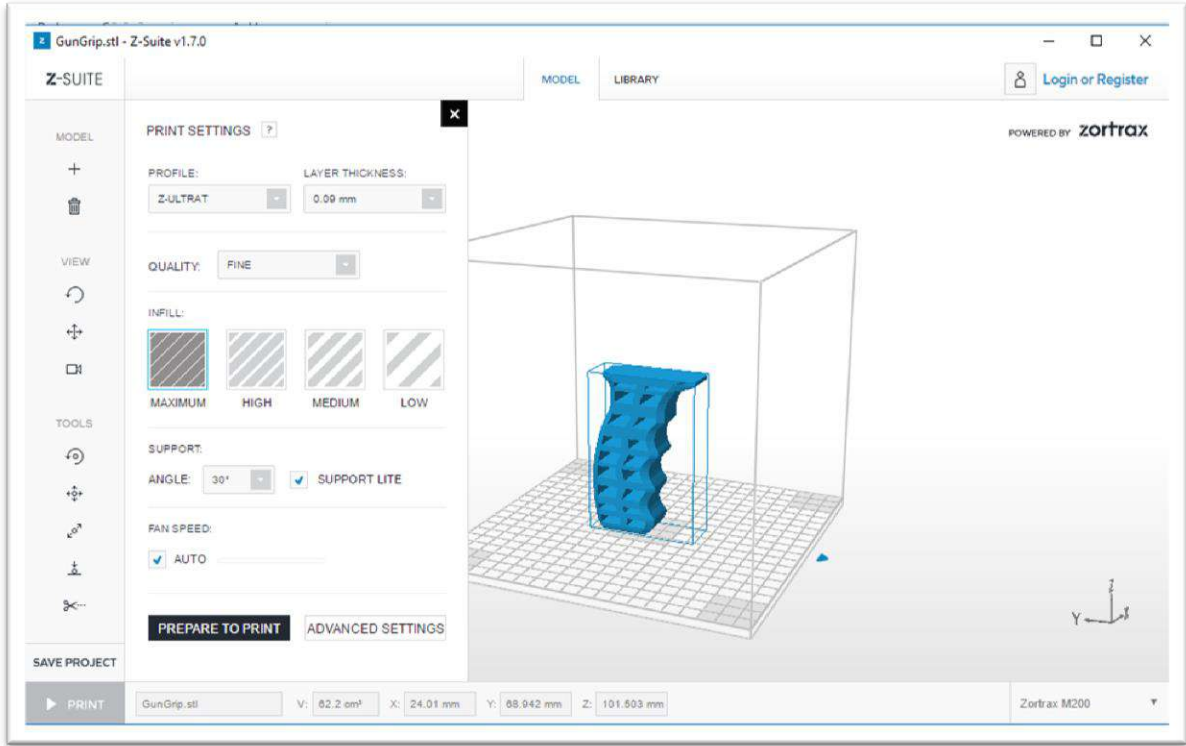
Şekil 6'da 3D yazıcı sistemi ve çalışma prensibi görülmektedir. En yaygın kullanıma sahip olan üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu bir nesnenin sanal olarak katmanlara bölünmesine ve her bir katmanın eritilen hammadde dökülerek üst üste gelecek şekilde basılmasına dayanır. Üç boyutlu baskı teknolojisi 1980 li yıllarda başlamıştır.

Günümüz 3 boyutlu yazıcı teknolojisi birçok farklı teknolojiyi kapsamaktadır. Bu teknolojiler, lazer sinterleme, fused deposition (bileşimli yığma), polimer kürlleme gibi sıralanabilir. Yaygın kullanıma ve farklı tasarıma sahip olsa da temelde en çok kullanılan teknoloji "fused deposition modeling" tekniği ile çalışan cihazlardır. Bu teknikte bilgisayarda 3 boyutlu modeli bulunan cisim 2 boyutlu katmanlar halinde yığılarak 3 boyutlu ürün elde edilir. Bu prosesi gerçekleştirmek ise günümüz makine imalat sektöründe 3 eksenli bir CNC nin kontrolünden ibarettir. Kontrol kartı ve CNC ile iletişimde olacak bir yazılım ve malzeme yığma özelliğine sahip bir takımdır. FDM ile modelleme bir yazılım işlemiyle başlar, yazılım STL formatındaki modelleri matematiksel olarak katmanlara ayırır ve bu katmanları üst üste inşa etmek üzere 3 eksenli CNC kontrollü bir cihaza gönderir [13].

*.stl formatına dönüştürmeden önce 3 boyutlu tasarım programları aracılığıyla istenilen kabza tasarımı yapılır. Tasarım sırasında kullanıcı istekleri ve genel kabza tasarım kriterleri göz önünde bulundurulur. Parmak boşlukları ve kabza sırtı kullanıcının el ölçülerine göre oluşturulur. Bu tasarım sırasında ana hedef silaha rahat ve güvenli tutuş sağlamanın yanında, atış performans-doğruluğunu artırmaktır. Şekil 7'de kullanıcı tarafından Solidworks programıyla tasarlanmış özel amaçlı silah kabzaları görülmektedir.



Şekil 7. Solidworks programıyla tasarlanmış kabza modelleri



Şekil 8. Kabzanın 3D yazıcı ayarlarının yapılması

3D ergonomik kabza modelinin tasarımının tamamlanmasından sonra, bu tasarım STL formatındaki matematiksel hesaplanmış katmanlara dönüşümü yapılmaktadır. Şekil 8'de Z-Suit yazılımı kullanılarak, STL dönüşümü yapılmış modelin 3D yazıcı için baskı ayarlamalarının yapıldığı ara yüz görülmektedir. Baskı yapılacak malzeme türü, baskı kalınlığı, baskı kalitesi, iç doluluk yapısı, destek açısı, fan hızı gibi baskı değişkenleri bu ara yüz üzerinden istenildiği şekilde seçilebilmektedir.

5. Sonuç

Mevzuatımızda silah, uzaktan veya yakından canlıları öldürebilen, yaralayan, etkisiz bırakan, canlı organizmaları hasta eden, cansızları parçalayan veya yok eden araç ve aletlerin tümü biçiminde tanımlanmaktadır. Ateşli silahlar ise, barut gazının itici gücüyle mermi atan bütün silahlara denir. Ateşli silah denince, genellikle bir kişi tarafından taşınabilen küçük çaplı silahlar akla gelir. Oysa ateşli silahlar, büyük toplardan tüfeğe, av tüfeğine ve tabancaya kadar her türde ve boyuttaki silahları kapsar. Ateşli silahlar insanoğlunun her dönem ilgisini çekmiştir. Günümüzde avcılığın yanı sıra savunma ve saldırı amacı ile de çok çeşitli türleri kullanılmaktadır. Ateşli silahlarda nişanlama, tutuş, kavrama, hakimiyet, geri tepme kontrolü gibi olaylarda silahın tutulduğu nokta olan kabza ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada ateşli silahların kullanılması sırasında, silaha hakimiyet sağlayarak, doğru hedefleme ve güvenli atış yapmanın önemli unsurlarından biri olan silah kabzası tasarımı ve 3D yazıcılarla imal edilebilirliği incelenmiştir. Kişi el ve parmak yapısına uygun olarak ergonomik tasarlanmış silah kabzası, hedef doğruluğu ve güvenli tutuş sağlayacaktır. Kişiye özel geliştirilen kabzaların sağlayacağı faydalar şu şekilde özetlenebilir.

- Rahat ve güvenli bir kavrama sağlar.
- El yorgunluğunun azaltılmasını etkiler.
- Tetik kontrolünü artırmaktadır.
- Doğru ve kararlı atış imkanı sunar.
- Geri tepmeyi kontrol etmeyi kolaylaştırır.

Kullanıcı el ve parmak yapısına uygun yapılmış kabza tasarımları 3D yazıcılar kullanılarak basılabilir. Bu kabzalar kişiye özel nitelikte olup, istenildiğinde sökölüp takılarak mevcut ateşli silahın kullanıcıya istediği konfor sağlanabilir. ABS ve Ultra ABS malzeme malzemelerle birlikte, tutma çıkıntıları, pürüzlü yüzey ve terleme kanalları 3D yazıcılarla oluşturulabilmektedir.

Kaynaklar

1. Savunma sanayi müsteşarlığı, 2011-2016 Teknoloji yönetim stratejiisi, 2011.
2. MKE, MKE yayınları stratejikplanı 2011-2015, 2011
3. Deng S., Sun H. K., and Chung-Jung Chiu, RiflesIn-BoreFinite Element Transient Analysis, International Conference on Mechanical, Production and Materials Engineering (ICMPME'2012) June 16-17, 2012.
4. Bayazıt N., “Endüstri ürünlerinde ve mimarlıkta tasarlama metotlarına giriş”, Literatür yay., 1994.
5. Bozdemir M., Eldem C., Modern tasarım teknikleri, UMTİK 2002, 55-63, 2002.
6. Hannafin, M.S. ve Peck, K.L. “The Design Develop. and Evaluation of Inst. Software”, MacMillan, 1988.
7. Hsu W. and Woon M., “Current research in the conceptual design of mechanical products”, Computer Aided Design, 30(5):377-389, 1998.
8. Gündüzer O., Namlu Cıdarı Boyut. İç Balistik Davranışın Etkisi. Yük. Lis. Tezi. Gazi Üniv., Ankara, 2011.
9. Tuncer D. ve Alli H., Ağır Sil. Geri Tepme Mek. Tas. İç Balistik Modelinin Oluş. Ve Kama Kuv. Hes. 2.Ulusal Tas. İm. ve Anl. Kongresi, Kasım 2010, Balıkesir, s. 413-414, 2010.
10. Çayiroğlu İ. ve Dizdar E., Kapsülsüz ve Barutsuz Mermili Hafif Silah Tas., Teknoloji D. 2, 339-344, 2004.
11. <http://www.ordu.pol.tr>, 2016.
12. Çelik İ, Karakoç F., Çakır M Duysak A., Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. *Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları*. Sayı 31, Ağustos 2013.
13. <http://www.3byazici.com/2012/05/3-boyutlu-yazicilar-nasil-calisir.html>, 2016.

FDM TİP 3D YAZICILARDA PLASTİK ÜRÜNLERİ GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİ

Doç.Dr. Mustafa BOZDEMİR

Kırıkkale Üniversitesi, KMYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yahşıhan/KIRIKKALE
mustafabozdemir@kku.edu.tr

ÖZET

Popüler imalat yöntemlerinden biri haline gelmeye başlayan 3D Yazıcı sistemleri, bilgisayarda tasarlanmış modelleri, birçok farklı malzeme kullanarak üreten bir cihazdır. Baskı malzemesinin ısı ile şekillendirilebilen termoplastik polimer malzemeler (PLA, ABS) olduğu eriyik yığılma modelleme (FDM) yapan yazıcılarda, plastiklerin karakteristik ve teknik özelliklerinin çok iyi bilinmesi yapılan ürünün sağlıklı bir şekilde kullanılmasına etkili olacaktır.

Bu çalışmada, 3D yazıcı malzemesi olarak ABS ve PLA tür plastik malzemelerin kullanılması durumunda uyulması gereken tasarım kriterleri vurgulanacaktır. Bu kriterler aynı zamanda 3D yazıcıların *.stl dosyası mantığı oluşan katmanlarla çalışma açısından değerlendirilmiştir. 3D yazıcıda üretilecek parçalar, estetik veya fonksiyonel olarak görev yapacağı yerdeki ihtiyaçları karşılamalıdır. Tasarımda üretilecek parçanın fonksiyonu ve parçaya etkileyen çevresel şartların çok iyi bilinmesi gereklidir. Plastik parçalarda olması muhtemel çekme pay oranları, güçlendirme sistemleri ve ekonomik faktörler gibi sebeplerin tasarım üzerindeki etkileri 3D yazıcılarla ilgili olarak tartışılacaktır.

Anahtar Kelimeler: 3D Yazıcı, Polimer Malzemeler, Tasarım Kriteri

PLASTIC PRODUCTS STRENGTHENING TECHNIQUES IN FDM TYPE 3D PRINTERS

3D printer systems are starting to become one of the popular manufacturing methods. Models designed on a computer are devices that produce using many different materials. Thermoplastic polymer materials (PLA, ABS) which can be thermoformed by the printing material. In printers that make *fused deposition modelling* (FDM), knowing the characteristics and technical characteristics of the plastics will be effective for the healthy use of the product.

This study will highlight the design criteria that must be followed when using ABS and PLA plastic materials as 3D printer material. These criteria have been evaluated in terms of production with the layers that make up the 3D printer *.stl file. The parts to be produced in the 3D printer should meet the needs of the aesthetic or functional space. The function of the part to be produced in the design and the environmental conditions affecting the part must be well known. The effects on the design of reasons such as probable tensile ratios in plastic parts, strengthening systems and economic factors will be discussed in relation to 3D printers.

Keywords: 3D Printer, Polymer Materials, Design Criterion

1. Giriş

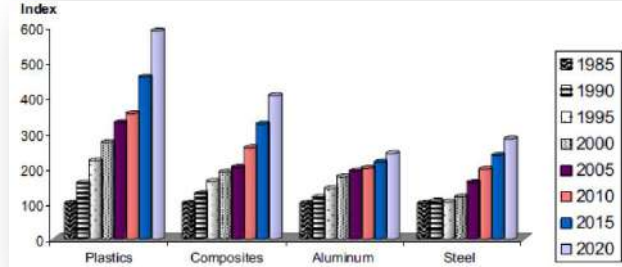
Plastik, 1851 yılında ilk olarak sert kauçuğun yapılması ile birlikte doğal maddeler yerine kullanılabilen kimyasal bir maddeden elde edilmiştir. Kauçuğun keşfini takiben 1862 yılında Alexander Parkes ilk insan yapımı plastiği Londra'da uluslararası bir sergide kauçuğun yapabileceği her şeyi yapabilen ama daha ucuz olan bir madde olarak sergilemiştir. Bu yeni buluşu takiben Avrupa ve ABD'de plastik üzerine birçok çalışma yapılmış ve Alexander Parkes'in bu yeni icadı geliştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen birikimin sonucu olarak 1920 yılında naylon ve 1927 yılında modern anlamda bildiğimiz plastik icat edilmiştir. 2. Dünya Savaşı ile plastiğe olan aşırı talep, plastiğin hem kullanım miktarını hem de kullanım alanının hızla gelişmesi sonucunu doğurmuştur.

Savaş sonrası dönemde bu gelişimi devam eden plastik, 20. yüzyıl sonuna gelindiğinde ekonomik ve sosyal hayatta vazgeçilmez bir yere sahip olmuştur [1].

Plastik, karbonun (C) hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve diğer organik ya da inorganik elementler ile oluşturduğu monomer adı verilen, basit yapıdaki molekülü gruplardaki bağın kopararak, polimer adı verilen uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen malzemelere verilen isimdir.

Plastik, ilk olarak 1860 yılında Alexsander Parkes tarafından keşfedilmiş ve bugün geniş bir alanda kullanılmaktadır. Plastik ürünleri dünyada yılda 80 milyon ton kullanılmaktadır. Plastiklerin kaynağı, ham pet-

rol, Gaz ve kömürdür. Plastik genelde ana kaynağı petrol rafinerisinden arta kalan bakiye maddelerdir. Dünyada üretilen toplam petrolün sadece %4 plastik üretimi için kullanılmaktadır. Termoplastiklerin, hafif olmaları, imalatının ve geri dönüşümlerinin kolay olması sebebiyle kullanımı giderek artmaktadır. Şekil 1'de 1985 yılından itibaren malzemelerin dünyada kullanımının gelişimini göstermektedir [2].



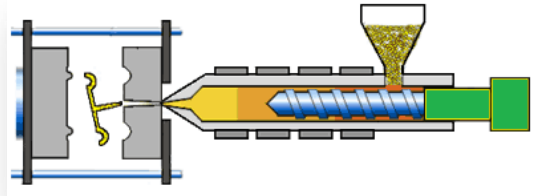
Şekil 1. Plastik kullanımının dünyada gelişimi

2. Plastik Parça Üretimi

Plastiklere uygulanan bazı parça üretim teknik ve yöntemleri şu şekilde sıralanabilir.

Ekstrüzyon, Enjeksiyon, Kalıplama yöntemleri, Isıl şekillendirme (Termoforming), Haddelme, (Kalenderleme), Döküm, Köpükleme Yöntemleri, Talaşlı İmalat, Birleştirme ve 3D yazıcılarla basma teknikleri olarak sıralayabiliriz.

Enjeksiyon prosesinde, granül halindeki hammadde, huniden geçerek enjeksiyon vidası tarafından silindire alınır. Burada bant şeklindeki rezistanslar ve sürtünme sonucu oluşan ısı ile granüller karışarak erir. Eriyik plastik, kalıp içerisindeki boşluğa enjekte edilerek kalıbın şeklini alması sağlanır. Ardından kalıp soğutulur, termoplastik malzeme önce camsı geçiş sıcaklığının altına, ardından deforme olmadan itilebilmesi için yumuşama sıcaklığının altına soğutulur. Şekil 2 'de plastik enjeksiyon ile kalıplama metodu şema olarak gösterilmiştir [3].



Şekil 2. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

Enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretilen plastik parçalar, otomotiv, uçak, elektronik, ev aletleri, oyuncak sanayi gibi endüstrisinin ve günlük hayatımızın tüm alanlarında yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Günlük yaşantımızın vazgeçilmez bir parçası olan plastik ürünler endüstride son zamanlarda, metalik parçaların yerini almaya başlamıştır. Plastik ürünlerin üretimlerinin diğer malzemelere göre daha ucuz ve kolay olmasının en büyük nedenlerinden biri, enjeksiyonla kalıplama tekniği gibi yöntemlerle üretiliyor olmasıdır. Enjeksiyonla kalıplama tekniği ile üretilen parçalar, kalıplama sonrası son işlem gerektirmediğinden, kalıptan çıkan plastik parçalar doğrudan endüstride kullanılmaktadır [4].

Plastik malzemelerin içerisine katılan talaş, baryum, mika, metal tozu, fiber, grafit, cam elyafı gibi katkı malzemeleri ile oluşturulan yeni özellikteki kompozit malzemelerde gerek ısıl gerekse de elektriksel iletkenlik özellikleri ile yakıt hücrelerindeki bi-polar tabaka üretiminden birçok alana kadar endüstride kullanılmaktadırlar.

3. 3D Yazıcı Teknolojileri

3B Yazıcı bilgisayar üzerinde tasarlanmış ve ya 3 boyutlu olarak taranmış modelleri, bir çok farklı malzeme kullanarak çok hızlı ve ekstra bir kalıp yada fişture ihtiyaç duymadan üreten bir cihazlardır.

Son 10 yılda hızla gelişen katmanlı üretim tekniğini (additive manufacturing) kullanan hızlı prototipleme sistemleri birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yapılan işlemi tanımlamak için "eklemeli üretim" veya "katmanlı üretim" terimlerinin kullanıldığı hızlı prototipleme teknikleri 6 başlık altında sınıflandırılmaktadır [5]. Bu teknikler şöyledir: Stereolitografi (Stereo Lithography - SLA), Ergiyik Birikimli Modelleme (Fused Deposition Modeling - FDM), Tabakalı Parça İmalatı (Laminated Object Manufacture - LOM), Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS), Katı Tabaka Kurlama (Solid Ground Curing - SGC) ve 3 Boyutlu Püskürtmeli Baskı (3D Ink Jet Printing) dir.

FDM teknolojisi ile çalışan 3B Yazıcılar genellikle ABS ve PLA gibi termoplastik polimer malzemeler kullanmaktadır. Filaman formundaki malzeme yüksek sıcaklığa sahip bir nozül yardımı ile eritilerek katmanlar halinde inşa edilir.

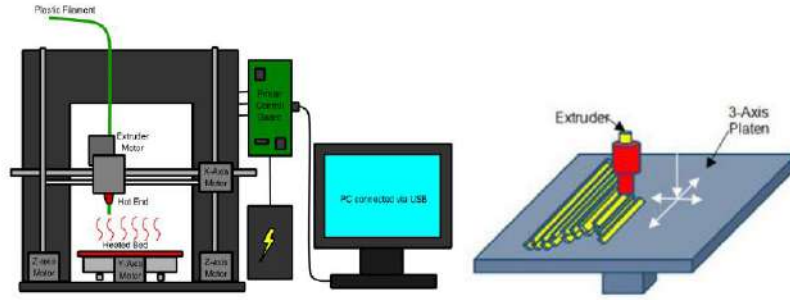
Hızlı prototipleme teknolojisi, imalat uygulamalarında, medikal/dentalimplant yapımında, kavramsal modellemede, doğrudan döküm kalıbı ve parça üretiminde, hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretiminde, mimari uygulamalarda, uzay/otomotiv sanayinde, hızlı kalıp imalatında, eğitim amaçlı her türlü donanımın yapımında ve takı sektörü gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Bir hızlı prototip üretiminde ilk adım, herhangi bir CAD yazılımı ile veya bir lazer ya da optik bir tarayıcı yardımı ile tersine mühendislik yaparak parçanın 3B CAD modelinin oluşturulmasıdır. CAD yazılımları ile hızlı prototipleme makineleri arasında veri transferini sağlamak için bir veri ara yüzüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veri ara yüzü STL (Stereo Lithography) formatıdır [6]. Şekil 2 'de 3B yazıcı sistemi ve çalışma prensibi görülmektedir.

En yaygın kullanıma sahip olan üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu bir nesnenin sanal olarak katmanlara bölünmesine ve her bir katmanının eritilen ham madde dökülerek üst üste gelecek şekilde basılmasına dayanır. Üç boyutlu baskı teknolojisi 1980 li yıllarda başlamıştır. Buna rağmen 2010 yılından sonra adı daha fazla duyulmaya başlanmış ve günümüzde çok daha yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir. Bunun nedenleri olarak medyada daha fazla yer almaya başlaması, birçok sayıdaki girişimci firmaların bu teknolojiye yatırım yapması, akademik çevrelerin ilgi göstermesi, teknolojinin birçok alanda getirdiği kolaylıklar ve avantajların yanı sıra üretim maliyetlerinin düşmesi gösterilebilir. 2012 yılı itibari ile üç boyutlu yazıcıların market hacmi 2.2 milyar dolara erişmiş ve 2011 yılına göre %29 lük bir artış göstermiştir. Üç boyutlu yazıcılar büyük oranda kendi parçalarını basabilir [7].

Günümüz 3 boyutlu yazıcı teknolojisi birçok farklı teknolojiyi kapsamaktadır. Bu teknolojiler, lazer sinterleme, fused deposition (bileşimli yığma), polimer kurlama gibi sıralanabilir. Yaygın kullanıma ve farklı tasarıma sahip olsa da temelde en çok kullanılan teknoloji "fused deposition modeling" tekniği ile çalışan cihazlardır. Bu teknikte bilgisayarda 3 boyutlu modeli bulunan cisim 2 boyutlu katmanlar halinde yığılarak 3 boyutlu ürün elde edilir. Bu prosesi gerçekleştirmek ise günümüz makine imalat sektöründe 3 eksenli bir CNC nin kontrolünden ibarettir. Kontrol kartı ve CNC ile iletişimde olacak bir yazılım ve malzeme yığma özelliğine sahip bir takımdır. FDM bir yazılım prosesi ile baslar, yazılım STL formatındaki modelleri matematiksel olarak katmanlara ayırır ve bu katmanları üst üste inşa etmek üzere 3 eksenli CNC kontrollü bir cihaza gönderir. Genellikle termoplastik malzemeler kullanılır. Termoplastik malzemeler termoset malzemeler ile karşılaştırıldığında defalarca eritilebildikleri ve belirli sıcaklık aralığında sıvılaşabildikleri için bu teknoloji için oldukça uygun malzemelerdir. Termoplastik malzemenin düzgün bir şekilde yığılabilmesi için erime sıcaklığına ısıtılmış bir nozuldane ekstrude edilmesi gerekmektedir. Bu nozul bilgisayar tarafından kontrol edilerek parça geometrisini simule edecek şekilde hareket ettirilir ve termoplastik malzemenin yığılması ile beraber parça 2 boyutlu katmanlar halinde tablaya yığılır ve üretilmiş olur. Bu proses günümüzde en çok hızlı prototipleme ve 3 boyutlu yazıcı alanlarında kullanılmaktadır. 3D printing, 3 boyutlu üretim, 3B yazıcı olarak da bilinir [8].

Hızlı prototipleme teknolojileri genel olarak karşılaştırılması ve bu karşılaştırma sonrasında elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır [6].

- Uygulamada en yaygın kullanılan teknolojinin SLA olduğu görülmektedir. Bu yöntem yüksek doğrulukta, renkli parçalar üretebilmektedir. Ancak parçalarda çarpılma ve büzülme olabilmektedir. Metal model yapılamamaktadır.
- Mukavemetli parçalar yapılacağına SLS, FDM, EBM ve SDM teknolojileri tercih edilebilir. Özellikle SLS, EBM ve SDM teknolojileri metal model üretimini mümkün kılmaktadır.
- Büyük boyutlu modeller üretileceğinde LOM tercih edilir. Ancak modellerin mekanik özellikleri iyi değildir. MJM ve 3DP yöntemleri basit ve kolay kullanılabilen sistemler olup üretim hızları yüksektir.
- MJM sistemlerinde üretilen modellerin yüzeyleri daha düzgündür. 3DP sistemleri ile renklendirme yapılabilir.
- FDM, 3DP ve Polyjet sistemleri ofis ortamında rahatlıkla kullanılabilir. SGC sistemleri ise kütleli olarak ağır, büyük boyutlu olup ve bakım maliyetleri yüksektir.
- Fonksiyonel model üretiminde SLS, SLA, FDM, EBM ve SDM sistemleri avantaj sağlamaktadır.
- Hareket edebilen ve çok parçadan oluşan modellerin üretiminde FDM ve SGC yöntemleri ön plana çıkmaktadır.



Şekil 3. Bileşimli yığma 3B yazıcı sistemi (FDM) [9]

4. Plastik Ürün Tasarımı

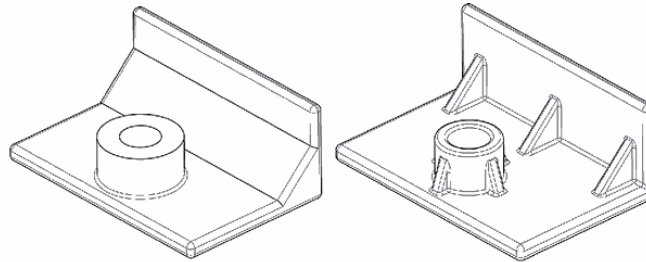
3D yazıcıların yaygınlaşmasıyla beraber, zaten yoğun bir kullanıma sahip plastiklerin farklı endüstriyel alanlarda da kullanımı artmaktadır. Plastikler, sağlık sektöründen uzay ve havacılığa kadar tüm önemli endüstriyel alanlarda uygulama alanı bulmuştur. Farklı imalat yöntemleriyle birlikte kullanılarak istenilen sektörde, istenilen özelliklerde plastik parça imalatı yapılabilmektedir. En yaygın plastik ürün imalat yöntemi enjeksiyon kalıplamayla üretim yöntemidir. Bu yöntemle parça tasarımı ve imalatında uygulanan bazı prensipler bulunmaktadır. Kullanılacak plastik türü, çekme miktarı, toleranslar, ürüne ait fonksiyonel yapı tasarım sırasında göz önünde bulundurulması gerekir.

Parçanın belli bölgelerin mekanik ihtiyacı belli parça kalınlığının kullanılmasını belirler. Parçada kalın kısım soğuma etkinliğinden dolayı engellenmelidir (soğutma süresi üretim oranını sınırlar) çökmeyi, parçada eğilmeyi engellemek için kalın kısmı olmamalıdır. Malzeme akma karakteristikleri plastikten plastiğe değişir. Parça kalınlığı mümkünse parçanın her tarafında sabit olmalıdır, değil ise parçanın kalın kısmından ince kısmına bağlantısı eğimli olmalıdır. Bu olmazsa burada plastik akması ve farklı soğuma oranından dolayı stres oluşur [10].

Plastik ürünlerin tasarımı yapılırken, tasarımcının temel mukavemet ve tasarım bilgisi hâkimiyetinin olması sağlıklı bir ürün ortaya koymak için faydalı olacaktır. Özellikle tasarıma başlamadan önce, ön tasarım aşamasında ürünü çalışma ortamında etkileyecek kuvvetler belirlenmelidir. Bu kuvvetler çekme, basma, eğme, burulma veya bunların değişik varyasyonlardan birleşiminden oluşabilir. Bu kuvvetlerin durumu ve değeri plastik malzemeye kazandırılacak fiziksel özellik ve malzeme seçiminin belirlenmesini sağlayacaktır.

Tablo 1’de mukavemet açısından dikdörtgensel alanlara sahip bazı farklı şekillerin mühendislik hesaplamalarında kullanılan formüller tablosu görülmektedir.

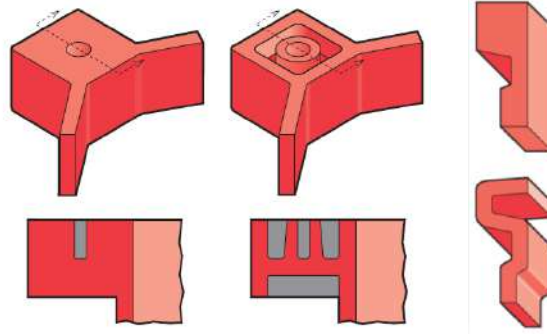
3D yazıcılarda ürün tasarlarırken 3D filament plastik malzeme tasarrufu sağlamak, malzeme iç gerginliğini azaltmak, ürünü hafiflemek gibi durumlarda köşelere sürekli destek koymak yerine, parçalı feder destekleri koyulması genel tasarım ve üretim ekonomisi açısından doğru olacaktır. Şekil 4’ de yanlış ve doğru tasarlanmış aynı fonksiyona sahip iki farklı tasarım görülmektedir. İlk örnekte kullanılan plastik malzeme miktarı diğerinden fazla olmasına rağmen, dayanım ve iç gerilmeler açısından ikinci tasarım daha doğrudur.



Şekil 4. Plastik parça üretiminde destek kullanımı.

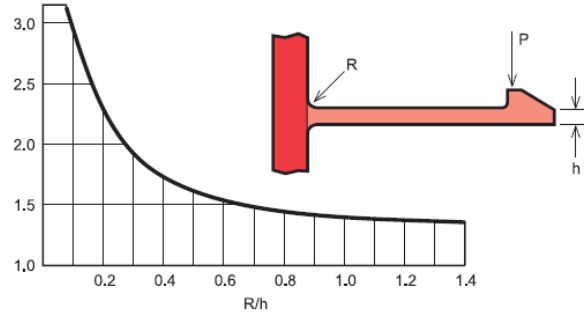
Plastik parçaların tasarım ve üretimini yapan birçok firma kendi tecrübe ve bilgilerini kullanmak üzere müşterilerine katalog ve bilgilendirme broşürleriyle sunmaktadır. Aşağıdaki örnek bazı tasarım faaliyetleri ve plastik güçlendirme teknikleri şekillerle açıklanarak gösterilmiştir [11].

Şekil 5’de plastik parça tasarımı sırasında parça kenar kalınlığının yaklaşık eşitlenerek iç gerilmelerin azaltılması ve malzeme tasarrufu etkisi görülmektedir. Elde edilen eşit kalınlıkta parça, toplamda kullanılacak 3D filament malzeme miktarını azaltmaktadır.



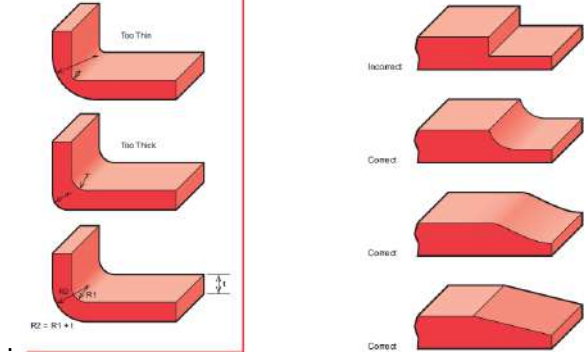
Şekil 5. Kenar kalınlığının eşitlenmesi

Plastik parça tasarımı sırasında ürüne gelen kuvvetler eğilme momenti oluşturacak biçimde etkilemesi durumunda, köşe birleşimi yapan kenarlar arasında yuvarlatma yapılarak gerilmenin dağılımı düzenlenebilir. Şekil 6’da köşe birleşimi sırasında kullanılan yuvarlatma yarıçapı ile parça kalınlığı arasındaki ilişki bir grafik ile gösterilmiştir. R/h oranı arttıkça gerilmenin köşe birleşiminde azaldığı görülmektedir. 3D yazıcılarda da plastik parça üretiminde kenarların bağlantısında köşe yuvarlatması kullanılması malzeme dayanımını artırmaktadır [11].



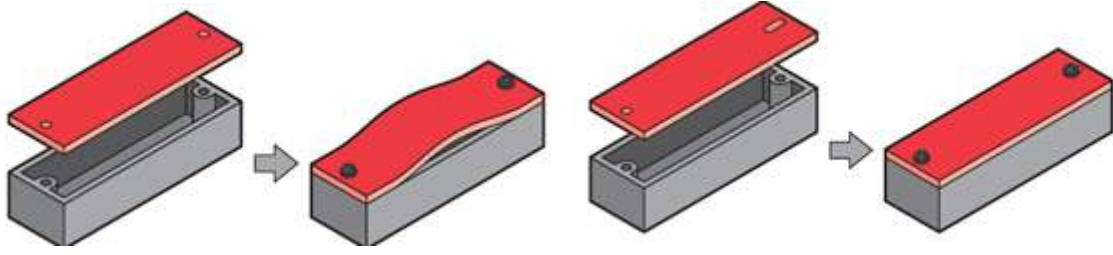
Şekil 6. Eğilme momentine karşı köşe yuvarlatma kullanımı

Şekil 7’de plastik parça tasarımı sırasında iç ve dış köşelere verilmesi gereken köşe yuvarlatma değerleri ve kalınlık inceltme gerektiğinde yapılacak tasarım örnekleri görülmektedir. Köşe yuvarlatma sırasında doğru köşe yuvarlatma için $R2 = R1 + t$ formülü öngörülmüştür.



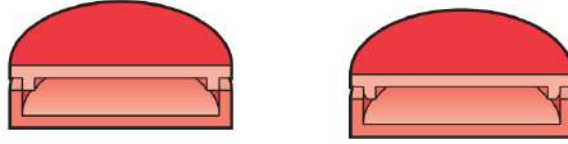
Şekil 7. Köşe yuvarlatma ve kalınlık inceltme tasarımları

Plastik ürünlerin bazı durumlarda başka metal veya malzemelerden yapılmış diğer elemanlarla birleştirilmeleri gerekebilir. Böyle bir durumda malzemeler arasındaki ısı iletim katsayı farklılıkları ve genleşme faktörleri gibi nedenler malzemelerde farklı fiziksel boyut değişimlerinin oluşmasına neden olabilir. Malzemelerden biri diğerine göre daha fazla genişip boyutsal şekil değişimi farklılık gösterecektir. Bu durumun plastik malzemelerde daha az oluşmasını sağlamak amacıyla, plastik parça üzerinde kanallı birleştirme unsuru oluşturarak, fonksiyonel yapıda daha az bozulma sağlanabilir. Bu durum Şekil 8’de gösterilmektedir[11].



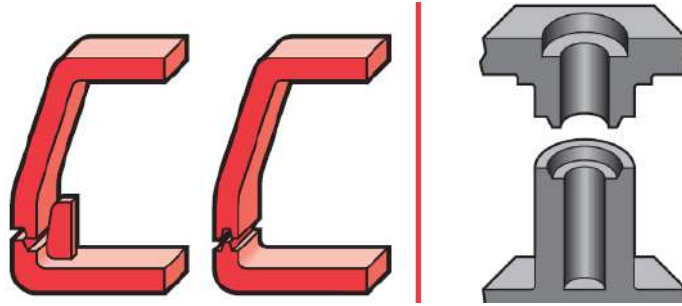
Şekil 8. Isıl genleşmelerde plastik parça tasarımı

Çok parçalı plastik ürün tasarımı yapılırken, montaj aşamasında parçaların istenilen doğrulukta ve kolaylıkla birleştirilmelerini sağlamak için köşelere pah kırılması faydalı olacaktır. Şekil 9'da örnek bir birleştirme üzerinde montajı kolaylaştırma amaçlı pah kırma operasyonu gösterilmiştir.



Şekil 9. Montaja yönelik köşe pah kırma

Şekil 10'da ise yine birden çok parçanın bir araya getirilerek montaj edilmesi durumunda birleştirme yüzeylerinin referans yüzey haline getirilerek, montaj doğruluğunun artırılması ve ek bir parça kullanmadan iki parçanın istenilen doğrulukta birleştirilebilirliği gösterilmektedir.



Şekil 10. Montaj doğruluğu ve kolaylığı için tasarım örnekleri

Yukarıda anlatılan tasarım prensiplerine uyulduğu halde 3D yazıcılardan ve FDM teknolojilerinden kaynaklanan bazı hatalar ise; Tablaya yapışmama, Katman kayması, Aşırı ısıtma, Kılçıklaşma veya sızma olarak özetlenebilir. Şekil 11'de 3D yazıcıdan kaynaklı problemler sonrasında çıkan nihai ürün ve baskı hataları görülmektedir.



Şekil 11. 3D yazıcı hatası ile basılan ürün

5. Sonuç

3D yazıcı teknolojisinde en hızlı ilerleme FDM tip plastik basabilen sistemlerde olmaktadır. Baskı maliyetleri ve 3D yazıcı fiyatlarının düşmesi bu tip yazıcıların ev ortamında dahi kullanılabilir olmasını sağlamıştır. Birçok kullanıcı plastik malzemelerin doğasında olan temel bazı tasarım kurallarını bilmeden, çizim yaparak plastik ürün ortaya çıkarmaya çalışmaktadır.

Bu çalışmada, 3D yazıcılarda plastik ürün basarken, plastik tasarımın güçlendirilmesinde kullanılacak önemli tasarım kriterleri vurgulanmış ve ilgili kriterlere ait doğru çözüm önerileri örneklerle gösterilmiştir. Tasarımının bilgisayar ortamında plastik malzeme özelliklerine uygun tasarlanması durumunda, nihai ürün görev yerinde daha uzun süre ve sorunsuz çalışabilecektir. Bazı durumlarda tasarım mükemmel olsa da, yazıcının donanım ve kullanılan filamentin fiziksel özelliklerine bağlı olarak yazıcı baskı hatalarıyla karşılaşılabilir. Nitelikli ve özellikleri bilinen filament malzeme kullanımı ve sorunsuz donanıma sahip 3D yazıcılar ile tasarım kurallarına uygun çizimler yapılarak sorunsuz ürün elde edilebilir.

6. Kaynaklar

1. <http://www.plasticsindustry.org/industry/history.htm>, 2006.
2. Biron M., Marichal O., "Thermoplastics and Thermoplastic Composites", 2nd Edition, Elsevier Publications, 2013.
3. Bralla J., "Design for Manufacturability Handbook", 1st Edition, Mcgraw-Hill Handbooks, 1998.
4. Akyüz, Ö. F., "Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş" PagevYayınları, İstanbul, 45-89 (1999).
5. Mahindru D.V., Mahendru P., Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future, Global Journal of Computer Science and Technology Graphics & Vision, Volume 13, Issue 4, Online ISSN: 0975-4172, 2013.
6. Çelik İ, Karakoç F., Çakır M., Duysak A., Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 31, Ağustos 2013.
7. Bozdemir M., Silah mekanik sistemleri için 3 boyutlu eğitim modellerinin geliştirilmesi, 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (International Symposium On 3D Printing Technologies), 5-7 Mayıs 2015 İstanbul, syf 91-100
8. <http://www.3byazici.com/3-boyutlu-yazicilar-nasil-calisir.html>, 2016.
9. <http://myobjectify.com/additive>, 2016
10. Zöllner O., Application Technology Information Calculating The Mould-Filling Process For Thin-Walled Injection Mouldings , Munich, 2004.
11. Lanxees, A design guide, Engineering Plastic, (Parts and mold design), USA, 2007

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İÇİN AKILLI BASKI KABİNİ TASARIMI

Doç.Dr. Mustafa BOZDEMİR

Kırıkkale Üniversitesi, KMYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yahşihan/KIRIKKALE
mustafabozdemir@kku.edu.tr

ÖZET

3D yazıcı yada eklemeli imalat işlemi bir dijital tasarım dosyalarından üç boyutlu katı nesneler üretilmesi işlemidir. Üç boyutlu objenin oluşturulmasında eklemeli imalatla mümkün olmaktadır. Eklemeli imalat işleminde bir nesne tamamen üretilene kadar süreç devam edilir. Bu katmanların her biri, nihai nesnenin ince dilimlenmiş yatay kesiti olarak görülebilir. FDM teknolojisi, plastik filament ya da metal telin eritilmiş malzeme haline getirilerek, akışının açılıp kapatabildiği bir ekstrüzyon başlığıyla çalışır. Bu teknoloji en çok iki plastik filament malzeme tipinde kullanılır: ABS (Akrilonitril Butadien Stiren) ve PLA (Polilaktik asit). Plastik malzemenin eritilerek parçaların modellenmesi sırasında ortaya çıkan zararlı gazların insan sağlığına zarar vermemesi, baskı ortamının hava akışının kontrolü, baskı için ideal sıcaklık değerinin sağlanması, yangın ve uzaktan kontrol gibi özellikler profesyonel 3D yazıcı kullanıcıları tarafından arzu edilmektedir.

Bu çalışmada, geliştirilen bir akıllı 3D yazıcı kabinin tasarımı ve kullanıcılar tarafından arzulanan özellikleri tartışılacaktır. Bu kabin içerisine birden çok sayıda yazıcı yerleştirilebilecektir ve ortam şartları, değerleri PLC temelli özel sensörlerle kontrol edilebilecektir. Güvenli ve kontrollü baskı ortamı sağlanmış bu kabinler sayesinde, ürün baskı kalitesi iyileştirilebilir ve baskı ortamını kullanan insanların sağlığı üzerinde oluşabilecek zararlı etkiler önlenilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: FDM teknolojisi, Akıllı 3D Yazıcı Kabini, ABS-PLA Malzemeler

SMART PRINTING CABIN DESIGN FOR 3D PRINTERS

3D printing or additive manufacturing is a process of making three dimensional solid objects from a digital file. The creation of a 3D printed object is achieved using additive processes. In an additive process an object is created by laying down successive layers of material until the object is created. Each of these layers can be seen as a thinly sliced horizontal cross-section of the eventual object. The FDM technology works using a plastic filament or metal wire which is unwound from a coil and supplying material to an extrusion nozzle which can turn the flow on and off. This technology is most widely used with two plastic filament material types: ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) and PLA (Polylactic acid). During the modelling of molten plastic material, harmful gases are emitted. These features are desirable for professional 3D printer users, such as not harming human health, controlling the airflow of the printing environment, providing the ideal temperature for printing, fire and remote control.

This study discusses the design of an intelligent 3D printer cabinet. More than one printer can be installed in this cabinet and the ambient conditions and values can be controlled with special sensors based on PLC. Thanks to these safe and controlled printing media, product print quality can be improved and harmful effects

Keywords: FDM Technology, Smart 3D Printing Cabin, ABS-PLA Materials

1. Üç Boyutlu Yazıcılar

3B Yazıcı bilgisayar üzerinde tasarlanmış ve ya 3 boyutlu olarak taranmış modelleri, bir çok farklı malzeme kullanarak çok hızlı ve ekstra bir kalıp yada fiğstüre ihtiyaç duymadan üreten bir cihazlardır.

Son 10 yılda hızla gelişen katmanlı üretim tekniğini (additive manufacturing) kullanan hızlı prototipleme sistemleri birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yapılan işlemi tanımlamak için “eklemeli üretim” veya “katmanlı üretim” terimlerinin kullanıldığı hızlı prototipleme teknikleri 6 başlık altında sınıflandırılmaktadır [1]. Bu teknikler; Stereolitografi (Stereo Lithography - SLA), Ergiyik Birikimli Modelleme (Fused Deposition Modeling - FDM), Tabakalı Parça İmalatı (Laminated Object Manufacture - LOM), Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS), Katı Tabaka Kırleme (Solid Ground Curing - SGC) ve 3 Boyutlu Püskürtmeli Baskı (3D Ink Jet Printing) dir.

FDM teknolojisi ile çalışan 3B Yazıcılar genellikle ABS ve PLA gibi termoplastik polimer malzemeler kullanmaktadır. Filaman formundaki malzeme yüksek sıcaklığa sahip bir nozül yardımı ile eritilerek katmanlar halinde inşa edilir.

Hızlı prototipleme teknolojisi, imalat uygulamalarında, medikal/dentalimplant yapımında, kavramsal modellemede, doğrudan döküm kalıbı ve parça üretiminde, hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretiminde, mimari uygulamalarda, uzay/otomotiv sanayinde, hızlı kalıp imalatında, eğitim amaçlı her türlü donanımın yapımında ve takı sektörü gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Bir hızlı prototip üretiminde ilk adım, herhangi bir CAD yazılımı ile veya bir lazer ya da optik bir tarayıcı yardımı ile tersine mühendislik yaparak parçanın 3B CAD modelinin oluşturulmasıdır. CAD yazılımları ile hızlı prototipleme makineleri arasında veri transferini sağlamak için bir veri ara yüzüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veri ara yüzü STL (Stereo Lithography) formatıdır [2]. En yaygın kullanıma sahip olan üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu bir nesnenin sanal olarak katmanlara bölünmesine ve her bir katmanının eritilen hammadde dökülerek üst üste gelecek şekilde basılmasına dayanır. Üç boyutlu baskı teknolojisi 1980 li yıllarda başlamıştır. Buna rağmen 2010 yılından sonra adı daha fazla duyulmaya başlanmış ve günümüzde çok daha yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir. Bunun nedenleri olarak medyada daha fazla yer almaya başlaması, birçok sayıdaki girişimci firmaların bu teknolojiye yatırım yapması, akademik çevrelerin ilgi göstermesi, teknolojinin birçok alanda getirdiği kolaylıklar ve avantajların yanı sıra üretim maliyetlerinin düşmesi gösterilebilir. 2012 yılı itibarı ile üç boyutlu yazıcıların market hacmi 2.2 milyar dolara erişmiş ve 2011 yılına göre %29 lük bir artış göstermiştir. Üç boyutlu yazıcılar büyük oranda kendi parçalarını basabilir [3].

Günümüz 3 boyutlu yazıcı teknolojisi birçok farklı teknolojiyi kapsamaktadır. Bu teknolojiler, lazer sinterleme, fused deposition (bileşimli yığma), polimer küreme gibi sıralanabilir. Yaygın kullanıma ve farklı tasarıma sahip olsa da temelde en çok kullanılan teknoloji "fused deposition modeling" tekniği ile çalışan cihazlardır. Bu teknikte bilgisayarda 3 boyutlu modeli bulunan cisim 2 boyutlu katmanlar halinde yığılarak 3 boyutlu ürün elde edilir. Bu prosesi gerçekleştirmek ise günümüz makine imalat sektöründe 3 eksenli bir CNC nin kontrolünden ibarettir. Kontrol kartı ve CNC ile iletişimde olacak bir yazılım ve malzeme yığma özelliğine sahip bir takımdır. FDM bir yazılım prosesi ile baslar, yazılım STL formatındaki modelleri matematiksel olarak katmanlara ayırır ve bu katmanları üst üste inşa etmek üzere 3 eksenli CNC kontrollü bir cihaza gönderir. Genellikle termoplastik malzemeler kullanılır. Termoplastik malzemeler termoset malzemeler ile karşılaştırıldığında defalarca eritilebildikleri ve belirli sıcaklık aralığında sıvılaşabildikleri için bu teknoloji için oldukça uygun malzemelerdir. Termoplastik malzemenin düzgün bir şekilde yığılabilmesi için erime sıcaklığına ısıtılmış bir nozuldane ekstrüde edilmesi gerekmektedir. Bu nozül bilgisayar tarafından kontrol edilerek parça geometrisini simüle edecek şekilde hareket ettirilir ve termoplastik malzemenin yığılması ile beraber parça 2 boyutlu katmanlar halinde tablaya yığılır ve üretilmiş olur. Bu proses günümüzde en çok hızlı prototipleme ve 3 boyutlu yazıcı alanlarında kullanılmaktadır. 3D printing, 3 boyutlu üretim, 3B yazıcı olarak da bilinir [4].

Polimerlerin ısı ile termal indirgenmesi sırasında ortaya bazı dumanlar çıkmaktadır. Alınacak mühendislik önlemleriyle bu gazların üstesinden gelmek mümkündür. Bu konuda iyi bir havalandırma sisteminin varlığı da riskleri ortadan kaldırmak konusunda çok etkilidir. PVC (Polivinil Klorür) ve Teflon (Politetrafloroetilen) aşırı ısıtıldığı zaman ortaya çıkan dumandan ötürü *polimer duman ateşi* hastalığı görülebilmektedir. Bilindiği gibi pekçok endüstride çok çeşitli plastik ürünler kullanılmaktadır. Bu plastik ürünlerin birçoğu kimi zamanlarda termal strese yani aşırı ısıya maruz kalabilmektedir. Boya ile kaplı metal plaka veya tabakaların ya da plastik kaplı boruların kaynak işlemi sırasında yüksek ısıya maruz kalmaları gibi durumlarda *zehirleyici* miktarlarda uçucu gazlar ortaya çıkmaktadır [5].

FDM 3D yazıcılarda kullanılan özellikle ABS ve diğer tip filament malzemelerde termoplastik türevleridir. Kullanılma sırasında ortalama 200 derece civarlarında ısıtılarak eritilirler. Ortaya çıkan koku ve duman kullanıcılar tarafından ciddi şekilde hissedilebilir. Bu nedenle bazı model yazıcılarda, kapalı kabin ve hava filtresiyle temizleme sistemleri yerleştirildiği görülür. Bu tip güvenlik önlemlerinin gelecek zamanlarda üretilen üç boyutlu yazıcılarda artarak devam edeceğini düşünmekteyiz.

2. FDM Filament Plastik Sanayi

Plastik sanayii, günümüzde en önemli sektörlerden biridir. Evlerde kullanılan leğenlerden, kovalardan, fırçalardan, yer döşemelerinden, bina yalıtım kaplamalarından, köpüklerden marketlerde kullanılan naylon poşetlere, su borularından tükenmez kalemle, formika mobilya kaplamalarından pet meşrubat şişelerine, naylon kadın çoraplarından boyalara, teflon tavalardan kaplamalara ve cilalara, kalıplardan film şeritlere, fiberlerden kablolar, ambalaj imalatından banyo perdelerine, araba lastiklerinden etiketlere ve otomobil üretiminden gemi imalatına kadar neredeyse günlük yaşamda kullanılan her nesnede plastik sanayiine ait bir ürüne rastlanmaktadır. Plastikler *polimer malzemelerdir*. Birbirine bağlanmış uzun atom zincirlerinden oluşur. Bu zincirler birbirini yineleyen birçok moleküler birimden oluşmaktadır. *Karbon* ve *hidrojenin* tek başına veya oksijen, azot, kükürt ve klor ile oluşturdukları polimerler plastiklerin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. *Selüloz* (bitkilerin hücre duvarında bulunan yapıtaşı)'un nitratlanmasıyla oluşturulan *Proxilin*'i, *alkol* ve *kafur* ile karış-

tırarak ilk doğal plastiği İngiliz bilim adamı *Alexander Parkes* bulmuştur. *Sentetik* bir polimere dayanan ilk plastik ise *fenol* ve *formaldehit* kullanılarak yapılmış ve adına *bakalit* denilmektedir [5]. Tablo 1’de günümüzde sık kullanılan termoplastik türleri ve teknik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Termoplastik malzemeler ve özellikleri

MALZEME	öztöl ağırlık Mg/m ³	Çekme Muk. mpa	Elastisite Mod mpa	sıcaklık sınırı C
polietilen (düşük öztöl ağırlık)	0,92-0,93	7-17	105-280	80
polietilen (yüksek öztöl ağırlık)	0,95-0,96	20-37	420-1260	100
Polivinilklorür (PVC)	1,50-1,58	40-60	2800-4200	110
polipropilen (pp)	0,90-0,91	50-70	1120-1500	105
polistiren(pps)	1,08-1,10	35-68	2660-3150	85
ABS	1,05-1,07	42-50	-	75
polimetilmetakrilat (PMMA)	1,11-1,20	50-90	2450-3150	125
politetrafloretlen(Teflon)	2,1-2,3	17-28	420-560	120
Naylon 6,6	1,06-1,15	60-100	2000-3500	82
Sellülozikler	1,2-1,3	20-50	-	60

FDM teknolojisiyle çalışan üç boyutlu yazıcılarda ABS ve PLA tip plastiklerden birisi yada her ikisi birden kullanılmaktadır. Bu nedenle bu malzemelerin özelliklerinin iyi bilmesi gereklidir. ABS, Akrilonitril Butadin Stiren, plastik enjeksiyon sektöründe de oldukça sık kullanılan hafif ama sert bir Termoplastik polimerdir. Bir petrol ürünü olan ABS aseton ile çözülebilmektedir. ABS kullanarak print ettiğiniz ürünleri 20 - 80 ° C arasında kullanabilirsiniz. Erime başlangıç sıcaklığı 105 derece olması nedeniyle 80 derece üzerinde yumuşama ve şekil bozulması yaşayabilirsiniz. ABS malzemesi yoğun güneş ışınlarına maruz kalırsa hasar görebilir bu nedenle ciddi bir şekilde güneş altında kalacak ürünlerde parçayı boyamak iyi bir çözümdür. ABS yüksek mukavemet ve darbe direnci nedeniyle tercih edilen bir üründür. ABS malzemeler eritilirken ortaya çıkan zehirli gazlar olumsuz bir yanıdır. Bir diğer negatif özelliği ise 3D yazıcıda kullanım sırasında daha yüksek sıcaklık gerektirmesi nedeni ile daha zorlu bir proses kalibrasyon işlemi gerektirmesidir yani ABS ile güzel bir parça üretmek PLA dan daha zordur. Gene yüksek sıcaklıkta proses edilmesi nedeniyle işlem sırasında büyük parçalarda çarpılma riski oldukça fazladır. Çarpılmayı engellemek için ısıtıcı yazma platformu kullanılması gerekmektedir. Kısaca, ABS daha yüksek mukavemetli ancak çalışması daha zor bir 3D Yazıcı malzemesi dir ancak fiyat olarak PLA ya göre daha uygun olabilmektedir [6].

PLA, Polilaktik Asit ise şu an ki istatistiklere göre en çok kullanılan 3D Yazıcı malzemesi özellikle ev kullanıcılarının bu malzemeyi tercih etmesinin başında daha düşük sıcaklıklarda erimesi nedeni ile kolay çalışılabilir olması vardır. PLA kullanarak bir parçayı 3D Yazıcı ile basmak ABS ye oranla daha kolay. Ayrıca PLA, çarpılma ihtimalinin düşük olması nedeni ile ısıtıcı bir platform gerektirmez. Polilaktik asit ABS den farklı olarak petrolden değil nişasta içeren ürünlerden mısır, şeker kamışı vb. elde edilmektedir. Bu nedenle sağlık açısından ABS den üstündür. Hatta PLA medikal sektöründe implant ve protezlerde sıkça kullanılmaktadır. İnsan vücudu içinde parçalanma süresi 6 ay ile 2 yıl arasında değişmektedir. PLA’ nın negatif özellikler ise ABS den çok daha düşük mukavemete sahiptir. PLA ’nın ısı altındaki dayanımı ABS ye oranla düşüktür. 50 °C üzerinde uygulamalarda kullanmak uygun değildir. Erime sıcaklık aralığının ABS ye oranla daha geniş olması çarpılma ihtimalini azaltırken, malzemenin yavaş sertleşmesi nedeni ile yazım hızı arttırıldığında kötü sonuçlar vermektedir. Yazım hızını arttırabilmek için işlem sırasında parça bir fan yardımı ile soğutulur [6].

3. Plastik Sektöründe Hastalık Ve Tehlikeler

Fiberglas yapımında kullanılan doymamış polyester reçineleri, kimyasal açıdan reaktif olan fenol formaldehit reçineleri ve üretanlar gibi plastik sektöründe kullanılan sıvı ve tozlardan ötürü önemli bir *kontakt dermatit* riski söz konusudur. Polimerlerin ısı ile termal indirgenmesi sırasında ortaya dumanlar çıkabilir. Ancak mühendislik önlemleri bu konuyu üstesinden gelmek konusunda çok önemli olabilir. Bu konuda iyi bir havalandırma sisteminin varlığı da riskleri ortadan kaldırmak konusunda çok etkilidir. PVC (PoliVinil Klorür) ve Teflon (Politetrafloroetilen) aşırı ısıtıldığı zaman ortaya çıkan dumandan ötürü polimer duman ateşi hastalığı görülebilir. Bilindiği gibi pekçok endüstride çok çeşitli plastik ürünler kullanılmaktadır. Bu plastik ürünlerin birçoğu

kimi zamanlarda termal strese yani aşırı ısıya sunuk (maruz) kalabilmektedir. Boya ile kaplı metal plaka veya tabakaların ya da plastik kaplı boruların kaynak işlemi sırasında yüksek ısıya sunuk kalmaları gibi durumlar da zehirleyici miktarlarda uçucu gazlar ortaya çıkmaktadır. Poliüretan reçinelerle kullanılan izosiyanatların zehirli dumanları kimyasal pnömonite ve ciddi astım rahatsızlıklarına neden olur. Bir kere bu dumanlara duyarlı hale gelen kişi bundan sonra iş değiştirmek zorundadır. Aynı tehlike formaldehit reçineleri ile çalışırken de mevcuttur. Fiberglas üretilirken de oldukça yüksek miktarlarda *stiren buharı* kullanılmaktadır. Bu da yukarıda sayılan hastalıklara neden olmaktadır. Klorlanmış Hidrokarbonlar gibi *solvanlar* sektörde sıkça kullanılmaktadır. Bunların solunması da ciddi tehlikelere yol açabilir ki bunların içinden önemli olanlarından birisi narkoz*dur. Aşağıdaki Tablo 2’de bazı plastikleri ve ısıya sunuk kaldıklarında ortaya çıkardıkları uçucu gazları sıralamaktadır [5].

Tablo 2. Isıya maruz kalan plastiklerde uçucu gazlar

Plastikler	Ortaya çıkan uçucu maddeler
Polyxmetilen	Formaldehit
Kloropren kauçuk	Hidrojen klorür
Polistiren	Stiren
Polikarbonat	Fenol
PVC	Hidrojen Klorür
Poliamid 66	Siklopentanon
Teflon	Perflorine doymamış hidrokarbonlar
Polietilen	Doymamış alifatik hidrokarbonlar
Poliüretan	Hidrojen Siyanür

FDM teknolojisine sahip üç boyutlu yazıcılarda kullanılan ABS malzemesi, mühendislik çıktıları almak konusunda başarılı olmaktadır. PLA tür malzemelere göre daha yüksek erime sıcaklığı ve dayanım değerlerinin yüksekliği ABS yi en fazla kullanılan FDM üç boyutlu yazıcı filament malzemesi konumuna getirmiştir.

ABS nin üstün mühendislik malzemesi olması yanında, en can sıkıcı özelliği ise yüksek sıcaklığa maruz kaldığında HCN gazı çıkarmasıdır. Bu gaz az miktarda salınsa da oldukça zehirli bir gazdır. Hatta ikinci dünya savaşı sırasında gaz odalarında bu gaz kullanılmıştır. Bu nedenle 3D Yazıcılar ile ABS kullanırken ortamı havalandırmakta fayda vardır. Katı halde ürün olarak herhangi bir zararı bulunmazken 230-250 derecede 3D Yazıcı ile eritilirken HCN gazı açığa çıkabilmektedir [6].

Hidrosiyonik asit (HCN), inorganik bir bileşiktir. Gübrelemede, tekstil boya sanayinde, dezenfektan madde yapımında, fotoğrafçılıkta, gümüş temizlemede (gaz olarak); gemilerin, evlerin ve depoların zararlı etkenlerden kurtarılmasında kullanılan etkili bir bileşiktir. Hidrosiyonik asit, 25 °C’de kaynayan renksiz acıbadem kokusunda bir sıvıdır. Buharı havadan hafiftir ve difüzyon kabiliyeti olduğundan, tavan ve duvarlardan geçebilir. Siyanlı hidrojenin, aldehid ve ketonlarla yaptığı siyanhidrin bileşikler, bitkiler aleminde glukozit halinde bulunurlar. Organizmaya siyanür iyonu verilir ve siyanür zehirlenmelerine yol açarlar. 1 litre havada 1 mg HCN birkaç dakikada öldürebilir. Yetişkinde 50–60 mg HCN, 50-60 g şeftali çekirdeği, 50 g acıbadem veya acıbadem suyu (%0,1 HCN) yeterli öldürücü doz olarak bilinmektedir. Siyanür şiddetli biçimde oksijenli metabolizmayı bozar. Sitokrom oksidazdan, moleküler oksijen elektron taşıması bloke olur, çevresel oksijen gerilimi artar ve oksijenin hemoglobin tarafından bırakılması azalır. Aynı zamanda siyanür genellikle hızlı nefes alıp verme ile sonuçlanan atardamardaki kimyasal reseptörler daha fazla harekete geçer. Hasta merkezi solunum yetmezliğinden ölür. Bu HCN’in gaz olarak alınmasıyla gerçekleşir. Ağız yoluyla alındığında ise HCN ölümcül hale gelebilir. Ancak siyanür bakteri içeren glukosidaz tarafından bağırsaklar yoluyla atılabilir [7].

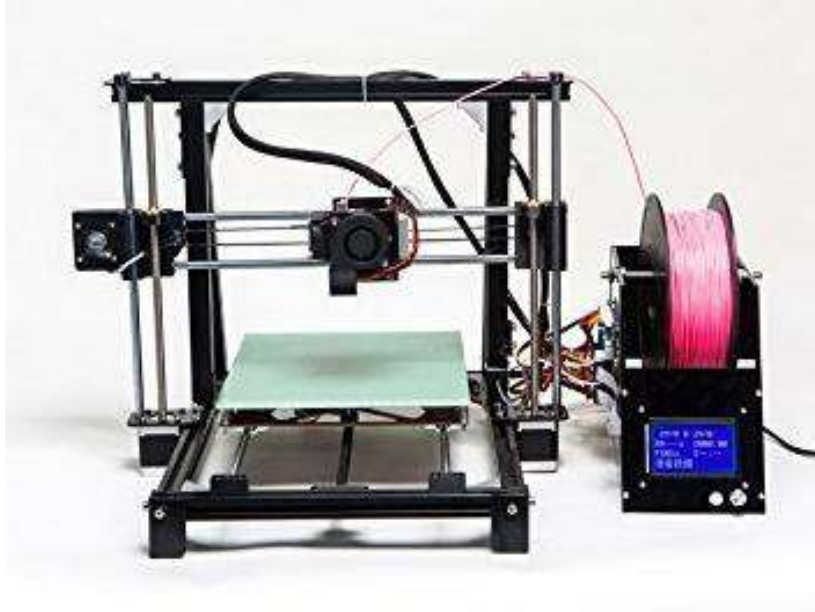
Plastik sanayinde değişik iş alanlarında bulunan kimyasal, gaz, duman ve kokulara nedeniyle işçilerin karşılaşabileceği özel hastalık ve tehlikeler bulunmaktadır. Bu tehlikeler şu şekilde özetlenebilir [5]:

Plastik sanayi, kimyasal ve yanıcı ağırlıklı malzemeler ile çalışılan bir sektör olduğundan yangın ve patlama tehlikesini her an bulundurmaktadır. Çalışma ortamında bulunacak duman, gaz ve kokular değişik hastalıklara neden olabilir. Amputasyon bir uzvun (kol veya bacağını) bir kısmını veya tamamını, tıbbi nedenlerden dolayı kesilmesine veya kopmasına denir. Damar hastalıkları, trafik kazaları, iş kazaları, tümörler, mikrobik hastalıklar, doğumsal anomaliler, yanıklar ve şeker hastalığına bağlı, daralmış olan damarlarda kan dolaşımı azalır. Beslenemeyen, oksijenlenemeyen doku giderek solar, soğur; şiddetli ağrılara neden olur. Astım, so-

lunum yollarının ataklar halinde gelen tıkanmaları ile kendini gösteren kronik bir hastalıdır. Astımda solunum yollarının şişmesi ve tıkaçların oluşması sonucu havanın akciğerlere girip çıkması engellenir. Hastalar ataklar arasında kendilerini iyi hissederler. Ataklar sırasında öksürük, göğüste sıkışma hissi, solunumda hızlanma, hırıltı ve nefes darlığı olur. Astımlı hastalar çevredeki birçok maddeye astımlı olmayanlara göre daha duyarlıdır. Bu uyarılar hastalarda hırıltı ve öksürüğe yol açar. Egzama derinin iltihabıdır ve çoğu zaman kaşıntılı seyreder. Kimyasal tahriş edicilerin solunması sonucunda oluşan akciğer iltihaplanmasına Kimyasal Pnömoni denir. Anestezi, duyarsızlık, hissizlik duyuların geçici olarak kalkması anlamına gelmektedir. Narcoz, anestezi ile eş anlamlı gibi görülüyor olsa da, tam bilinç kaybı olmadan, duyarlılığın ileri derecede ortadan kalkmasıyla oluşan belirgin uyuşma halidir. Polimer duman ateşi, polimerler yandığı zaman ortaya çıkan koku ve dumana sunuk kalma sonucunda görülen ve metal duman ateşi ile benzerlik gösteren bir hastalıktır. Yanık, ısı, ışın, elektrik veya kimyasal maddelere sunuk kalma sonucunda deri ve derialtı dokularda meydana gelen yaralanmadır[6,8].

4. FDM Yazıcı Kabinleri

FDM tip yazıcılar için tasarlanmış birçok farklı modeller bulunur. Baskı malzemeleri, baskı alanı kapasitesi, fiyatı vb. kriterler yazıcıların satış fiyatlarının belirlenmesinde önemlidir. Plastik eritilirken baskı yapmaya dayanan FDM teknolojisi, baskı yapılırken ortama gaz, duman ve koku salınımını da yanında getirmektedir. Üç boyutlu yazıcı teknolojisinin sanayide kendisine geniş yer bulması ve fiyatlarının uygunluğu yanında getirdiği bu tip olumsuz etkilerin gözden kaçmasına neden olmaktadır. İlk çıkan FDM yazıcı modelleri tamamen etrafı açık, baskı ortamı çevresel ortamlara her türlü zararlı gazı iletecek şekilde yapılmıştır. Şekil 1’ de açık kabin olarak tasarlanmış bir yazıcı görülmektedir.



Şekil 1. Kabinsiz FDM 3D yazıcı (Açık kabin)

FDM teknolojisine sahip bu tip üç boyutlu yazıcılarda kullanılan ABS malzemesi, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında HCN gazı çıkarmaktadır. HCN gazı oldukça zehirli bir gazdır. Katı halde ürün olarak herhangi bir zararı bulunmazken 230-250 derecede 3D Yazıcı ile eritilirken HCN gazı açığa çıkar. Bu nedenle açık kabinli 3D yazıcılar ile ABS filament kullanırken ortamı havalandırmak gereklidir. Amatör imal edilen 3D yazıcılar genellikle ucuz olmasından dolayı, açık kabin imal edilir.

Şekil 2’de yarı açık kabine sahip FDM üç boyutlu yazıcı örnekleri görülmektedir. Yarı açık olan bu kabin sistemine sahip yazıcıda, yan yüzeyler ve ön kapak kapatıldığında zemin dahil 5 yüzeyi kapalı hale gelmektedir.



Şekil 2. Yarı açık kabinli FDM 3D yazıcılar

Yarı açık kabinli FDM 3D yazıcı tasarlanmanın amacı, ortamdaki sıcaklık değişimlerinin baskı ortamına olumsuz etkisini azaltmaktır. Extruderin bulunduğu üst yüzeyin açık olması nedeniyle tam kapalı bir baskı modeli yapı yoktur. Bu nedenle çalışma ortamına gaz, duman ve koku salınımı devam etmektedir. Bu modelin bulunduğu 3D yazıcılarında ortamın havalandırılması gereksinimi vardır.



Şekil 3. Kapalı kabinli FDM 3D yazıcı [9]

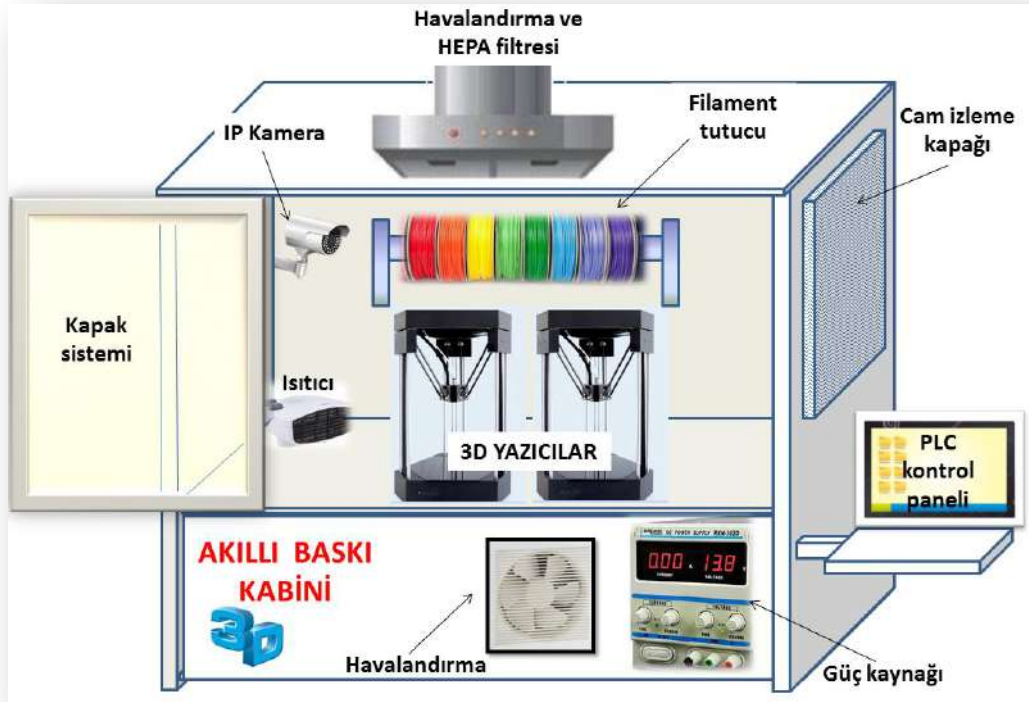
Kapalı kabine sahip bir yazıcının resmi Şekil 3'de görülmektedir. Bu tip kabinlerde ortama açık hiçbir yüzey bulunmamaktadır. Konveksiyonel ısı sirkülasyon özelliği ve kapalı iç ortam sayesinde 3D baskı stabilitesi korunmaktadır. Isı sirkülasyon sistemi tabla ısısını ve nozzle sıcaklığını kullanarak iç ortam ısısını sürekli dengede tutmaktadır. Bu tip yazıcılara yerleştirilen hava filtre sistemleri nano partikülleri ve kokuları giderecek, bulunduğu yerdeki çevre sağlığını en az tehlikeye sokmaktadır. Bazı model FDM 3D yazıcıların tam kapalı kabinli modellerinde 3 lü sistem filtreleme özellikleri bulunmaktadır. Hepa Filtre (0.3µm mikro toz, 99.97 % Toz), Karbon Filtre (Toksik gaz filtreleme fonksiyonu) ve Purafil Catalyst (Organik bileşenler için filtreleme fonksiyonu) filtreleri çevreye zararlı madde salınımını durdurmaktadır. Ayrıca, ABS parça basımı sırasında karşılaşılabilecek sıcaklık değişimi temelli biçimsel bozulmalar bu tip cihazlarda daha az görülmektedir.

5. Harici Yazıcı Kabin Tasarımı

FDM 3D yazıcı modellerinde hızlı bir teknolojik gelişme devam etmektedir. Baskı kalitesi, boyutları, malzeme çeşitliliği, renkli-dokulu baskı, kompozit malzeme kullanımı, çevreye en az zarar verme vb., konular 3D yazıcıların araştırma konularından bazılarını oluşturmaktadır.

Ancak şu ana kadar geçen sürede çok sayıda açık ve yarı açık model FDM 3D yazıcı satılmış ve kullanımları sürmektedir. Daha onlarca yıl boyunca da belki bu tip yazıcıların imalatı ve kullanılacağı devam edecektir. O halde mevcut bu tip yazıcılarda olabilecek olumsuz sağlık sorunlarının önüne geçmek amacıyla, harici 3D yazıcı baskı kabinleri düşünülmelidir.

Bu kabinler ihtiyaç duyulan değişik boyutlarda üretilerek, kabinsiz ve yarı kabinli 3D yazıcılara tam kapalı kabin görevi sunabilir. Şekil 4'de bir tam kapalı ve akıllı sistem özelliklere sahip olması düşünülen kabinin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 4. Akıllı sistem harici 3D yazıcı kabini şematik tasarımı

Akıllı kabin sistemi ısı sensörleri sayesinde kabin içi ısıyı kontrol edebilir. Filtreli hava kontrol sistemiyle kabin içinde oluşan zararlı gaz ve koku dışarı atılabilmektedir. Kabin içine yerleştirilen ısı sensörü, HCN sensörü, hareket sensörü gibi kontrol elemanlarıyla kabin için ortam şartları kontrol edilebilir ve ölçümlenebilir hale gelebilir. Bu nitelikteki bir harici kabinin kullanıcıya sağlayacağı çok sayıda fayda bulunmaktadır. Bu faydalar şu şekilde özetlenebilir.

- Baskı ortamında ısıнын korunması ve sirkülasyonu
- Baskı ortamını yabancı dış hava şartlarından korunması
- Baskı ortamının kamera ile uzaktan izlenmesi
- Baskı ortamı sıcaklık ve nem değerlerinin kontrolü
- Baskı ortamında HCN gaz varlığının kontrolü
- Baskı zamanlama ve enerji sisteminin otomatik kapatılması
- Filtreler kullanılarak zararlı gaz, duman ve kokunun çevreden uzaklaştırılması

6. Sonuç

Günümüz teknolojisinde 3D Printerlar birçok farklı malzemeleri kullanarak üretim yapabilmektedir. En popüler yöntemlerden bir tanesi Eriyik Yığma(FDM) Modellemidir. Bu yöntemde ısı ile şekillendirilebilen termoplastik polimer malzemeler (PLA, ABS) kullanılmaktadır. Plastik malzemeler grubunda en yüksek malzeme mukavemetine bu teknoloji ile ulaşılmaktadır. Bu yazıcıların yeni bazı modellerinde kapalı bir kabin içerisinde sıcaklık, hava akımı ve filtreli hava temizleme gibi özellikler bulunabilmektedir. Ancak çoğu 3D yazıcı modelinde bu özellikler bulunmamaktadır. Plastik malzemenin eritilerek parçaların modellenmesi sırasında ortaya çıkan zararlı gazların insan sağlığına zarar vermemesi, baskı ortamının hava akışının kontrolü, baskı için ideal sıcaklık değerinin sağlanması, yangın ve uzaktan kontrol gibi özellikler profesyonel 3D yazıcı kullanıcıları tarafından arzu edilmektedir.

Bu çalışmada, mevcut FDM 3D yazıcılarda kullanılan kabin yapıları incelenmiştir. Açık, yarı açık ve kapalı olarak sınıflandırılan bu modellerini insan sağlığı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Açık ve yarı açık kabinli FDM yazıcıların günümüzde okul, büro, fabrika vb. yerlerde sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Aynı ortamda bulunan insanların sağlığının korunması için bu tip harici kabin tasarımının yapılması önemlidir. Akıllı harici kabinlerin içerisine birden çok sayıda yazıcı yerleştirilebilecektir ve ortam şartları ve değerleri PLC temelli özel sensörlerle kontrol edilebilecektir. Güvenli ve kontrollü baskı ortamı sağlanmış bu kabinler sayesinde, ürün baskı kalitesi iyileştirilebilir ve baskı ortamını kullanan insanların sağlığı üzerinde oluşabilecek zararlı etkiler önlenilebilecektir.

Kaynaklar

1. Mahindru D.V., Mahendru P., Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future, Global Journal of Computer Science and Technology Graphics & Vision, Volume 13, Issue 4, Online ISSN: 0975-4172, 2013.
2. Çelik İ, Karakoç F., Çakır M., Duysak A., Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 31, Ağustos 2013.
3. Bozdemir M., Silah mekanik sistemleri için 3 boyutlu eğitim modellerinin geliştirilmesi, 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (International Symposium On 3D Printing Technologies), 5-7 Mayıs 2015 İstanbul, syf 91-100
4. <http://www.3byazici.com/3-boyutlu-yazicilar-nasil-calisir.html>, 2016.
5. <http://www.isguvenligi.net/iskollari-ve-is-guvenligi/plastik-endustrisinde-is-sagligi-ve-guvenligi/>
6. <http://www.3byazici.com/2012/12/3d-yazicida-abs-mi-pla-mi-kullanmali.html>
7. https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrosiyanik_asit
8. Britton, T.J., Law, P.K. *Examples of Chemical Processing Operations*, McCann, Michael, Stellman, Jeanne M., Editör, *Encyclopedia of Occupational Health and Safety*, Jeanne Mager Stellman, Editör. Uluslararası Çalışma Örgütü, Cenevre. © 2011.
9. <https://www.teknodizayn.com/cubicon-single-plus-3d-printer---3d-yaz%C4%B1c%C4%B1.html>

KARTEZYEN 3B YAZICILARDA LEHİM YAZDIRMA

¹Ecem Tuğçe ÖZBEK, ²Mustafa AYDIN, ³Begüm ERTÜRK, ⁴Hatice EVLEN

¹Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü Karabük, TÜRKİYE
m.aydin@karabuk.edu.tr

⁴Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Karabük TÜRKİYE hak-
gul@karabuk.edu.tr

ÖZET

3B yazıcılar tasarım ve üretim aşamalarını birleştirerek kişiye özgün tasarımların hızlı ve kolay bir şekilde gerçekleştirilmesini sağladıklarından günümüzde hemen hemen her alanda kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada elektronik devrelerde lehimleme işlemi için kartezyen 3B yazıcı prototipi yapılmıştır. Yazıcının eni 540 mm, boyu 540 mm olup, baskı alanı 300x300 mm ahşap üstüne ayna monteli tabla şeklinde tasarlanarak montajı yapılmıştır. Sistemde içi teflonlu extruder kullanılarak yazdırılacak lehimin cinsine göre 260 ılık termistörde gereken erime sıcaklığı verilmiş ve erimesi daha sonra baskısı sağlanmıştır. Sistemde Arduinio mega kontrol kartı ve yazılımı kullanılmıştır. Cihaz bilgisayara kurulan Reprap full graphics akıllı kontrol birimiyle kontrol edilmektedir. Ayrıca SolidWorks programında çıktı alınacak parçaların modellemesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kartezyen 3B yazıcı, lehim yazdırma, arduino mega

ABSTRACT

Since 3D printers combine design and production stages to enable customized designs to be done quickly and easily, virtually every field is used today. In this study, a Cartesian 3D printer prototype was made for soldering in electronic circuits. The width of the printer is 540 mm, the length is 540 mm and the printing area is designed as 300x300 mm wooden mirror mounted tray. In the system, the required melting temperature was given to 260 thermistors according to the type of solder to be printed by using teflon extruder and the printing was provided after printing. Arduinio mega control card and software are used in the system. The device is controlled by Reprap full graphics intelligent control unit installed on the computer. In addition, modeling of the parts to be output in the SolidWorks program is done.

Keywords: Cartesian 3D printer, solder printing, Arduino mega

1.Giriş

3 boyutlu yazıcı teknolojileri son yıllarda oldukça yaygınlaşarak hemen hemen her alanda yerini almaya başlamıştır. 3B yazıcılar günümüzde biyomedikal uygulamalar, inşaat ve yapı, moda ve takı gibi birçok alanda endüstriyel ve bireysel olarak kullanılmaktadır. Bireysel ve küçük ölçekli yazıcılarda genellikle FDM (Fused Deposition Modeling) tekniği kullanılmaktadır. Bu yöntemde plastik şerit, eritici kafaya itilerek akışkanlık kazanmakta ve nozül ucundan akan plastik madde anında katılarak katmanlar halinde istenilen model inşa edilmektedir. Bu yöntemde genellikle plastik içeriği zengin olan malzemeler kullanılmaktadır [1-3]. Fakat günümüzde 3 boyutlu yazıcı teknolojisinde seramik, ahşap, beton ve metal gibi birçok farklı materyallerin kullanılabilirliğine yönelik araştırmalar yoğunlaşmıştır.

Önümüzdeki 10 yılda 3D yazıcılardan çıkmış elektronik sistemler ve farklı malzemelerin birleştirildiği ürünlerin (yazma-basma-üretim teknolojileri) görüleceği söylenmektedir. 3D baskı üretim tekniği, 2030'a kadar kalıplama, dövme ve talaşlı imalat gibi geleneksel üretim yöntemlerinin yerini alabileceği öngörülmektedir [4].

HRL laboratuvarı araştırmacıları ön-seramik polimer denilen, ısıtıldığında seramiğe dönüşen bir madde geliştirmişlerdir. Hızlı prototipleme amacıyla kullanılan 3D yazıcı taktığı stereolitografi ile uyumlu olan bu malzeme, diğer malzemelere göre 100 ile 1000 kat arasında daha hızlı yazma işlemi yapılmasına imkan sağlıyor. Yüksek detaydaki objelerin yazdırılması, morötesi ışık ve desenli maskeler ile kolaylaşıyor. Uçak kanat panelleri, yörünge uzay araçlarının iç sistem parçaları seramik malzemelerden oluşuyor. Ayrıca HRL ekibinin bulduğu bu seramik, normalden 10 kat daha dayanıklıdır [5].

Almanya Burg-Halle Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada 3B yazıcıda çikolata basımı denemiştir. Derin dondurucuda soğuttukları bir seramik karo üzerine akışkan hale gelmiş sıcak çikolatayı yazdırarak hemen soğumasını sağlamışlardır. Ancak bu soğutma tekniğinin büyük boyutlu nesneleri bastırmak için yeterli olmadığını ve bir santimetre yükseklikten sonraki katmanlarda sıvı çikolatanın yeterince katılaşmadığını ifade etmişlerdir [6].

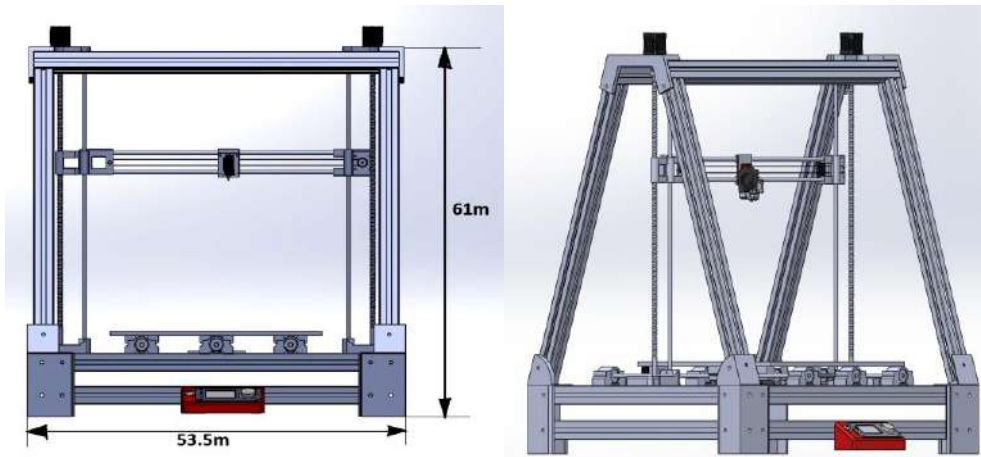
Çalışkan vd. yaptıkları çalışmada kartezyen tip seramik parça yazdıran 3B yazıcı tasarımı ve kurulumunu gerçekleştirmişlerdir. 3B yazıcıda hammadde olarak farklı kil ve seramik malzemeler kullanmışlar ve FDM yöntemi ile yazdırdıkları parçaları kıyaslayarak yazıcının performansı incelenmiştir. Üretimi yapılan yazıcının seramik malzemelerin yazdırılmasında kullanılabilir olduğu belirlenmiştir [7].

Elektronik devrelerde elemanların karta montajlanmasında kullanılan lehim malzemesi 3B yazıcılarda çok fazla uygulaması olmayan bir malzeme olup lehim ile yazdırma çalışmalarının henüz deneme aşamasında olduğu bilinmektedir. Mr. Bam tarafından yapılan çalışmada 3B yazıcıda lehim malzemesi kullanılarak parça üretimi denenmiştir. Kullandığı lehim cinsi özel bir lehim olup 3 mm çapına sahip ve içeriğinde % 95.8 kalay, % 4 bakır ve % 0.2 gümüş bulunmaktadır [8].

2. Materyal ve Yöntem

Lehim yazdırmak için tasarlanan 3B yazıcı mekanik sistem, elektronik kontrol sistemi ve kontrol yazılımı olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır.

Mekanik sistem kısmında; 20x20x500 sigma profilden oluşan kartezyen bağlantı parçaları, M5, M3 ve M4 cıvatalarla bağlantısı yapılarak ana gövde oluşturulmuştur. Ana gövde üzerinde 5 adet nema17 step motor, 2 adet kasnak eklentisi, 2 esnek kaplin, 2 adet gijon mil, 1 adet ısıtıcı tabla, 3 adet fan ve 1 adet extruder bulunmaktadır. Elektronik kontrol sistemi kısmında Arduino mega 2560, cnc shield 1.4 bağlantısı, 5 adet step motor sürücü vardır. Kontrol yazılımı olarak 3B yazıcı kontrol eden arduino için hazırlanmış Marlin 3B yazıcı yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 9. 3B Kartezyen lehim yazıcı ölçüleri

Şekil 2’de sistemde kullanılan adım motoru görülmektedir.



Şekil 10. Nema 17 adım motoru

Çizelge 1’ de sistemde kullanılan Nema 17 adım motoru teknik özellikleri verilmiştir.

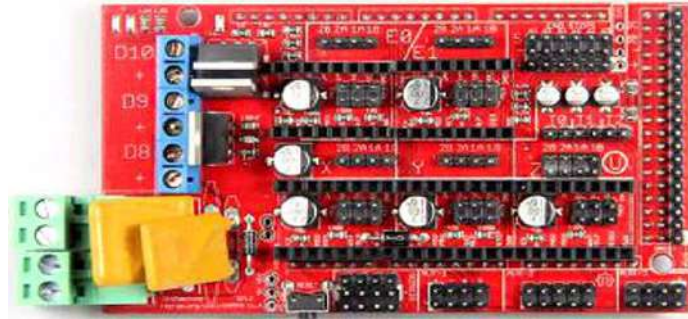
Çizelge 2. Nema 17 adım motoru özellikleri [9]

NEMA-17 Bipolar 4 telli
Basamak açısı: 1.8 derece
Holding Torku: 4000g-cm@1.2 Amps
Adım adımı: 200 Adım
Açı: 1.8 derece
Nominal Gerilim: 2V
Faz Dayanımı: 1.7 ohm
Nominal Akım: 1.2A
Faz İndüktansı: 4,5 mH
Tutma torku: 0.4 N.M
Kurşun Sayısı: 4
Boyutlar eksen: Ø4.5 x 20 mm
Boyutlar: 42 x 42 x 40 mm
Ağırlık: 250 g

Şekil 3’te sistemde kullanılan Arduino kontrol kartı görülmektedir. Arduino kontrol kartı 54 dijital giriş/çıkış pinleri (15 adedi PWM çıkışı olarak kullanılabilir), 16 analog girişi, 4 UARTs, 16 MHz kristal osilatör, USB bağlantısı, bir güç girişi, bir ICSP başlığı ve bir reset düğmesi bulunmaktadır [10]. Arduino üzerine Şekil 4 ‘te görülen RAMPS kartı yerleştirilerek adım motoru sürücülerini bağlantısı yapılmıştır.

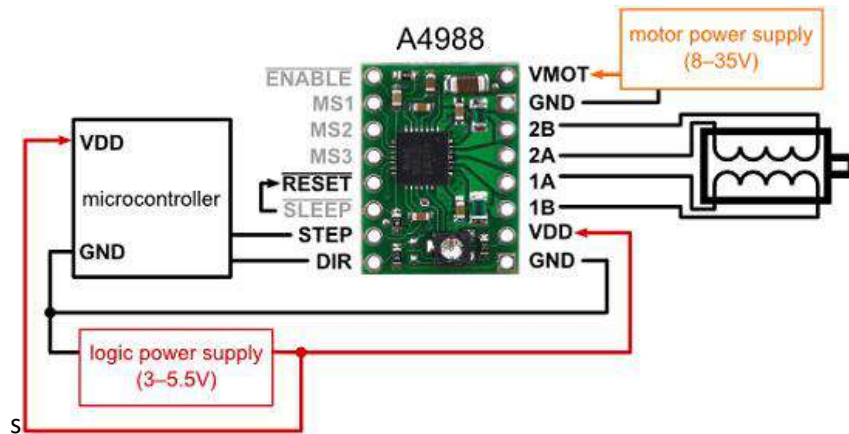


Şekil 11. ARDUINO MEGA 2560 R3 kontrol kartı



Şekil 12. RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) 1.4 kartı

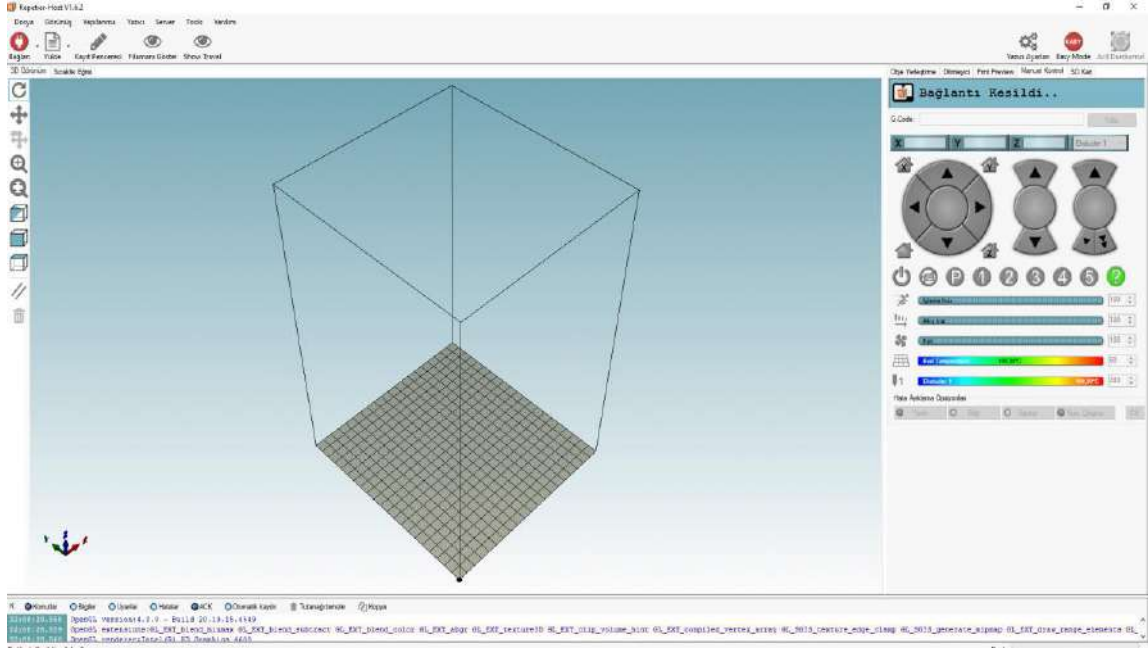
Adım motorlarını sürmek için Şekil 5'te görülen A4988 adım motor sürücü kartı kullanılmıştır. A4988 adım motor sürücüsü bipolar adım motoru sürücüsüdür ve ayarlanabilir akım limitleyicisi, aşırı akım ve sıcaklık koruması, beş farklı mikro adım çözünürlüğü bulunmaktadır [11].



Şekil 13. A4988 adım motoru sürücüsü

Kontrol Yazılımı ve Ayarları

Modelin yazıcıya aktarılması ve yazıcının kontrolü için Marlin yazılımı kullanılmakta ve Repetier host ile kontrol sağlanmaktadır.



Şekil 14. Marlin programı ara yüzü

Marlin programı 3 boyutlu yazıcı teknolojisini kullanmaya yeni başlayanların tercih ettiği bir yazılımdır. Bunun nedeni Repetier host programının kullanımının ve kalibrasyonun ve ayarların yapılmasının kolay olmasından kaynaklanmaktadır. Ücretsiz olarak edinilebilen bir programdır.

Repetier host STL formatını kabul etmektedir. Bu programda işlem hızı ayarı, tabla ısısının ayarı, ekstruder ısısının ve fan ayarı gibi birçok sistem gereçlerinin ayarları kolay olarak kontrol edilebilmektedir.

3. Deneysel Çalışmalar

Şekil 6'da Kartezyen 3B lehim yazıcı görülmektedir. Yazıcı hammadde olarak lehim kullanılarak çalışması Şekil 7'de görülmektedir



Şekil 15. Kartezyen 3B lehim yazıcı



Şekil 16. Kartezyen 3B lehim yazıcı ile lehim yazdırma işlemi

4. Sonuç

Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcı sektörünün genişliği göz önüne alınarak farklı bir malzeme olan lehim kullanılarak extruder başlığı değiştirilmeden parça üretimi denenmiştir. Yazıcı hammaddesi olarak lehimin kullanılabilirliği incelenmiştir. Lehim yazdırma işlemi gerçekleştirilerek elektronik baskı devre hazırlama işleminde 3B yazıcıların kullanılabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Kruth, J. P., Leu, M. C. And Nakagawa, T., "Progress in additive manufacturing and rapid prototyping", Annals of theCirp, 47 (2): 525-540 (1998).
- [2] Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M.K., and Duysak, A., Rapid prototyping Technologies and application areas, Dpü Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 31, sayfa53-70, Ağustos 2013
- [3] Mike Ashbyand Kara Johnson: Materialsand Design, Elsevier, London, 2002, p:256,257
- [4] Yılmaz, F., Arar, M. E., & Koç, E. 3D Baskı İle Hızlı Prototip Ve Son Ürün Üretimi. http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi168/d168_3540.pdf
- [5] <http://shiftdelete.net/3d-yazicida-seramik-devri-67265>
- [6] Tuesday 4 February 2014. CHOCOLATE 3D PRINTING. http://www.keep-art.co.uk/journal_14.html
- [7] Çalışkan, A., Evlen, H. Ve Çetinkaya, K., (2016). Üç Boyutlu Seramik Yazıcısı Tasarımı Ve Prototip İmalatı, 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (3B-BTS2016) 5-7 Mayıs, İstanbul.
- [8] <http://diy3dprinting.blogspot.com.tr/2013/11/3d-printing-with-solder-experiments-by.html>
- [9] NEMA Motor - RepRapWiki (n.d.). Available: http://reprap.org/wiki/NEMA_Motor. Son Erişim Tarihi: 9 Mart 2017
- [10] Arduino Board Mega ADK (n.d.). Retrieved July 1, 2013, from <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMegaADK>.
- [11] A4988 Adımper Motor Driver Carrier (n.d.). Retrieved April 15, 2014 from www.pololu.com/product/1182.

3D Printing for Tissue Engineering Applications

Askican HACIOGLU ¹, Hakan YILMAZER ², Cem Bulent USTUNDAG ¹

¹ Yildiz Technical University, Department of Bioengineering, Istanbul 34220, Turkey

² Yildiz Technical University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Istanbul 34220, Turkey

Abstract

The goal of tissue engineering is to create functional tissues and organs for regenerative therapies, and total organ transplantation. Bioprinting tissues are one of the most attractive approaches for tissue engineering and regenerative medicine fields. Fabrication of a complex structure via bioprinting requires layer-by-layer fabrication strategy. Bioprinting is mainly based on three processes; imaging and computer aided the design of the tissue that we wanted to print, the production of bio-ink with the selection of proper substances, the choice of a proper bioprinter depending on the product that we want, for fabrication of scaffold and/or tissues. In recent years the 3D bioprinting technology has been developed and several approaches appear by the researchers. The approaches are biomimicry, autonomous self-assembly and mini-tissue building blocks. In this study, current and future potential applications of 3D printing for the tissue engineering and regenerative medicine will be discussed.

Keywords: Bioprinter, bioink, self-assembly, biomimicry, tissue engineering.

Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin 3D Baskı

ÖZET

Doku mühendisliğinin amacı rejeneratif tedaviler ve total organ transferi için fonksiyonel dokular ve organlar üretmektir. Dokuları biyoprinterlerle basma fikri doku mühendisliği ve rejeneratif tıp alanları için en dikkat çeken konulardan biri olmuştur. Biyoprinterle kompleks doku yapıları oluşturmak katman katmana üretim stratejisi gerektirir. Biyoprinterle üretim prensibi üç temel proseste incelenir; basılmak istenen dokunun görüntülenmesi ve bilgisayar destekli dizaynı, uygun malzemeler seçilerek biyomürekkep üretimi, üretmek istediğimiz dokuya uygun biyoprinter seçimi. Bu şekilde üretmek istediğimiz doku iskelelerini ve/ya da dokuları üretebiliriz. Üç boyutlu biyoprinter teknolojisi son yıllarda oldukça gelişmiş ve araştırmacılar çeşitli yaklaşımlar geliştirmiştir. Bunlar; biyomimikri, otonom kendiliğinden gelişme ve mini-doku tuğlalarıdır. Bu çalışmada doku mühendisliği ve rejeneratif tıp alanında şimdiki ve gelecekteki potansiyel 3 boyutlu yazıcı kullanımı tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyoprinter, biyomürekkep, kendiliğinden oluşma, biyomimikri, doku mühendisliği.

Introduction

The goal of tissue engineering is to create functional tissues and organs for regenerative therapies, and total organ transplantation. Experimental approaches and error were the long and troublesome process mainly used to develop the field of regenerative medicine by improving the success of techniques. The most common tissue engineering strategy is to seed cells onto scaffolds, which can then direct cell proliferation and differentiation into three-dimensional functioning tissues. Synthetic and natural polymers have been used to produce various tissues. To be successful in this challenge, these materials must be biocompatible and biodegradable, with the proper mechanical strength to support cell attachment, proliferation, and direct cell differentiation. Although significant success has been achieved in the past decades both in research and clinical applications, it is obvious that complex 3D organs require more precise multi-cellular structures with vascular network integration, which cannot be provided by traditional methods [1]. One of the most promising techniques to develop the field of tissue engineering and regenerative medicine, the usage of 3D bioprinters to produce artificial tissues and organs.

In 3D bioprinting, the layer-by-layer accurate positioning of biological materials, biochemicals and living cells, with positional control of the placement of functional components, is used to fabricate 3D structures. There are several approaches to 3D bioprinting; which biomimicry, autonomous are self-assembly and mini-tissue building blocks. Researchers are developing these approaches and using them co-operatively, to fabricate 3D functional living human constructs with proper biological and mechanical properties for the clinical restoration of tissue and organ function [2].

Biomimicry is the solution for complex human problems with the imitation of the models, systems, and elements of nature. Identical reproductions of the cellular and extracellular components of a tissue or organ are the application of biomimicry to the 3D bioprinting.

Autonomous self-assembly is the approach which is using embryonic organ development as a guide to copy a tissue. The early cellular components of a developing tissue produce their own ECM components, proper cell signalling and autonomous organisation and patterning to produce the desired biological micro-architecture and function [3].

The concept of mini-tissues is relevant to biomimicry and self-assembly strategies for 3D bioprinting. Larger constructs can be fabricated and assembled from mini-tissues by design, self-assembly or a combination of both.

Imaging & Designing Tissues

For printing out complex functional tissues, organs, it is very important to model these in an accurate way. The visualisation techniques have been developed in time, and medical 3D visualisation methods reached the accuracy of visualisation an organ in details in a realistic scale. Medical imaging technologies provide the data on 3D structure and function at the cellular, tissue, organ and organism levels. Computer-aided design and computer-aided manufacturing tools are providing collection and digitisation with the complex architectural information for tissues and organs. It can be also modified or designed, with the benefits of the usage of computer-aided design tools, on demand.

Much current imaging and diagnostic technologies, such as magnetic resonance imaging (MRI) and computer tomography (CT), have been explored to acquire information about the targeting tissues and achieve the CAD data of the grafts.

CT imaging is based on the variable absorption of X-rays by different tissues. MRI also can provide high spatial resolution in soft tissue via using nuclear magnetic resonance. The contrast of biological structures can be strongly increased with the use of contrast agents. For CT scans; barium or iodine and for MRI scans; iron oxide, gadolinium or metalloproteins are used as contrast agents [4].

After raw imaging data have been obtained from these imaging methods, the data must be processed to produce 2D cross-sectional images [5]. 3D anatomical representations can be produced for further analysis or modification. The 3D CAD models can be separated into 2D horizontal slices to provide instructions to the bioprinter and direct the layer-by-layer depositions of the biological elements [2].

A custom nozzle motion program is used for fabrication to adjust XYZ movement of nozzles, scan speed, temperature, air pressure and material information [6].

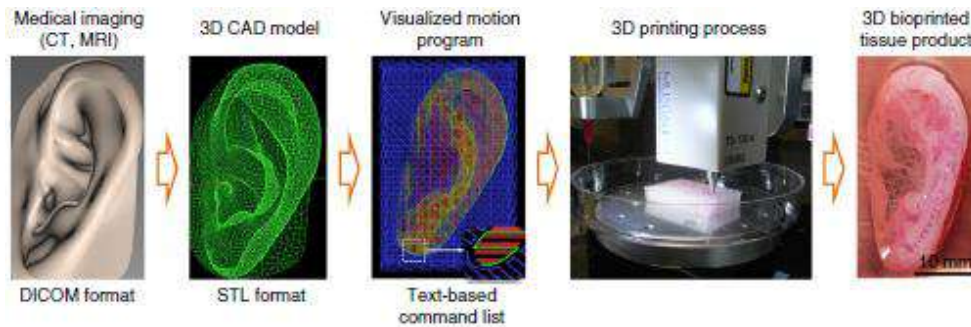


Figure 1 Modelling tissue for 3D printing [6].

Bioprinters

There are mainly 3 strategies to produce a 3D tissue by bioprinting:

Ink-Jet Bioprinters

Inkjet printing is a non-contact technique that takes digital data from a computer representing an image or character and reproduces it onto a substrate using ink drops. Also known as drop-on-demand printers. Controlled volumes of liquid are delivered to predefined locations. The first inkjet printers used for bioprinting applications were modified versions of 2D ink-based printers [7]. There are three major types of drop-on-demand bioprinters: thermal, piezoelectric, and mechanical. All types have the same basic structure. A cartridge is filled with the material to be printed, called as bio-ink, which is then forced through a microfluidic reservoir to an output nozzle.

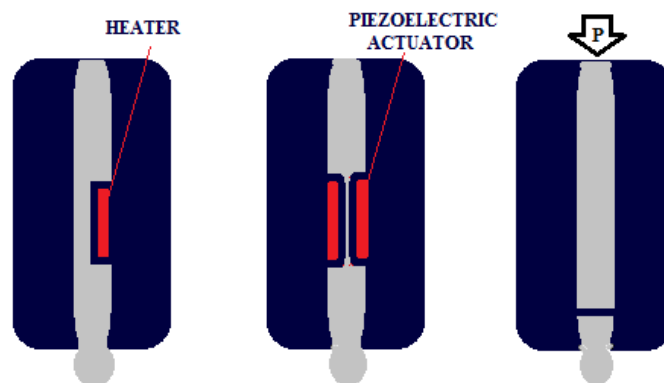


Figure 2 Schematic representation of inkjet printer methods.

Thermal inkjet printers use electrical heating of the print head to produce pulses of pressure that force droplets from the nozzle. Several studies have demonstrated that this localised heating, which can range from 200 °C to 300 °C, does not have a significant bad effect either on the stability of biological molecules. Mammalian cells are affected by the viability or post-printing function in a negative way at these temperatures [8]. The advantages of thermal inkjet printers are; high print speed, low cost and wide availability. However, the risk of exposure to the cells and materials to a thermal and mechanical stress, low droplet directionality, non-uniform droplet size, and frequent blockage of the nozzle are significant disadvantages for the use of these printers in 3D bioprinting [2].

Piezoelectric inkjet bioprinters create acoustic waves to break the liquid into droplets at regular intervals. Applying a voltage to a piezoelectric material induces a rapid change in shape, which in turn generates the pressure needed to eject droplets from the nozzle [9]. Advantages of acoustic inkjet printers include the capability to generate and control a uniform droplet size and ejection directionality as well as to avoid exposure of cells to heat and pressure stressors. This reduces the potential loss of cell viability and function and avoids the problem of nozzle blockage.

Therefore, there are some concerns because of the 15–25 kHz frequencies used by piezoelectric inkjet bioprinters due to inducing damage of the cell membrane and lysis [10]. Inkjet bioprinters also have limitations on material viscosity due to the excessive force required to eject drops using solutions at higher viscosities [11].

Microextrusion Bioprinters

The extrusion based bioprinting technique is a combination of a fluid-dispensing system and an automated robotic system for extrusion and bioprinting process [12]. During bioprinting, bioink is positioned by a locator system, with computer aided design tools, resulting in the precise deposition of cells encapsulated in cylindrical filaments of desired 3D custom-shaped structures. This rapid fabrication technique provides better structural integrity due to the continuous deposition of filaments.

The fluid dispenser system can occur as a pneumatics, piston or screw-driven or solenoid-based system, however, solenoid-based systems are not convenient to use for bioprinting [13].

The pneumatic-based system uses pressurised air with a valve-free or a valve-based configuration. The valve-free configuration has been widely used because of its simplicity. Therefore the valve-based configuration can be preferable because of its controlled pressure and pulse frequency for high accuracy applications [13].

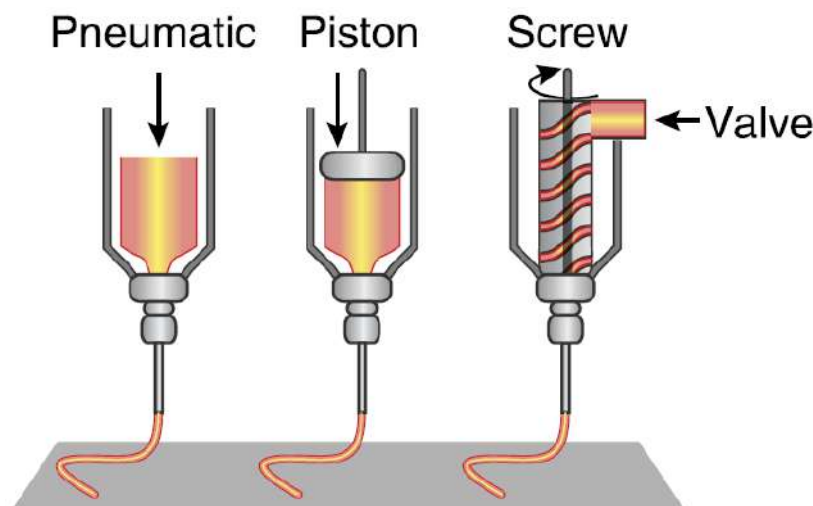


Figure 3 Microextrusion bioprinting systems [2].

Mechanical micro-extrusion systems use a piston or a screw-driven configuration. The piston-driven configuration generally provides more direct control over the flow of bioink through the nozzle [14] while the screw-driven configuration may give more spatial control and is useful for dispensing bioinks with higher viscosities [14].

However, the screw-driven configuration can generate bigger pressure drops along the nozzle, which can potentially harm the loaded cells. Thus, the rotating screw gear must be carefully designed in order to use it in extrusion-based bioprinters. Both types of mechanical microextrusion can work synergistically, for example; the screw-driven configuration melts polycaprolactone (PCL) before deposition while the piston-driven syringes extrude hydrogel [15].

Extrusion based bioprinters are simple to construct and affordable. High viscous biomaterials can be used as bioink for producing a tissue-specific scaffold or small tissues. Also, large constructs can be created. Cell spheroids, cell aggregates can be used as bioink and them self-assembled into complex tissues by this printing method.

The drawback of these methods is that only high-viscous materials can be extruded. Low-viscous materials need high pressure for extrusion and this cause high shear stress, which tends to kill cells. Cell survival rates decrease with increasing pressure.

Laser-Assisted Bioprinting

Laser-assisted bioprinting (LAB) is based on the principles of laser-induced forward transfer. The laser-induced forward transfer is a printing process allowing the deposition of a small amount of material in solid or liquid phase with high resolution [16]. A typical LAB device consists of a pulsed laser beam, a focusing system, a 'ribbon' that has a donor transport support usually made from glass that is covered with a laser-energy-absorbing layer and a layer of biological material prepared in a liquid solution, and a receiving substrate facing the ribbon. LAB functions using focused laser pulses on the absorbing layer of the ribbon to generate a high-pressure bubble that moves cell-containing materials toward the collector substrate [17]

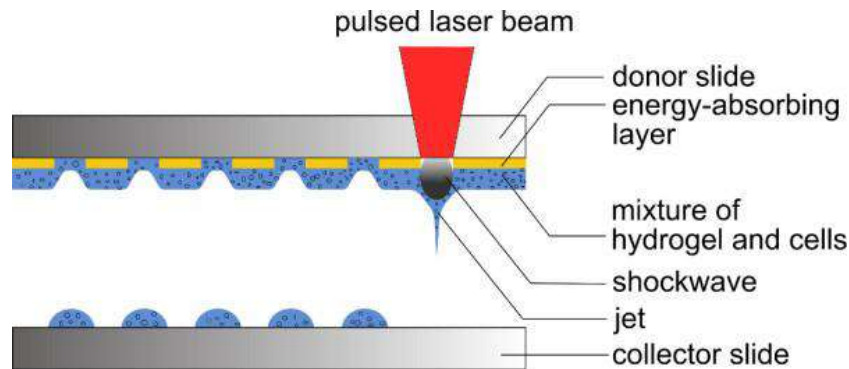


Figure 4 Schematic laser-assisted bioprinting setup [17].

The resolution of LAB is influenced by many factors, including the laser flow rate, the surface tension, the ability to get wet of the substrate, the air gap between the ribbon and the substrate, the thickness and viscosity of the biological layer [18]. LAB is nozzle-free; so the clogging problem of the biomaterials and cells is executed. It is compatible with a range of viscosities and can print mammalian cells with a low effect on cell viability and function [17].

Despite these advantages, the high resolution of LAB requires rapid gelation properties to gain high shape suitability, which results in a relatively low overall flow rate. That disadvantage prevents the production of highly complex tissues by this technique. Another disadvantage of this method is the metallic absorbing layers which produce metallic residues on the product. Metallic contamination of tissues must be inhibited. Besides these cons, LAB is a very expensive device [2]. To eliminate these disadvantages there are many types of research are in progress. LAB may be an effective prospect for tissue engineering applications.

Table 1 Comparison of bioprinters according to their properties.

	BIOPRINTER TYPES		
	INKJET	MICROEXTRUSION	LASER ASSISTED
Material Viscosities	3,5-12 mPa/s	30 to 6×10^7 mPa/s	1-300 mPa/s
Gelation Methods	Chemical, photo-crosslinking	Chemical, photo-crosslinking, shear thinning, temperature	Chemical, photo-crosslinking
Preparation Time	Low	Low to Medium	Medium to High
Print Speed	Fast	Slow	Medium-Fast
Cell Viability	>85%	40-80%	>95%
Printer Cost	Low	Medium	High

Materials & Bioink

Selection of proper biomaterials as the bioink is a vital step to gain a successful bioprinting product. Bioinks based on both naturally derived and synthetic biomaterials have been developed to provide a few key properties, such as biocompatibility and appropriate physical properties, to provide printability and long-term functionality following deposition [5].

The selection of materials for use in bioprinting and their performance in a particular application is depending on printability, biocompatibility, structural, mechanical degradation and biomimicry properties. Materials should be proper for printing processes, gelation methods material viscosity are important. The materials also should be biocompatible for not creating an immune response in the host. Materials' degradation products should be non-toxic, and their degradation rate should be proper to tissue. Mechanical properties should be similar to the tissue that we constructed. The selected bioink materials should mimic the tissue-specific endogenous material compositions of the tissues. [2]

Naturally-derived polymers, such as collagen, chitosan, and some of the synthetic polymers, such as PEG, PLGA, are widely used in regenerative medicine field and tissue engineering applications. Materials of bioinks must be biocompatible, with proper mechanical and structural properties. Moreover, bioinks should be compatible with 3D printing application. Because of these obligations generally, natural polymers are proper materials as a bioink material. Due to the application of bioprinting, bioinks may be composed of cells, cross-linked polymers, stem cells and cell signalling molecules.

The strategies for bioink printing can be divided into two directions: bioink prints as functional scaffolds with various polymers or scaffold-free printing strategies which only print out cells as the printing material. In both scenarios, viable bioprints which have loaded with the cells, need a suitable nutrient transport through vasculature mimics or pores. If the material is not sufficiently presented excessive swelling, the crosslinked porous and vascular structure can be lost, which ends up with the prevention of nutrients from supplying the cells in the constructs. The printed materials must also physically support the intended structure, so mechanical properties must be sufficient for the designated tissue or location.

Cells for Bioink

We can use any type of cells as a bioink material. The cells that we selected may be mature or pluripotent stem cells, due to the printing strategy and procedure, but they are not useful by themselves. Cells need a delivery medium for the printing process and they need a growth media for a successful product at the end of printing. That indicates the importance of proper polymer material selection.

3.2 Polymers for Bioink

Materials must be selected properly for bioink success. When polymers selected as a bioink material, it's required to understand how polymer characteristics influence printing efficacy and cytocompatibility. Because when these bioinks using during the printing process, they're expected to maintain structural integrity.

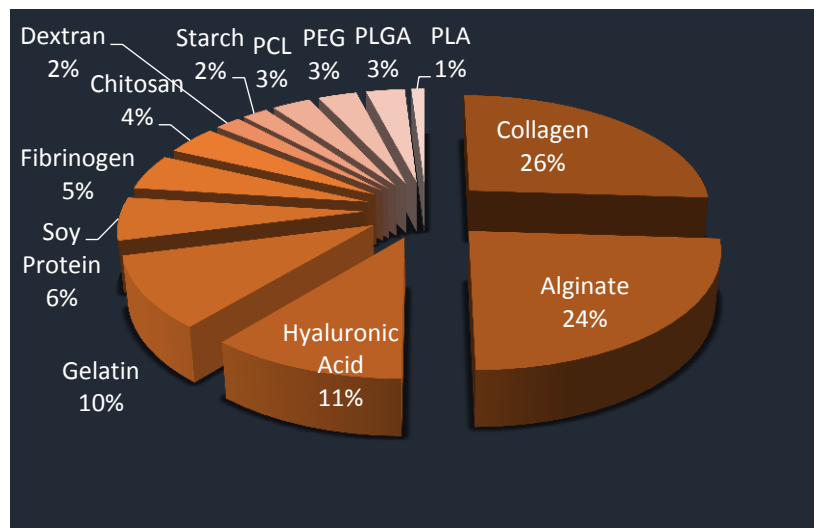


Figure 5 Chart diagramming natural and synthetic polymer distributions for use as bioinks compiled from relevant literature [19].

Table 2 Biocompatible polymers used as bioinks for stem cell, cell delivery and scaffold materials are presented along with their crosslinking features and application in bioprinting stem cells [20].

BIOINK	PROPERTIES	CROSSLINKING FEATURES	EXAMPLES
ALGINATE	Inexpensive, natural polysaccharide derived from algae. Bioinert, which may lead to anolysis and is often modified with RGD or additives such as hydroxyapatite. Crosslinking occurs rapidly hence alginate is very popular as a bioink.	Instant gelation in Ca^{2+} solution.	Fabrication of osteochondral tissue equivalents.
AGAROSE	Bioinert. Forms cytocompatible and structurally stable hydrogels. Solidifies slowly, resulting in bioink spreading. Not biodegradable in mammals.	Thermal gelation, cells mixed at 40 °C and gels at 32 °C. No other polymerizers needed.	Printing of bone marrow stromal cells in agarose has been assessed.
HYALURONIC-MA	A non-sulfated glycosaminoglycan, usually used for producing soft tissue like hydrogels rather than ones conferring structural stability. Often mixed with gelatin, dextran or other polymers to overcome bioinertness and mechanical weakness.	UV triggered free radical polymerization.	Adipose stem cells printed in Gel Ma/HA Ma hydrogel, conferring high cell viability detected after 1 week (97%).
FIBRIN	Natural protein comprised of cross-linked fibrinogen, has quick crosslinking rate and is glue like in form. The mechanical stiffness is low, so often used in conjunction with other polymers.	Crosslinks through the thrombin cleavage of fibrin.	Blended with collagen to deliver stem cells by inkjet with the application of skin regeneration.
SILK FIBROIN	Good biocompatibility and mechanical properties. Mixed with gelatin to prevent nozzle clogging.	Crosslinked with tyrosinase or by sonication.	Silk fibroin-gelatin bioink used to print human nasal inferior turbinate tissue derived MSC that supports multi lineage differentiation.
GELATIN	Formed from partially hydrolysed collagen. More soluble than collagen. Melting temperature 30 °C–35 °C, requires secondary crosslinking for applications at physiological temperatures. Matrix can be remodelled by cells.	Crosslinked using glutaraldehyde, carbodiimide or transglutaminase. UV irradiation of the methacrylated form.	BMSCs printed in gelatin MA with BMP2 or osteogenic medium.
COLLAGEN-I	Rich in the integrin binding RGD motif. The ionic or pH changes involved in gelation are usually not gentle enough to allow cell bioprinting, however water soluble forms do exist. Collagen hydrogels are formed at low concentration. That confer for low elastic modulus. Unfortunately a 100% collagen hydrogel may not be ideal as a cellularized construct due to water exclusion and contraction induced by hydrophobic peptide residues.	Gels through hydrophobic bonding with a slow rate of crosslinking, so can be blended with faster crosslinking polymers such as alginate or fibrin.	MSCs in collagen hydrogel differentiate towards chondrocytes, expressing cartilage proteins.
dECM	Supplies a natural like ECM niche for the stem cells. The stem cells seeded in dECM scaffold show greater degree of differentiation than cells seeded in collagen.	Can form a bioink that remains as a solution below 15 °C and gels after 30 min at 37 °C.	Adipose, cartilage, and heart dECM used as cell printing bioink for adipose derived SCs and human inferior turbinate tissue derived MSC.
MATRIGEL	ECM like hydrogel rich in laminin, collagen and heparan sulfated proteoglycan. Has been used extensively for 3D cell culture.	Thermal gelation.	Not widely employed for bioprinting, used for printing HepG2 cells by temperature controlled syringe.
METHYLCELLULOSE	Can be used to aid printing of another polymer and is then released. Enhances print viscosity and porosity following release.	Thermal gelation.	Blended with alginate to print MSCs into a low concentration alginate hydrogel.
POLY(ETHYLENE GLYCOL)POLY(ETHYLENE OXIDE) (SYNTHETIC)	Bioinert, variable molecular weight allows tunable properties, altering stiffness can aid stem cell differentiation. Can easily joined to other molecules. Requires modification to allow crosslinking.	UV initiated photocrosslinking of the PEGDMA.	Bone marrow derived MSCs printed for osteogenic and chondrogenic differentiation.

Cell Aggregates

Scaffold-free bioprinting techniques are generally based on self-assembly approaches. With this technique, tissues can be engineered and modified with specific compositions and shapes. These tissues are printing with the advantage of cell-cell adhesion and they can grow and evolve in their own natural ECM. This reduces inflammatory responses and increases the biocompatibility of the engineered tissue [21].

For self-assembly applications, cell aggregates are the bioinks for bioprinting. These techniques are the closest endeavour to produce a whole complex organ. Some techniques have been developed and made a success of producing skin, bone cartilage tissues without using a scaffold [22]. Self-assembly of cellular components perform the principles of embryonic development.

These techniques start with extremely high cell numbers. The aim of these techniques is triggering the cells to place to ECM in specific locations for inducing a proper growth of the tissue that we wanted. The cell aggregates that we used for bioprinting can be found as cylinder, torus, spheroids and honeycomb. Using cell spheroids for 3D bioprinting applications is a huge trend in the literature [14].

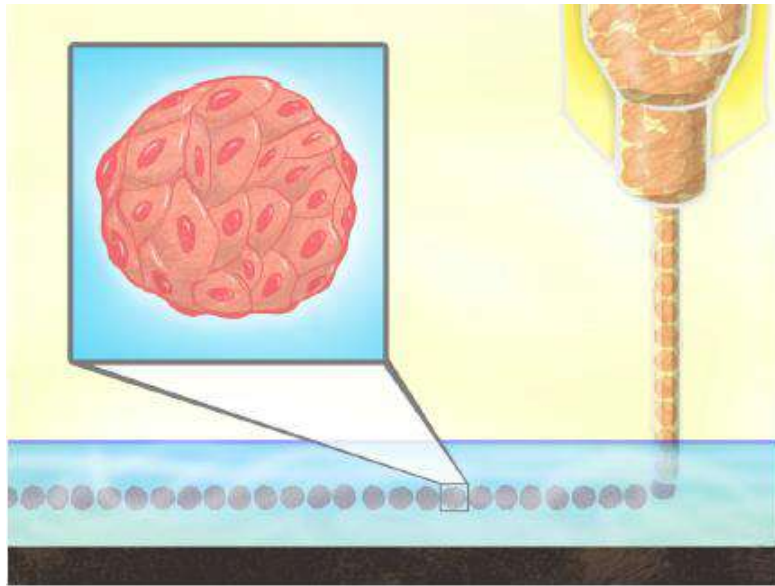


Figure 6 Spheroids are punched into “biopaper” which is a sprayed layer of hydrogel [23].

Tissue spheroid technique has some disadvantages due to its bioink properties. Tissue spheroids need a degradable delivering medium for extrusion through the nozzle tip such as a thermo-sensitive hydrogel that is inert to cell adhesion. Moreover, tissue spheroids can fuse together very quick; so they may start to aggregation inside the nozzle and that affects their printability in a challenging way. In addition, for a complete fusion, tissue spheroids should be in contact tightly with each other, therefore, during the printing process, they may not be in contact tightly. That gives a leaky tissue as a product [14].

Instead of delivering cells in the spheroid form in high density, delivering them in pellet form works more effectively [24]. In this technique, cells are printed into micro moulds to form and aggregate in a strand shape. Moulds are constructed with hydrogels, such as agarose or alginate, which are inert to cell adhesion [25]. The biggest obstruction with this approach is the difficulty of making large-scale tissues without using a temporary moulding material. So, tissue strands can be considered as an alternative approach, where long strands of tissues can be fabricated and printed. With tissue strand technique, the hard procedure of the spheroid preparation and loading, printing difficulties can be eliminated. The strands can be printed in coordination with vasculature that is the biggest advantage because of increasing the size of the tissue strands to producing large-scale tissues and organs in the future [26].

Cell aggregate based bioinks have excellent advantages, including better cellular interactions, close biomimicry, fast tissue formation and long-term stability of cells in 3D. Although, they have a few limitations. A very high number of cells is needed to prepare an effective amount of aggregates. These numbers can go up to a few hundred million cells. In general, expanding cells in these numbers is requiring intense effort and expensive, and some cell types cannot proliferate fast, therefore their applicability and availability are limited [14].

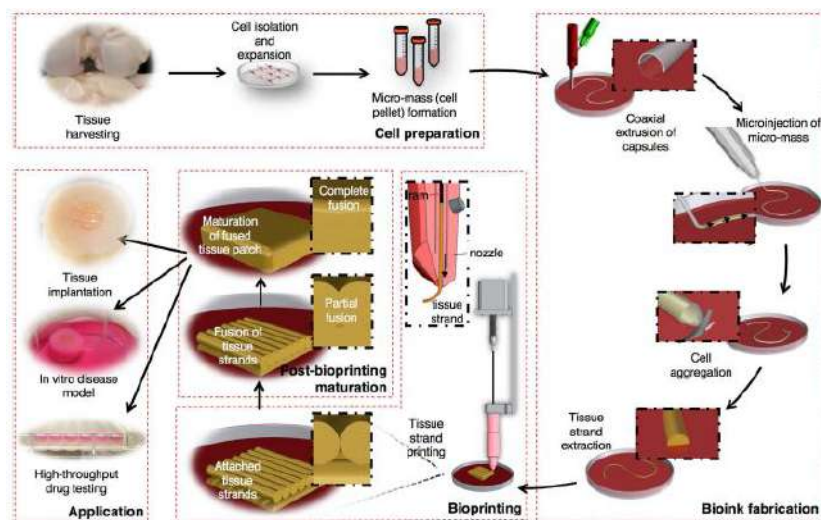


Figure 7 The concept of tissue printing using tissue strands as bioink [44].

Decellularized Extracellular Matrix

With the developments in hydrogel-free approaches, obtaining extracellular matrix from natural sources has been considered as a new bioink source for tissue and organ fabrication. After the discovery of organ decellularization techniques, researchers aimed to use decellularized matrix (dECM) components in printing tissue analogues. In a recent study, they decellularized tissues and degraded them into smaller pieces, then loaded the mini-decellularized tissues with cells and printed with a PCL frame to support the mini tissues. The natural differentiation of the cells observed with three different cell types, when they were loaded in their native dECM [27].

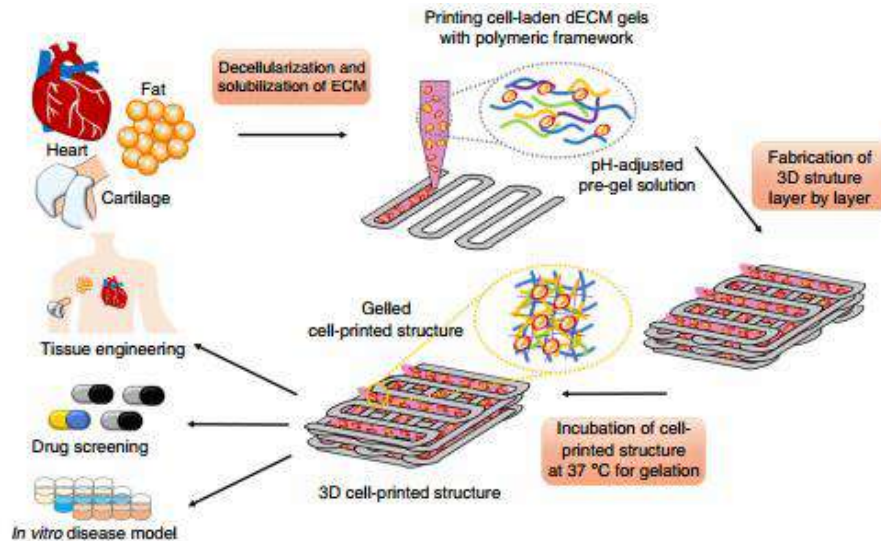


Figure 8 Schematic procedure for dECM bioink bioprinting [27].

With today's technology, decellularization of matrix components have some limitations which are related to their low affordability and abundance of the bioink, with the protocols which have been used. Since the dECM is obtained from the decellularization of the natural organs and tissues, and the resultant dECM is very small when the dECM is separated into small pieces, therefore a very large volume of tissues or organs is needed to create scale-up tissues after bioprinting. In addition, dECM loses its mechanical and structural integrity. And, some toxic residuals can stay in the separated dECM components. Because of these issues, printed bioink cannot facilitate cell formation while cells can absorb the matrix components or the matrix shrinks significantly. When the mechanical properties are very weak, there is a need for a frame printed using a hard material to support the dECM structure, prevents collapsing of the printed product [14].

4. Conclusion & Future Perspectives

Bioprinting applications for tissue engineering is a very attractive subject for producing novel solutions to the many problems of the current medical world. Present fabrication procedures are not sufficient to produce complex whole organs, but simple-structured organs and tissues can be produced with current approaches. In this study, the working principle of bioprinters and some significant approaches have been discussed. It has been observed that there is a great potential with current approaches, which can be classified as bio-mimicry, self-assembly and tissue building blocks. It seems like that, the key to success is the usage of these approaches co-operatively. The improvement of bioprinting applications also depending on the stem cell technology, materials science technology and high-scale production capabilities of the ingredients of bioink. When these problems solved, bioprinting will be one of the most important inventions of the world.

REFERENCES

1. Ozbolat, I. T. & Yu, Y. Bioprinting toward organ fabrication: challenges and future trends. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **60**, 691–699 (2013).
2. Murphy, S. V. & Atala, A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat. Biotechnol.* **32**, 773–785 (2014).
3. Derby, B. Printing and Prototyping of Tissues and Scaffolds. *Science* **338**, 921–926 (2012).
4. McRobbie, D. W. *MRI from picture to proton*. (Cambridge University Press, 2006).
5. Zhang, Y. S. *et al.* 3D Bioprinting for Tissue and Organ Fabrication. *Ann. Biomed. Eng.* (2016). doi:10.1007/s10439-016-1612-8
6. Kang, H.-W. *et al.* A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity. *Nat. Biotechnol.* **34**, 312–319 (2016).
7. Xu, T., Kincaid, H., Atala, A. & Yoo, J. J. High-Throughput Production of Single-Cell Microparticles Using an Inkjet Printing Technology. *J. Manuf. Sci. Eng.* **130**, 21017 (2008).
8. Cui, X., Dean, D., Ruggeri, Z. M. & Boland, T. Cell damage evaluation of thermal inkjet printed Chinese hamster ovary cells. *Biotechnol. Bioeng.* **106**, 963–969 (2010).
9. Tekin, E., Smith, P. J. & Schubert, U. S. Inkjet printing as a deposition and patterning tool for polymers and inorganic particles. *Soft Matter* **4**, 703 (2008).
10. Cui, X., Boland, T., D D'Lima, D. & K Lotz, M. Thermal inkjet printing in tissue engineering and regenerative medicine. *Recent Pat. Drug Deliv. Formul.* **6**, 149–155 (2012).
11. Kim, J. D., Choi, J. S., Kim, B. S., Chan Choi, Y. & Cho, Y. W. Piezoelectric inkjet printing of polymers: Stem cell patterning on polymer substrates. *Polymer* **51**, 2147–2154 (2010).
12. Mironov, V., Boland, T., Trusk, T., Forgacs, G. & Markwald, R. R. Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering. *Trends Biotechnol.* **21**, 157–161 (2003).
13. Khalil, S., Nam, J. & Sun, W. Multi-nozzle deposition for construction of 3D biopolymer tissue scaffolds. *Rapid Prototyp. J.* **11**, 9–17 (2005).
14. Ozbolat, I. T. & Hospodiuk, M. Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting. *Biomaterials* **76**, 321–343 (2016).
15. Visser, J. *et al.* Biofabrication of multi-material anatomically shaped tissue constructs. *Biofabrication* **5**, 35007 (2013).
16. Delaporte, P. & Alloncle, A.-P. [INVITED] Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology. *Opt. Laser Technol.* **78**, 33–41 (2016).
17. Gruene, M. *et al.* Laser Printing of Stem Cells for Biofabrication of Scaffold-Free Autologous Grafts. *Tissue Eng. Part C Methods* **17**, 79–87 (2011).
18. Guillemot, F., Souquet, A., Catros, S. & Guillotin, B. Laser-assisted cell printing: principle, physical parameters versus cell fate and perspectives in tissue engineering. *Nanomed.* **5**, 507–515 (2010).
19. Carrow, J. K., Kerativitayanan, P., Jaiswal, M. K., Lokhande, G. & Gaharwar, A. K. in *Essentials of 3D Biofabrication and Translation* 229–248 (Elsevier, 2015).
20. Irvine, S. & Venkatraman, S. Bioprinting and Differentiation of Stem Cells. *Molecules* **21**, 1188 (2016).
21. Jakab, K. *et al.* Tissue engineering by self-assembly and bio-printing of living cells. *Biofabrication* **2**, 22001 (2010).
22. Norotte, C., Marga, F. S., Niklason, L. E. & Forgacs, G. Scaffold-free vascular tissue engineering using bioprinting. *Biomaterials* **30**, 5910–5917 (2009).
23. Patra, S. & Young, V. A Review of 3D Printing Techniques and the Future in Biofabrication of Bioprinted Tissue. *Cell Biochem. Biophys.* **74**, 93–98 (2016).

24. Ozbolat, I. T. Scaffold-based or scaffold-free bioprinting: competing or complementing approaches? *J. Nanotechnol. Eng. Med.* **6**, 24701 (2015).
25. Tan, Y. *et al.* 3D printing facilitated scaffold-free tissue unit fabrication. *Biofabrication* **6**, 24111 (2014).
26. Yu, Y. *et al.* Three-dimensional bioprinting using self-assembling scalable scaffold-free 'tissue strands' as a new bioink. *Sci. Rep.* **6**, 28714 (2016).
27. Pati, F. *et al.* Printing three-dimensional tissue analogues with decellularized extracellular matrix bioink. *Nat. Commun.* **5**, (2014).

3 BOYUTLU VİDALI SERAMİK YAZICI TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

^a Bahtınur CEYLAN, ^a Murat AYDIN, ^a Deniz KANTAR, ^a Hatice EVLEN

a, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Karabük/TÜRKİYE
bhtnrcyln@gmail.com, murataydin@karabuk.edu.tr, ddenizkantar@gmail.com, hakgul@karabuk.edu.tr

Özet

3B yazıcılar, termoset ve termoplastik malzemelerin hammadde olarak kullanımıyla karmaşık parçaların üretildiği, yeni ve gelişen bir teknolojidir. Ayrıca, son yıllarda geleneksel plastik malzemeler yerine, seramik/kil gibi malzemelerin kullanılarak üretim yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada, eriyik yığın modelleme teknolojisini kullanarak, seramik malzemeden ürün yazdırabilen 3B yazıcının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Akışkan kıvamdaki seramik malzeme için vidalı ekstrüder sistemi tatmin edici sonuçlar göstermiştir. Kullanılan yazdırma parametreleri, 3B yazıcıda parça yazdırılması için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, vidalı ekstrüder kullanıldığı, seramik malzeme ile parça yazabilen yazıcı üretilmiş ve seramik malzeme ile parça üretimi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: 3B Yazıcı, Seramik Malzeme, Vidalı Ekstrüder, Eriyik Yığın Modelleme

DESIGN AND PRODUCTION OF 3D CERAMIC PRINTER WITH SCREW EXTRUDER

Abstract

3D printers are the newest technology that are usually used thermoset and thermoplastic materials as raw material and they have been begun to use widely. Besides, ceramic /clay materials have been preferred to use printing parts recently instead of traditional plastic materials. In this study, 3D printer that used fused deposition technology was designed and built a prototype in order to print ceramic materials. It was observed that screw extruder system was given satisfying results to use fluidized ceramic material. Used printing parameters were proper to print that kind of parts. As a result, 3D printer with a screw extruder system was produced and printing parts with this printer were achieved.

Keywords: 3D Printer, Ceramic Material, Screw Extruder, Fused Deposition Modelling

1. Giriş

3B yazıcı, bilgisayar ortamında katı model olarak tasarlanan ürünlerin, gerçek hayatta somut nesnelere dönüşüren bir teknolojidir. Bu teknoloji, geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak, gerçekleştirilmesi zor veya mümkün olmayan geometrileri üretebilmektedir. Çalışma prensiplerine göre farklı kategorilere ayrılan üç boyutlu yazıcılar, seramik, plastik, metal gibi toz malzemeleri kullanarak üretim yapabilen esnek, hızlı, basit bir üretim yöntemidir. Yaygın olarak plastik malzemelerin hammadde (filament) olarak kullanıldığı 3B yazıcılarda, günümüzde, seramik-kil gibi toz haldeki malzemelerin çamur kıvamına getirilerek kullanılmaktadır.

3B yazdırma teknolojisinin ilk uygulaması 1984'e dayanmakta ve geçen 20 yılda bu yöntem hızlı prototipleme alanının dışında çok fazla ilgi görmemiştir. 2006'da başlayan Reprap projesi ile çok daha geniş kitlelere ulaşma imkanı bulmuştur. Bu proje sayesinde birçok sıradan kullanıcı, hobi severler, kendin yap kültürüne sahip kişiler 3B yazıcı sahibi olmuş ve projenin başlangıcından 3 yıl sonra birçok şirket açık kaynak kodlu 3B yazıcı üretmek ve satmak için Reprap projesinin getirdiklerinden faydalanarak teknolojiyi çok daha geniş bir kullanıcı kitlesine yaymayı başarmıştır [3].

3B yazdırma işleminde, üretilcek ürün katı model olarak bilgisayar ortamında (CAD) tasarlanır ya da üç boyutlu tarama sistemleri ile taranarak, nokta bulutları yardımıyla katı modellere dönüştürülür. Oluşturulan model, STL dosya formatına çevrilerek, dilimleme işlemi ile katmanlara ayrılır. Üretilcek ürün, bu katmanlara eriyik malzemenin yayılması ile oluşturulur. Günümüz teknolojisinde bu katmanlar, plastik ergitme, lazer sin-

terleme, sterolitografi gibi farklı yöntemler ile gerçekleştirilmektedir ve yazıcının takip etmesi gereken takım yolu, dilimleme işlemi ile elde edilmektedir [11].

Üç boyutlu yazıcılarda meydana gelen en önemli gelişme farklı malzemelerin bu teknolojiye kullanılmasıdır. Bu alanda yapılan çalışmalar ile nano-kompozit malzemeler, farklı plastik karışımlar ve farklı karışımlar içeren toz metaller kullanılmaya başlanmıştır. Bu yeni olanaklar, seramik sanatçıları tarafından, farklı bir şekillendirme yöntemi olarak kullanılmış, yeni seramik formların ortaya çıkmasını sağlamıştır [8-9].

Lewis ve arkadaşları, damla ve filament tabanlı doğrudan mürekkepli yazdırma tekniklerinin biyomedikal uygulamalarda kullanımı üzerine çalışmışlardır. Çeşitli mürekkep tasarımlarına ve bunların reolojik davranışları, mürekkep tortulaşma mekaniklerine, potansiyel şekillerine ve ihtiyaç duyulan takım yoluna odaklanmışlardır. Her bir teknik kullanılarak üç boyutlu seramik yapıların örnek uygulamalarını göstermişlerdir. Ayrıca bu yöntemin, avantaj ve dezavantajlarını tartışmışlardır [1].

Ventola, medikal uygulamalarda üç boyutlu yazdırma teknolojisinin kullanımı, günümüz ve gelecekteki uygulamaları üzerine çalışmıştır. Çalışmasında, üç boyutlu yazdırma teknolojisinin kullanışlı ve potansiyeli olan bir yöntem olduğunu ve farklı alanlarda kullanılabilirliğini göstermiştir. Yazıcı performansı bakımından, yazdırma çözünürlüğü ve kullanılan malzeme çeşidinin arttığını ve buna bağlı olarak uygulama alanların genişlediğini belirtmiştir. Araştırmacıların var olan medikal uygulamalar üzerine araştırma ve geliştirme çalışmalarını sürdürdüğünü vurgulamıştır. 3B yazdırma teknolojisinin kullanıldığı medikal uygulamaların önemli ve ilerlemeye uygun bir alan olduğunu, fakat insan doku ve organ yazdırma uygulamalarının halen zamanla gelişecek işlemler olduğunu belirtmişlerdir [2].

Schubert ve arkadaşları, 3B yazdırma teknolojisinin optik teknolojisinden organ yazdırmaya kadar innovasyonu üzerine çalışmışlardır. 3B yazdırma işleminin kullanıldığı medikal uygulamaların hızla genişleyen ve insan sağlığı konusunda devrim yaratacak bir teknoloji olduğunu söylemişlerdir. Medikal kullanımlar için 3B teknolojisini, doku ve organ üretimi, kişisel protez üretimi, implantlar, anatomik modeller ve farmasötik araştırmalar olarak kategorilere ayırmışlardır. Özellikle ilaç sektöründe 3B yazıcıların kullanımı ile tıbbi ürünlerin kişiselleştirilmesi, ilaç ve ekipman üretimi, maliyet verimliliği, üretilebilirliğin artırılması, multi disiplinler iş birliklerinin ilerletilmesi gibi birçok avantajın olduğunu vurgulamışlardır [4].

Vorndran ve arkadaşları, seramik implantların 3B yazdırılması üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, 3B yazdırma işleminin, biyo-seramik implantların ve iskelet sisteminin bilgisayar destekli tasarım dosyasından doğrudan üretilme işleminin yeni bir teknoloji olduğunu vurgulamışlardır. Sement yada sinterleme katkılı yöntemlerin kullanılmasıyla 3B yazdırma işlemi için yeni bir malzeme geliştirilmesi üzerine bulgularını özetlemişlerdir. Hastadan aldıkları bilgisayar tomografisi verisini kullanarak, kişisel seramik implantları 3B yazıcı kullanarak üretmişlerdir [6].

Irsen ve arkadaşları, 3B yazdırma işlemi için biyo-seramik taneler üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, malzeme üretimi için tane özelliklerinin morfolojik ve partikül özelliklerini tam olarak örtüşmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu ihtiyaç için, laboratuvar ölçekli akışkanlaştırılmış tanecik yatağını belirli ihtiyaçları karşılamak için değiştirmişlerdir. Bu değişiklikleri, sentetik kemik yapısının üretilmesi için örnek bir tanecik spreyleme ile üretilmesinde test etmişlerdir. Ürettikleri granülü 3B yazıcıda başarılı bir şekilde işlediklerini vurgulamışlardır [7].

On yıldan fazla bir süredir, katman üretim teknolojileri seramikte yeni ürünler geliştirilmesini sağlamıştır. Üç boyutlu objelerin katman tabanlı üretimi (Layer Manufacturing Technologies) ile birlikte, neredeyse her karmaşık yapıya sahip ürün, üretilebilir hale gelmiştir. Lazer sinterleme yöntemi kullanılarak, seramik bir malzemenin üretilmesi ile metal ve plastik malzemenin üretilmesi birbirine çok yakındır. Ancak üretim sürecine nazaran, katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı gibi etkenlerin kullanılacak seramik tozuna göre ayarlanması gerekmektedir [5].

Fraunhofer IPT' de, seramik lazer sinterleme konusu üzerine araştırmalar 100 W kadar olan lazer gücü ile başlatılmıştır. İlk denemeler alüminyum oksit, alüminyum silikat ya da zirkonyum silikat gibi seramik tozları ile yapılmış ve zirkonyum silikat tozunun ($ZrSiO_4$) bu süreçte en iyi sonucu verdiği anlaşılmıştır. Bugün ise 200 W lazer sinterleme sistemi kullanılmaktadır [10].

Seramik tozlarının seçici lazer sinterleme tekniği ile üretilmeye başlaması, yüksek hassasiyet gerektiren endüstriyel malzemelerin yanında, sanatsal objelerin de üretilmesini sağlamıştır. Son yıllarda üniversitelerin sanat ve tasarım okullarında, üç boyutlu yazıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde de sanat ve tasarım alanında, üç boyutlu yazıcıların kullanımı giderek artmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde Bowling Green State University, İngiltere'de University of the West England içerisinde yer alan Center of Fine Print Research seramik malzeme kullanarak, seramik ürünler üretmektedir. Belçika'da Imaterialise, yine ABD'de

Shapeways, Ponoko ve Tethon 3D gibi kuruluşlar ise sanatçılara ve tasarımcılara, üç boyutlu seramik eserlerini ve tasarımlarını üretime imkânı sağlamaktadırlar [5].

Bowling Green State University Seramik programının 1996'dan beri başkanlığını yürüten Profesör John Bahlstreri büyük boyutlu seramik heykellerinin yanısıra üç boyutlu yazıcı teknolojisi (SLS) kullanarak da eserler veren bir sanatçıdır. Sanatçı 3D Tea Bowl Project adını verdiği proje ile geleneksel çay kaplarını dijital ortama aktarıp, üç boyutlu yazıcı teknolojileri ile üretmektedir [12].

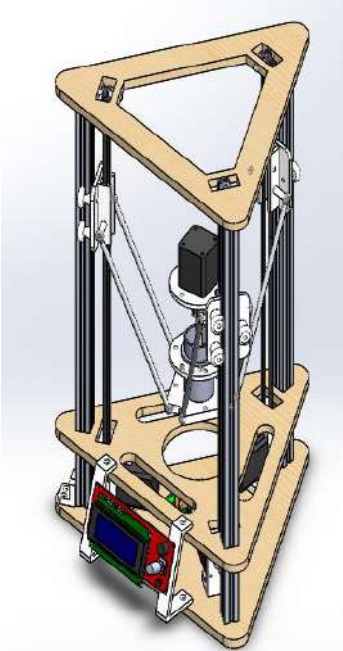
Çalışmalarında hem SLS, hem de FDM tekniği ile üreten sanatçılardan biri de Michael Eden'dir. Bilgisayar ortamında tasarlamış olduğu formları, bu teknikler ile üreten sanatçı, seramik malzemenin yanında farklı malzemelere de eserlerinde yer vermektedir. Son dönem çalışmalarında, kare kod gibi dijital kültür öğelerini geleneksel seramik formlar ile birleştirmiştir. Seramik sanatını üç boyutlu yazıcılar ile birlikte kullanan sanatçıların yanında bazı topluluklar da dikkati çekmektedir. Seramik ve dijital üretimdeki yeni tekniklerin paylaşılıp, araştırmaların yapıldığı "Data Clay", bu alanlarda çalışmakta olan yenilikçileri bir araya getirmekle kalmayıp, aynı zamanda geleneksel malzemeler ile yeni teknolojileri de bir araya getirmektedir [13].

"Stratigraphic Porcelain", "Serpentine 3D" ve "Building Bytes" isimli projeler, günümüz seramik sanatının ve üç boyutlu teknolojilerin geleceği hakkında yol gösteren projelerdir. Unfold Tasarım Stüdyosu Stratigraphic Porcelain projesinde, üç boyutlu yazıcılarla, bardak ve sürahi gibi fonksiyonel seramik parçaları üretmektedirler ve ürettikleri parçaları 2012 yılında, Milano Trienali'de sergilemişlerdir. Unfold laboratuvarlarında yapılan seramik ile ilgili çalışmalar, bu alanda yapılan öncü çalışmalar arasında gösterilmekte ve seramik tasarım alanı yeniden tanımlanmaktadır [14].

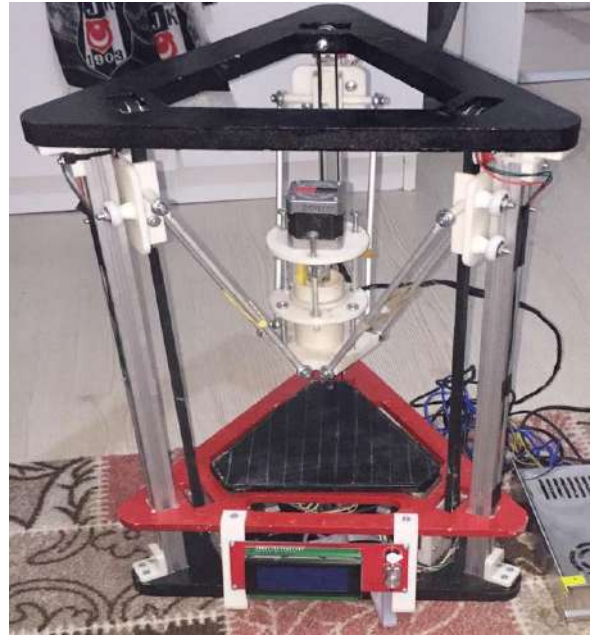
2. Materyal ve Metot

2.1. Yazıcı Tasarımı

Yapılan çalışmada, vidalı ekstrüder kullanılarak, delta tip 3B yazıcı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Yazıcı tasarım aşamasında, parça ve mekanizmaların katı modellenmesi için SolidWorks programı kullanılmıştır. Katı halde modellenen parçaların gerekli imalat resimleri çıkarılmış, üretilecek parçalar talaşlı imalat yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Hazır parçalar ise piyasada bulunan tedarikçilerden temin edilmiştir. Şekil 2'de üretilen yazıcının katı modeli ve Şekil 3'de üretilen prototip yazıcı gösterilmiştir. Yazıcının genel özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Prototip yazıcının katı modeli.



Şekil 3. Üretilen yazıcı.

Tablo 1. Yazıcının genel özellikleri

Genel Boyutlar	320x320x510 mm
Baskı Boyutları	Çap 70mm, Yükseklik 80mm
Baskı Malzemesi	Seramik, Kil
Step Motor	Nema 17
Nozzle Çapı	Ø2.5 mm
Kaplin	8x5mm Esnek Kaplin

Üretilen yazıcıda, şase kısmı 20x20mm sigma profil ve MDF gövde kullanılarak imal edilmiştir. Delta tipi olan bu yazıcının yazma boyu 80mm, yazma çapı 70mm'dir. Yazıcının ana gövdesini oluşturan sigma profiller, alt ve üst noktalardan, üçgen geometriye sahip tahta plakalar ile sabitlenmiştir. Sabitlenen profiller bu plakalara L bağlama aparatları yardımıyla bağlanmıştır. Böylece yazıcı için rijid ve dayanıklı bir gövdenin üretimi sağlanmıştır. Şekil 4'de yazıcının alt ve üst sabitleme plakaları ve gövde bağlantıları gösterilmiştir.



(a)

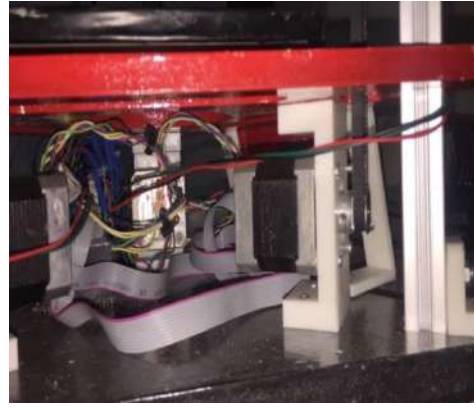


(b)

Şekil 4. Yazıcı gövde tasarımı. (a) Gövde profilleri, (b) Gövde bağlantısı.



(a)



(b)

Şekil 5. Kullanılan step motor ve profil bağlantısı (a) Step motor (b) Step motor kasnak bağlantısı ve bağlantı aparatları

Delta tip yazıcılarda hareket kollara aktarılarak, nozıl kısmını taşıyan plaka bilgisayardan gönderilen kodlar dahilinde hareket etmektedir. Üretimi yapılan yazıcıda, yazıcının hareket iletimi için kayış-kasnak mekanizması kullanılmış ve kullanılan mekanizma şase profilleri üzerine sökülebilir bağlama elemanları ile sabitlenerek, hareket sağlanmıştır. Yazıcının tahrik sistemi için Nema17 step motor kullanılmıştır. Kullanılan Nema17 step motorun özellikleri, şaft tipi Ø5mm "D" tipi, tur başına adım sayısı 200, çalışma akımı 1200 mA, çalışma gerilimi 4V, tutunma torku 3.2 kg-cm'dir. Şekil 5'de kullanılan step motor ve profil bağlantısı gösterilmiştir.

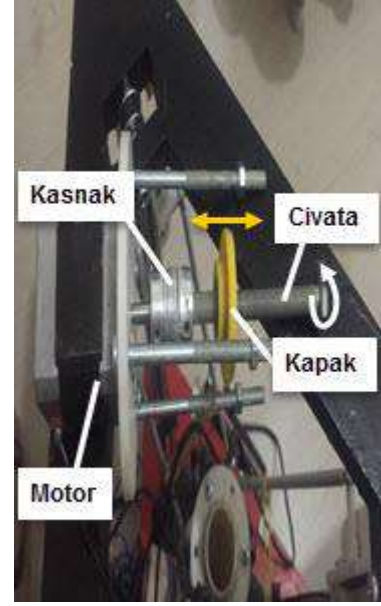
Seramik madde kullanarak parça yazan yazıcıların malzeme çıkış kısmı (nozıl-nozzle) diğer yazıcılardan farklıdır. Geleneksel yazıcılarda, filament olarak hazırlanan plastik malzeme, nozıl içerisinde sıcaklık yardımıyla erimekte ve nozıl ucundan eriyik malzeme çıkmaktadır. Böylece, bu eriyik malzeme yazıcı tablasına yapışarak katmanlı şekilde parça üretimi gerçekleşmektedir. Seramik malzeme üreten yazıcılarda, hammadde'nin akışkan-yarı akışkan halinde olmasından dolayı, ekstrüder kısmında herhangi bir sıcaklık artışına gerek duyulmamaktadır. Ayrıca, akışkan-yarı akışkan formundan dolayı malzemenin düzgün bir hızda nozıl ucundan akması gerekmektedir. Üretimi yapılan yazıcıda, nozıl kısmı vidalı ekstrüder (vida-somun çifti) mekanizması şeklinde tasarlanmıştır. Nozıl tasarımında civata, somun, kapak ve nozıl haznesi kullanılmıştır. Nozıl haznesi, akışkan-yarı akışkan seramik malzemenin depolandığı kısımdır. Step motor civata ile bağlantısı kaplin yardımıyla yapılmış ve civatanın kendi eksenini etrafından dönmesi sağlanmıştır. Akışkan-yarı akışkan seramik malzemenin iletilmesi için, nozıl haznesinin iç çap ölçüsü ile aynı kapak kullanılmıştır. Bu kapak nozıl haznesi içerisine yerleştirilmektedir. Kapak gövdesine koyulan somun ise civata üzerinde hareket etmekte ve kapağı hazne içinde aşağı yukarı doğru taşımaktadır. Böyle seramik malzeme hazne içinde sıkışmakta ve nozıl ucundan akması sağlanmaktadır. Şekil 6'da kullanılan vidalı nozıl tasarımı gösterilmiştir.



(a)



(b)

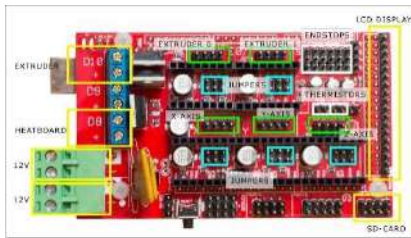


(c)

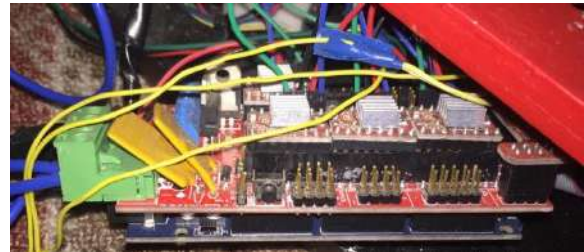
Şekil 6. Vidalı nozıl tasarımı. (a) Nozıl haznesi, (b) Nozıl hazne montajı, (c) Nozıl hazne çalışma sistemi

Üretilen seramik yazıcıda, eksen kontrolleri için, elektronik kontrol kartları kullanılmıştır. Arduino 2560 kontrol kartı, üretilen parçanın takım yolu kodlarını yüklemek kullanılmıştır. Ramps 1.4 kontrol kartı ise, step motorların hareketini ve hızını, ayrıca eksen hareketlerini kontrol etmek için kullanılmıştır. Sistemde kullanılan LCD panel ile, bütün ayarlama parametrelerini takip etmek için kullanılmıştır. Bütün elektrik ve elektronik kartların çalışması için 12 volt ve 30 amper güç kaynağı kullanılmıştır. Şekil 7'de yazıcıda kullanılan elektronik kartlar ve bağlantıları gösterilmiştir.

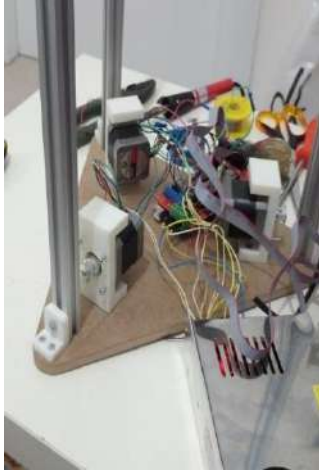
Parçanın yazdırılmasını sağlayan, Nozıl kısmının aşağı yukarı hareketi için step motorlar kullanılmıştır. Sigma profiller üzerine yerleştirilen kol taşıyıcı aparatlar, tekerlekler yardımıyla sağı yukarı hareket ettirilmiştir. Kolları taşıyan plastik aparatla, kayış-kasnak sistemi ile tahrik edilmiştir. Step motorlarda GT2 kasnak kullanılmış ve yazıcının üst kısmına karşılık kasnağı civata-somun ile sabitlenmiştir. Şekil 8'de kasnak montajı gösterilmiştir.



(a)



(b)

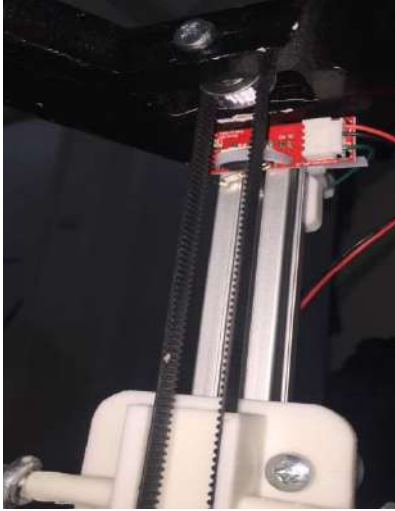


(c)



(d)

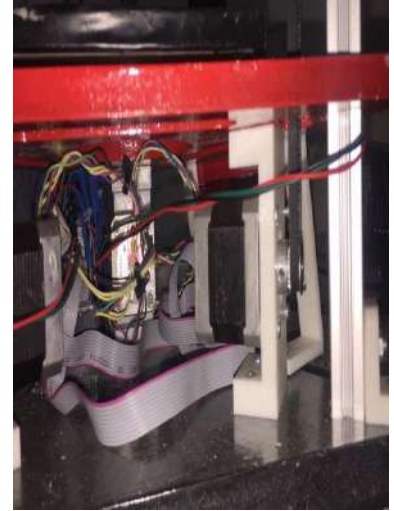
Şekil 7. Elektronik kartlar ve bağlantıları. (a) Ramps 1.4 kart bağlantı şeması, (b) Arduino kart ve Ramps bağlantısı, (c) Güç kaynağı ve bağlantıları, (d) LCD panel ve bağlantılar



(a)



(b)

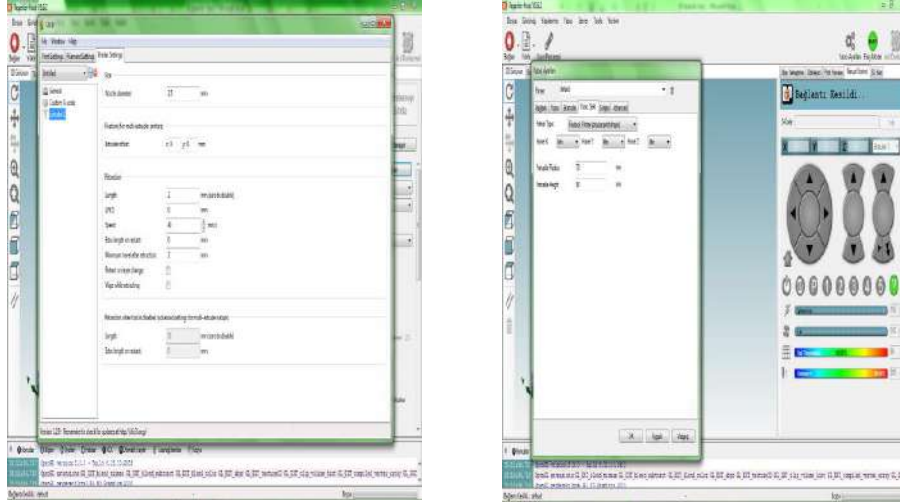


(c)

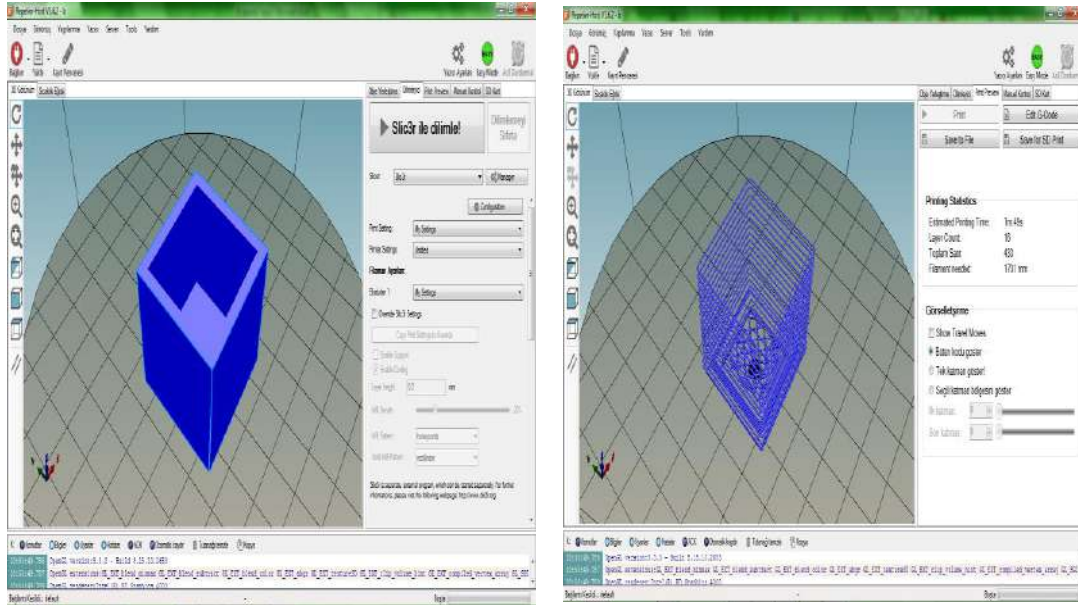
Şekil 8. Kayış-kasnak tertibatı. (a) Üst avare kasnak, (b) Kayış ve taşıyıcı kolların bağlantısı, (c) Motor ve kasnak bağlantısı

2.2. Yazdırma Performansı

Vidalı ekstrüder kullanılan yazıcının üretilmesinin ardından, yazdırma performansını incelemek için, parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Ürün yazdırabilmek için, Repetier-Host programı kullanılarak, yazdırma parametreleri girilmiş ve takım yolu elde edilmiştir. Yazıcı ile bilgisayar arasındaki veri aktarımı ve kontrol için Arduino 2560 marka kontrol kartı ve Ramps 1.4 kartı kullanılmıştır. Sistemde kullanılan, vidalı ekstrüder için motor hızı 40mm/s olarak belirlenmiş ve işlem hızı 25'e düşürülerek yazdırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'da kontrol programı ve parametre ayarları gösterilmiştir.



Şekil 9. Parametrelerin arayüze girilmesi



Şekil 8. Slic3r dilimleme işlemi.

Üretilen seramik yazıcıda, parça yazdırma işlemi için hammadde olarak kil kullanılmıştır. Kil kıvamının yazdırmaya uygun hale gelmesi farklı oranlarda kil-su karışımı denenmiştir. En iyi karışım ise bir su bardağı kil ve bir su bardağı su karıştırılması ile elde edilmiş ve yazdırma sırasında bu karışım oranı kullanılmıştır. Katı model olarak tasarlanan parça, Repetier-Host programı içerisinde yer alan Slic3r dilimleme ile katmanlara ayrılmış ve takım yolları elde edilmiştir. Şekil 8'de Slic3r ile katmanlara ayrılmış parça gösterilmiştir.

Repetier-Host programı içerisinde girilen parametreler ile parça yazım işlemi gerçekleştirilmiştir. Yazdırılan parçalarda, 3B yazıcıda ısıtmalı tabla kullanılmamasından dolayı, parça hemen kurumamakta ve bundan dolayı parça geometrisinde ve ölçülerinde değişimler görülmektedir. Yazdırılan örnek parça Şekil 9'da gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 9. Yazdırılan örnek parça. (a) Yazım işlemi, (b) yazdırma sonrası

3. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, vidalı ekstrüder mekanizması ile çalışan seramik/kil malzemeden parça yazabilen 3B yazıcı tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Vidalı ekstrüder mekanizması, akışkan-yarı akışkan seramik-su karışımının 3B yazıcıda hammadde olarak kullanılmasında kabul edilebilir bir yöntem olduğu görülmüştür. Ayrıca, tasarlanan yazıcıda, tabla ısıtması kullanıldığı takdirde, parça geometrisinin ve ölçü tamlığının istenen boyutlar arasında olacağı gözlemlenmiştir. Vidalı ekstrüder sistemi kullanıldığında, ekstrüder hızı 40mm/s ve işlem hızı 25'e ayarlanması, seramik parça yazdırmak için uygun değerler olduğu belirlenmiştir. Vidalı ekstrüder hızının daha hassas kontrolü, tabla ısıtması sisteminin eklenmesi ve daha hassas eksen-hareket kontrollerinin yapılması sayesinde, seramik/kil malzemelerin 3B yazıcılarda kullanılmasıyla profesyonel ürünlerin üretilmesi mümkündür.

REFERANSLAR

- [1] Jennifer A. Lewis, James E. Smay, John Stuecker, Joseph Cesarano III "Direct Ink Writing of Three-Dimensional Ceramic Structures", Journal of the American Ceramic Society, Volume 89, Issue 12, Pages 3599–3609, December 2006.
- [2] C. Lee Ventola, "Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses"
- [3] <http://unfold.be/pages/about> (Erişim Tarihi: 15.11.2015)
- [4] Schubert C, van Langeveld MC, Donoso LA, "Innovations in 3D printing: a 3D over view from optics to organs", Br J Ophthalmol, 98(2):159–161, 2014.
- [5] idil, 2015, Cilt 4, Sayı 18 - Volume 4, Number 18
- [6] Elke Vorndran, Claus Moseke ve Uwe Gbureck, "3D printing of ceramic implants", MRS Bulletin, Volume 40, Issue 2 (3D printing of biomaterials), pp. 127-136, February 2015.
- [7] St. H. Irsen Dr., B. Leukers, Chr. Höckling, C. Tille, H. Seitz, "Bioceramic Granulates for use in 3D Printing: Process Engineering Aspects", Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Volume 37, Issue 6, Pages 533–537, June 2006.
- [8] Klein GT, Lu Y, Wang MY. 3D printing and neurosurgery ready for prime time?", World Neurosurg, 80(3–4):233–235, 2013
- [9] Gross, BC, Erkal JL, Lockwood SY, et al. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences", Anal Chem, 86(7):3240–3253, 2014
- [10] Klocke, F., Ader, C. (2003). Direct Laser Sintering Of Ceramics. Solid Freeform Fabrication Symposium. 2003 – 447. <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/2003TOC>
- [11] <http://3dprintertr.com/3d-printer-nedir/> (Erişim Tarihi: 26.02.2017)
- [12] <http://johnbalistreriartist.com/3d-tea-bowl-project/> (Erişim Tarihi: 24.02.2017)
- [13] <http://www.michael-edén.com/about/> (Erişim Tarihi: 21.02.2017)
- [14] <http://unfold.be/pages/stratigraphic-porcelain> (Erişim Tarihi: 21.02.2017)

3B KOMPRESÖRLÜ SERAMİK YAZICI TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

^a Çiğdem CEBECİ, ^a Murat AYDIN, ^a Fatih Huzeyfe ÖZTÜRK, ^a Uğur CAH, ^a Hatice EVLEN

a, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Karabük/TÜRKİYE

cigdemcebeci@gmail.com, murataydin@karabuk.edu.tr, fatihhuzeyfe@hotmail.com, uqur-cah@hotmail.com, hakgul@karabuk.edu.tr

Özet

Üç boyutlu yazıcılar, endüstride ve kişisel kullanımlarda, kompleks geometrili parçaların daha az maliyet ve insan gücü ile üretilmesinde kullanılmaya başlanan teknolojilerden biridir. Ağırlıklı olarak, termoset ve termo plastik malzemelerin hammadde olarak kullanılmaktadır. Diğer yandan, son yıllarda ahşap-metal takviyeli kompozit filamentler ve seramik gibi toz halindeki malzemelerin hammadde olarak kullanılması yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada, toz haldeki seramik malzemenin, akışkan-yarı akışkan hale getirilerek kompresör kullanımıyla üç boyutlu yazıcıda parça yazdırılması incelenmiştir. Kompresör ile çalışan şırınga sistemi tasarlanmış ve bu sistemin üç boyutlu yazıcı ile adaptasyonu sağlanarak, seramik malzemeden parça yazdırılmıştır. Karışım oranları olarak 330gr kil malzeme ve 115gr su karışımına 5gr etil alkol kullanılmasıyla en iyi sonuç elde edilmiştir. Yazdırma parametrelerinde, 1.6mm kalınlığında ki nozül uç, 900 mm/dk yazdırma hızı ve 30-50°C tabla sıcaklığı belirlenmiştir. Üretilen yazıcı ile, seramik, kil gibi toz haldeki malzemelerin, belirli oranlarda karışımlar hazırlanarak akışkan-yarı akışkan hale getirilmesi ile endüstri ve sanatsal uygulamalarda kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Seramik, Üç Boyutlu Yazıcı, Katmanlı Üretim

DESIGN AND PRODUCTION OF 3D CERAMIC PRINTER WITH COMPRESSOR

Abstract

3D printer is one of the newest technologies that is used to produce complex geometry parts with low-cost and man power in either industrial application or personal use. In 3D printers, thermoset and thermoplastics are widely used as filaments. On the other hand, composite filaments with reinforced wood or metal particles and ceramic powder have been begun to use as filaments in 3D printers recently. In this study, printing parts using ceramic powder as filament which was produced with a specific ratios of ceramic-water-ethyl alcohol mixtures were investigated. A syringe system working with a compressor was designed and this novel system was adopted to use in 3D printers in order to perform printing process using ceramic powder. As specific ratios, the best result was obtained when the mixture was prepared using 330gr ceramic powder, 115gr water, and 5gr ethyl alcohol. Printing parameters were determined with 1.6mm diameter of nozzle, 900mm/min printing velocity, and 30-50°C plate temperature. Using designed and produced printer, it was showed that fluid or semi-fluid ceramic/clay powder mixtures with a specific ratio could be used in 3D printers as raw material in both industrial and artistic applications in market.

Keywords: Ceramic, 3D Printer, Fused Deposition Modelling

4. Giriş

Üç boyutlu yazıcı ile üretim, eklemeli üretim (additive manufacturing) olarak bilinen teknolojinin genel adıdır. Üç boyutlu yazıcı ile üretim ya da eklemeli üretim aynı zamanda hızlı prototipleme (rapid prototyping), hızlı üretim, katmanlı üretim ya da masaüstü üretim olarak adlandırılmaktadır [1].

Üç boyutlu yazıcı (3D printing) olarak bilinen bu teknoloji sayesinde farklı malzemeler ile bilgisayar destekli üretim yapabilmek mümkündür. 3B yazıcılarla, plastik, polimer, metal, seramik gibi farklı malzemeler kullanılarak dijital yöntemlerle üç boyutlu parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu üretim yöntemi, insan gücü ile yapılamayacak kadar karmaşık formların üretilmesine imkan verirken, otomotiv, mimari, inşaat, tıp, biyoteknoloji, endüstriyel tasarım, moda tasarımı ve gıda gibi alanları içine alan geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [2].

Üç boyutlu yazıcıların farklı çalışma prensipleri bulunmakta olup, üretilen ürünün malzemesine göre farklı üretim yöntemlerini kullanmaktadırlar. Genel olarak 3B yazıcılarda termoset ve termoplastik malzemeler hammadde olarak kullanılırken, son yıllarda ahşap, fiber gibi kompozit malzemeler ve seramik gibi toz malzemelerde kullanılmaya başlanmıştır. Seramik gibi toz malzemelerin kullanılmasında, 3B yazıcılarda Toz Bağlama (Inkjet Printing-Powder Binding), SLS (Seçici Lazer Sinterleme) ve Harç Yığma (extruder) yöntemleri ile üretim yapılabilmektedir [1].

Günümüzde seramik malzemelerin 3B yazıcılarda kullanımı henüz yeni bir çalışma alanıdır. Birçok araştırmacı, sanatçı bu teknolojinin geliştirilmesi için çalışmalar yapmakta ve projeler geliştirmektedir. Belli merkezlerde sürdürülen bu araştırmalar, alanında öncü nitelikte üretimlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Hala üzerinde çalışılmaya devam edilen bu projelerin bazıları üniversitelerde akademik olarak sürdürülürken, bazıları da bağımsız araştırma grupları tarafından yönetilmektedir. İşlevsel ve sanatsal formların üretilmesiyle ilgili araştırmaların yanı sıra, ileri seramiklerin üretimini mümkün kılan üç boyutlu yazıcılar konusunda uzmanlaştıkları görülen çeşitli merkezler ve kişiler konuyla ilgili eğitimler de sunmaktadır [1].

Curodeau ve arkadaşları, 3B yazdırılmış seramik kabuktan serbest yüzey geometri ile ortopedik implantların dökümden üretimi ve tasarımı üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, seramik tozlarının katman katman serpilmesi ve bu tozların birleştirici malzeme kullanılarak, inkjet yazıcıda katmanların birbirine bağlanması yöntemini kullanmışlardır. 3B yazdırma ile, ortopedik cerrahi alanında kullanılmak üzere mikrometre seviyesinde yüzey dokusuna sahip gelişmemiş kemik yapılarının üretimini sağlamışlardır. Seramik kalıpların minimum pozitif özellikli boyutlarını ve buna bağlı olarak döküm işleminin minimum negatif özellikli boyutlarını yaklaşık olarak $200 \times 200 \times 175 \mu\text{m}$ belirlemişlerdir. Doku tasarımında, geometrinin karmaşık özellikleri yüzünden 5 katman kullanmışlardır. Ürettikleri parçalarda bütün gözenekli yapı, tasarımlarını yaklaşık %30-%70 arasında değişiklik göstermektedir. [6]

Seitz ve arkadaşları, kemik doku mühendisliği için gözenekli seramik iskeletlerin üç boyutlu yazdırılması üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, belirlenen miktardaki seramik tozunu, polimer tabanlı bağlayıcı karışımıyla katman katman yazdırmışlardır. Seramik tozunun ıslak bölgelerde tutunduğunu, yapışmayan tozların ise kaldırıldığını ve seramik yeşil gövdenin kaldığını belirtmişlerdir. Üretim için, kemik yenilenmesindeki verimliliği ve biyo uyumluluğu açısından, iskelet üretiminde toz olarak hidroksiapatit kullanmışlardır. Yazdırılan parçaları, 1250°C sıcaklıkta ısıtılarak işlem uygulanarak sağlamlaştırmışlardır. Sonuçta elde edilen iskelet, kemik implantların yapıldığı doku mühendisliğinde kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Prototipleri başarılı şekilde ürettiklerini ve iç kanallarının $450 \mu\text{m}$ ölçüsünün altında olduğunu belirtmişlerdir. Test parçasının mekanik dayanımının 22MPa'a kadar yükseldiğini göstermişlerdir [7].

Suwanprateeb ve arkadaşları, üç boyutlu yazıcı ile üretilen apatit- volastonit-cam seramik katkılı hidroksiapatit kompozitlerin mekanik performansları üzerine çalışmışlardır. Hidroksiapatit kompozit malzemeleri üç boyutlu yazıcı ile üretmişler ve malzemenin mekanik özelliklerini karakterize etmişlerdir. Ürettikleri malzemenin ortalama dayanımını 1.27 MPa civarında bulmuşlardır. Çeşitli sinterleme sıcaklıklarında ($1050-1300^\circ\text{C}$) ve 1-10 saat aralığında yaptıkları deneylerde 1300°C için 3 saat sinterlemenin en iyi eğilme dayanımını 34.10 GPa ve çekme dayanımı 76.82 MPa civarında belirlemişlerdir [8].

Leukers ve arkadaşları, kemik yenilenmesi için üç boyutlu yazıcıda tamamen biyo uyumlu seramik iskeletlerin yazdırılması üzerine çalışmışlardır. Hidroksiapatit test yapılarını üç boyutlu yazıcıda yazdırarak, tamamen biyo uyumluluğunu başarılı bir şekilde test etmişlerdir. Sitotoksikite testlerini statik ve dinamik yetiştirme testlerine tabi tutmuşlardır. Hücre üremesi, morfoloji analizini ve histolojik değerlendirmeleri başarılı şekilde gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, hücre üremesinin ürettikleri iskelette başarılı şekilde gerçekleştiğini ve yüksek olduğunu bulmuşlardır. Dahası, doku mühendisliğinde üç boyutlu yazıcı teknolojisinin ve uygun malzeme kullanımının iskelet yapılarının üretilmesine uygun olduğunu göstermişlerdir [9].

İngiltere'de West England Üniversitesi bünyesinde yer alan Baskı Araştırma Merkezi ve ABD'de ki Tethon firması Toz Bağlama yöntemiyle üretimin geliştirilmesi için oldukça büyük katkılar veren kuruluşlardır. İngiltere-Bristol'de bulunan Baskı Araştırma Merkezi'nde Hoskins ve Huson, seramik tozların bağlanması esasına dayalı olarak çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda, dijital teknolojiler ve endüstri-yaratıcı sanatsal üretimler arasında bağ kurulmasını sağlamışlardır. Çalışmalarında, seramik tozlarını, bir inkjet başlığı ile katmanlar halinde bırakılan sıvı bir malzeme ile bağlayarak parça üretimini gerçekleştirmişlerdir. Pudra halinde bir kütle içinde oluşan parça geometrisi, daha sonra kurutma fırınında kurutulmuş, etrafındaki toz halindeki pudra katmanını kaldırılmasıyla, nihai ürün ortaya çıkmıştır. Şekil 1-a ve Şekil 1-b'de pudra halindeki parça geometrisi, Şekil 1-c'de üretilen nihai ürün gösterilmiştir [1].



(a)



(b)



(c)

Şekil 1. (a)-(b) Pudra formundaki parça, (c) Toz bağlama yöntemiyle üretilen nihai ürün

Belçika'da faaliyet gösteren devlet destekli araştırma grubu Unfold firması, harç yığma yöntemi ile üretim yapan üç boyutlu yazıcıların kullanımı ve geliştirilmesi konusunda, 2009 yılında seramik malzeme ile harç yığarak üretim yapan ilk merkezdir. Şekil 2'de grubunda üretimini yaptığı ürünler gösterilmiştir. Ayrıca Unfold grubu, seramik sanatçısı Jonathan Keep ile birlikte bu teknolojinin paylaşılması konusunda öncü çalışmalar yapmışlardır [3]. Son dönemde Jonathan Keep ile birlikte çalışan İtalyan Wasp firması, bu yöntemle üretim yapan makineler üreterek, seramik yazıcıların yaygınlaşmasına katkı sağlamışlardır. Şekil 3'de firmanın ürettiği ürünler gösterilmiştir [4].



Şekil 2. Unfold grubunun ürettiği ürünler.



Şekil 3. Wasp proje grubu tarafından üretilmiş seramik ürünler.

Olivier Van Herpt, seramik malzemelerin üç boyutlu yazıcılarda kullanımı ile ilgili çalışan ve farklı eserler veren bir diğer araştırmacıdır. Çalışmalarında, üç boyutlu yazıcı ile üretmiş olduğu büyük boyutlu geometriler üretmiştir. Üç boyutlu yazıcıların seramik sanatında kullanımına dair çeşitli çözümler ve öneriler sunduğu projeleri bulunmaktadır. Şekil 4'de Herpt'in üretmiş olduğu parça ve kullandığı yazıcı gösterilmiştir. Van Herpt 3 boyutlu baskı teknolojisinde sınırları zorlayarak geleneksel plastik malzemelerin ötesinde seramik malzemesi ile geniş formlar üreten makineler yapmıştır [1].



Şekil 4. Herpt'in kullandığı yazıcı ve örnek ürün.

Seramik tozlarının Seçici Lazer Sinterleme tekniği ile üretilmeye başlaması, yüksek hassasiyet gerektiren endüstriyel malzemelerin yanında, sanatsal objelerin de üretilmesine olanak sağlamıştır. Son yıllarda üniversitelerin sanat ve tasarım okullarında, üç boyutlu yazıcılar kullanılmaya başlanmış ve giderek artmaya başlamıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde Bowling Green State University İngiltere'de University of the West England içerisinde yer alan Center of Fine Print Research seramik malzeme kullanarak, üç boyutlu yazıcılar da seramik ürünler üretmektedir. Belçika'da Imaterialise yine ABD'de Shapeways, Ponoko ve Tethon 3D gibi kuruluşlar ise sanatçılara ve tasarımcılara, üç boyutlu seramik eserlerini ve tasarımlarını üretime imkânı sağlamaktadırlar [5].

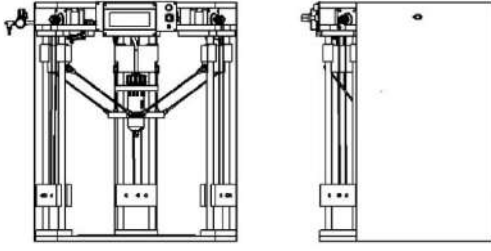
Bowling Green State University Seramik programının 1996'dan beri başkanlığını yürüten Profesör John Babilstreri büyük boyutlu seramik heykellerinin yanısıra üç boyutlu yazıcı teknolojisi (SLS) kullanarak da parça üretimi çalışmaları yapmaktadır. 3D Tea Bowl Project adını verdiği proje ile geleneksel çay kaplarını dijital ortama aktararak, üç boyutlu yazıcı ile seramik malzemeden bu bardakların üretimini gerçekleştirmektedir [5]. Michael Eden çalışmalarında hem SLS, hem de FDM tekniğini kullanmıştır. Bilgisayar ortamında tasarlamış olduğu formları, bu teknikler ile üreten sanatçı, seramik malzemenin yanında farklı malzemelere de eserlerinde yer vermiştir. Son dönem çalışmalarında, kare kod gibi dijital kültür öğelerini geleneksel seramik formlar ile birleştirmiştir [5].

Jonathan Keep, üç boyutlu yazıcıların seramik sanatında kullanımına en önemli katkıyı yapan sanatçılardan biridir. Çalışmalarında, delta model olarak bilinen üç boyutlu yazıcı mekanizmasını, seramik çamuru ile çalıştırılabilir hale getirmiştir. Geliştirdiği yazıcıda, harç yığma metodunu kullanarak, herkes tarafından kolayca ulaşılabilen, basitleştirilmiş, seramik malzeme kullanabilen üç boyutlu yazıcı prototipi geliştirmiştir [5].

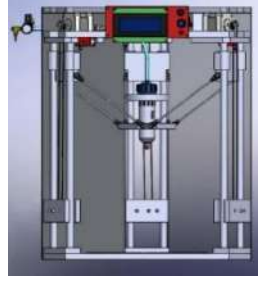
5. Materyal ve Metot

5.1. Yazıcı Tasarımı

Yapılan çalışmada, seramik malzemeden ürün yazabilen üç boyutlu yazıcının tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen yazıcının tipi için Delta tip yazıcı seçilmiştir. Delta tip yazıcılar robot kinematiği ile çalışabilen yazıcılardır. Ayrıca, ortada bulunan ve ham maddenin aktığı nozıl kısmını taşıyan üç adet kola sahiptirler. Bu kolların yazıcıya gönderilen kodlar ile hareketi sayesinde parça geometrisi yazdırılabilmektedir. Yazıcının tasarımı için SolidWorks programı kullanılmış ve üretilcek ve/veya hazır olan bütün parçalar katı halde modellenmiştir. Yazıcı boyutları 300x300x700mm'dir ve tabla baskı alanı çapı 210mm'dir. Şekil 5'de tasarımı yapılan Delta tip yazıcının modeli ve Şekil 6'da üretilen prototip gösterilmiştir.



Şekil 5. Üretilen prototip yazıcının modeli



Şekil 6. Üretilen prototip yazıcı

Tasarlanan yazıcıda yazıcı gövdesi, 6 adet, Ø12x700mm krom kaplı indüksiyon miller ile alt ve üst plakalardan sökülebilir bağlantı elemanları ile sabitlenmesi sabitlenmiştir. Bu miller aynı zamanda kolların hareketlerini sağlamak için kılavuzluk görevini de görmektedir. Miller alt ve üst noktadan, ahşap malzemeden yapılmış üçgen formdaki plakalar ile desteklenmiştir. Üst plaka üzerine kolların aşağı yukarı hareketini sağlayacak motorlar yerleştirilmiştir. Şekil 7’de kullanılan silindirik sütunlar ve bağlantı şekilleri gösterilmiştir.

Delta tip yazıcılarda kolların hareketi, step ya da servo motor yardımıyla yapılmaktadır. Servo motorlar anlık hareketleri durdurabilmeleri ve seri olmalarından dolayı profesyonel tasarımlarda tercih edilmelerine rağmen, maliyet olarak yüksektirler. Bu nedenle, maliyetleri daha düşük ve performansları kabul edilebilir sınırlarda olan adım (step) motorlar yazıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretilen yazıcıda, kolların hareketleri Nema 17 step motorlar kullanılarak sağlanmıştır. Kullanılan step motorlar, 1.8 derece, 0,87 amper, 2,4kg maksimum tork özelliklerine sahiptir. Şekil 8’de kullanılan step motor ve bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 7. Silindirik taşıyıcı sütun ve bağlantı plakaları



Şekil 8. Step motorlar ve bağlantıları

Delta yazıcı tiplerinde nozıl kısmının aşağı yukarı ve eksenlerdeki hareketi için, kollar kullanılmaktadır. Bu kolların sütunlar üzerindeki hareketinde yataklama önemli bir noktadır. Düzgün yataklanmayan tasarımlarda, parça geometrisinde hatalar ve ölçü tamlığında sapmalar görülmektedir. Üretilen yazıcıda, LME12UU rulmanlar, krom kaplı miller üzerine plastik taşıyıcılar ile bağlanmıştır. Taşıyıcı kollar bu plastik bağlantı elemanlarının üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 9’da kullanılan yataklama ve taşıyıcı kol-plastik aparat bağlantıları gösterilmiştir.

Seramik malzemenin yazıcıda hammadde olarak kullanılması yeni ve gelişen bir uygulama alanıdır. Malzemenin akışkan olması sebebiyle, yazdırma sırasında düzgün hızda akışının sağlanması önemli bir işlemdir. Üretilen yazıcıda, seramik malzemenin akışkan hale getirilip parça yazdırılması için şırınga sistemi kullanılmıştır. Bu şırınga sistemi plastik bir plaka üzerine yerleştirilmiş ve taşıyıcı kollara sabitlenmiştir. Şırınga sisteminde, malzemenin düzgün hızda akması için malzemenin akışı kompresör yardımıyla sağlanmış ve basıncı kontrol edilerek hız kontrolü yapılmıştır. Şırınganın uç kısmına nozıl eklenmiş ve malzemenin hızla akması engellenmiştir. Şırınga sisteminde kompresör kullanıldığı için herhangi bir hava kaçağına neden olmamak için sızdırmazlığı tam olarak sağlanmıştır. Baskı için kil-su-etil alkol karıştırılarak hammadde hazır hale getirilmiştir. Hammadde hazırlanırken 330gr kil malzemeye 115gr su eklenmiştir. Karışıma 5gr etil alkol ekleyerek hammaddenin tabla üzerine yapışması sağlanmıştır. Şekil 10’da kullanılan şırınga sistemi ve bağlantı şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 9. Yataklama ve plastik taşıyıcı aparat



Şekil 10. Şırınga sistemi ve bağlantı şekilleri.

Yazıcının tahrik sistemi 12V 30A güç kaynağı kullanılarak sağlanmıştır. Ayrıca yazıcı kontrolü için Arduino Mega 2560 ve Ramps 1.4 kontrol kartları kullanılmıştır. Eksen hareketleri lineer rulmanlara verilmiş ve hareket organı olarak indüksiyon kaplı krom miller seçilmiştir. Şekil 11'de kullanılan güç kaynağı ve kontrol kartları bağlantıları ile birlikte gösterilmiştir.

Üretilen yazıcıda 12V ile çalışan 220mm çapında ısıtıcı tabla kullanılmıştır. Kullanılan ısıtıcı tabla PCB Heat-bed MK2Y modelidir. Isıtıcı tabla yazma işlemi esnasında akan hammaddenin yüzeye yapışması için, yazım işlemi biten parçanın da kuruması için kullanılmıştır. Şekil 12'de kullanılan ısıtıcı tabla gösterilmiştir.



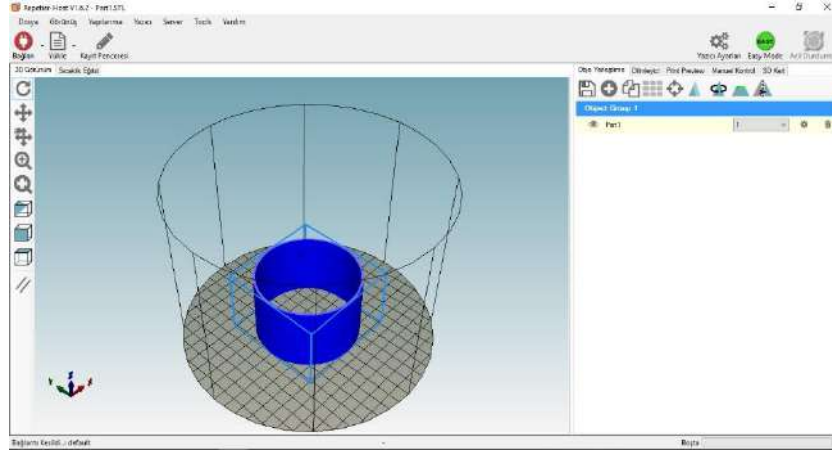
Şekil 11. Güç kaynağı ve kontrol kartları



Şekil 12. Isıtıcı tabla

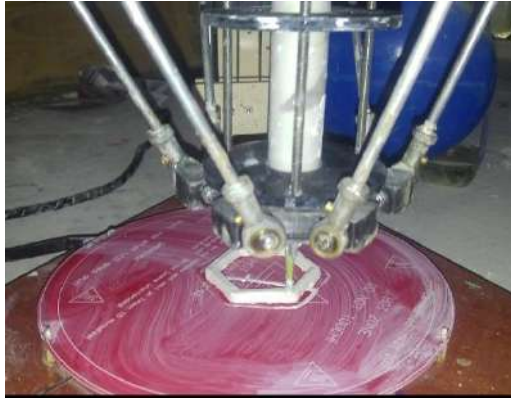
5.2. Yazdırma Deneyleri

Prototipi üretilen yazıcının kontrolü için bilgisayar bağlantısı Repetier Host programı kullanılarak yapılmıştır. Bilgisayar ortamında katı model olarak tasarlanan modeller, STL dosya formatına çevrilerek, Repetier Host programına gönderilmiştir. Repetier Host programında, katı model olarak gönderilen parça, Slic3r kullanılarak katmanlara ayrılarak dilimleme işlemi yapılmıştır. Nozıl uç çapı, malzeme akma çapı, yazdırma hızı, doluluk oranı gibi parametreler girilerek, ürün yazdırılması için gerekli olan kodlar elde edilmiştir. Şekil 12'de Repetier Host programı ara yüzü ve parça dilimlemesi gösterilmiştir.



Şekil 12. Repetier Host ara yüzü ve dilimleme işlemi

Parça yazdırmak için kullanılacak hammadde, beyaz kil, su ve etil alkol karışımı ile elde edilen çamur kıvamına getirilmiştir. Çamur kıvamına getirilen malzeme şırınga sistemine konulmuştur. Kompresör ile şırınga sistemi içerisinde bulunan malzemenin akışkanlığı ve akış hızı kontrol edilmiştir. Bu ayar 3B yazıcının yazdırma hızı, doluluk oranı ve malzemenin viskozitesine bağlı olmakla birlikte, malzemenin uygun viskozitesi ayarlanmadığında, ürün kalitesinde hatalar, ölçü tamlığında sapmalar, yazdırma işleminde gecikme gibi problemler meydana gelmektedir. Şekil 13’de akışkanlığı ve akış hızı düzgün çamur malzemenin yazdırma anı gösterilmiştir. Şırınga içerisinde malzeme konulduğu zaman, boşluk kalmaması gerekmektedir. Aksi takdirde, yazdırma işlemi sırasında, piston şırınga içerisindeki malzemeyi ittiğinde hava boşlukları, parça üzerine püskürtme yapmakta ve malzemenin şekil ve dayanımında hatalar meydana gelmektedir. Şekil 14’de hava kabarcıkları yüzünden meydana gelen yazdırma hatası gösterilmiştir.



Şekil 13. Çamur kıvamındaki malzemenin yazdırma anı



Şekil 14. Hava kabarcıklarının etkisi

Farklı parametreler ile yazdırma deneyleri yapılmış ve seramik malzeme ile en iyi yazdırma parametreleri belirlenmiştir. Yazdırma işleminde en iyi sonuç için farklı kalınlıklarda nozıl uç, yazdırma hızı, tabla sıcaklığı ve malzemenin akış hızı parametreleri sırayla değiştirilerek yazdırma deneyleri yapılmıştır. Nozıl uç için 4mm, 3mm, 1.6mm ve 1.2mm kalınlığında ki uçlar denenmiş ve en iyi sonucu 1.6mm kalınlığında ki nozıl uç ile elde edilmiştir. Yazdırma hızı 900 mm/dk seçilmiş ve tabla sıcaklığı 30-50°C arasında belirlenmiştir. En iyi akış hızı 0.9-2 bar arasında elde edilmiştir. Şekil 15’de farklı parametreler ile yazdırılmış örnek parçalar gösterilmiştir.



Şekil 15. Farklı parametreler kullanılarak yazdırılmış parçalar

6. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, 300x300x700mm eksen boyutlarına sahip, kompresörlü şırınga sistemi kullanılan seramik parça yazdırabilen 3B yazıcının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen yazıcıda, seramik malzemenin akışkan kıvama getirilmesi için en iyi değerler 330gr kil malzeme ve 115gr su karışımına 5gr etil alkol eklenerek elde edilmiştir. Şırınga ekstrüder sisteminin, 3B yazıcıda kullanılmasıyla, toz haldeki seramik malzemenin akışkan kıvama getirilip, parça yazdırılması gerçekleştirilmiştir. Parça yazdırma işleminde, en iyi sonucu 1.6mm kalınlığında ki nozıl uç ile 900 mm/dk yazdırma hızı ve 30-50°C tabla sıcaklığı arasında elde edilmiştir. Akışkan kil-su-etil alkol karışımında 0.9-2 bar arasındaki hava basıncı parça yazdırmak için en ideal basınç aralığı olarak belirlenmiştir. Üretilen yazıcı ile, seramik, kil gibi toz haldeki malzemelerin, belirli oranlarda karışımlar hazırlanarak akışkan-yarı akışkan hale getirilmesi ile endüstri ve sanatsal uygulamalarda kullanılabilirliği gösterilmiştir.

REFERANSLAR

- [15] ÇELİK, İ., KARAKOÇ, F (2013) "Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları" . Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı :31 s: 53-70
- [16] Hull, C. W. (2015). The Birth of 3D Printing. Research-Technology Management, 58(6), s: 25.
- [17] <http://unfold.be/pages/about> (Erişim Tarihi: 15.11.2015)
- [18] KEEP, Jonathan "Make Your Own 3D Delta Printer For Ceramic" . http://www.keep-art.co.uk/Self_build.html
- [19] idil, 2015, Cilt 4, Sayı 18 - Volume 4, Number 18
- [20] Alain Curodeau, Emanuel Sachs, Salvatore Caldarise, "Design and fabrication of cast orthopedic implants with freeform surface textures from 3-D printed ceramic shell", Journal of Biomedical Materials Research, Volume 53, Issue 5, Pages: 525-535, September 2000.
- [21] Hermann Seitz, Wolfgang Rieder, Stephan Irsen, Barbara Leukers, Carsten Tille, "Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering", Journal of Biomedical Materials Research, Volume 74B, Issue 2, Pages: 782-788, August 2005
- [22] J. Suwanprateeb, R. Sanngam, W. Suvannapruk, T. Panyathanmaporn, "Mechanical and in vitro performance of apatite-wollastonite glass ceramic reinforced hydroxyapatite composite fabricated by 3D-printing", Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Vol. 20, Pages: 1281-1289, June 2009.
- [23] B. Leukers, H. Gülkan, S.H. Irsen, S. Milz, C. Tille, H. Seitz, M. Schieker, "Biocompatibility of ceramic scaffolds for bone replacement made by 3D printing", Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Volume 36, Issue 12, Pages: 781-787, December 2005.

3D YAZICI DESTEKLİ TASARIMDAN MODERN ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNE: SANTRİFÜJ POMPA ARAŞTIRMASI

Serap ÇELEN^a

a, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir/TÜRKİYE,
serap.celen@ege.edu.tr

Özet

İmalat endüstrisinde, üç boyutlu yazıcıların kullanımları ürünün morfolojik tasarımına olanak sağlayan net-şekilli üretim kabiliyetleri sebebiyle her geçen gün artmaktadır. Santrifüj pompalar akışkanların taşınmasında kullanılan ve genellikle döküm yöntemi ile imal edilen makinalardır. Döküm çok eski çağlardan beri kullanılan bir üretim yöntemi olup, kalıp, model ve maça yapımı gerektirdiğinden maliyet ve zaman dezavantajlarına sahiptir. Kritik makina elemanlarının üç boyutlu baskısı tasarım, fonksiyon ve performanslarının gerçek üretim öncesinde kontrolüne olanak sağlamaktadır. Bu araştırma kapsamında, üretim zamanlarının kısaltılması amacıyla farklı bir 3D pompa tasarımı gerçekleştirilmiş, geleneksel yöntemlerle imalat ile karşılaştırması yapılarak üç boyutlu baskı yönteminin modern imalat teknolojilerindeki faydalı rolü vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: 3D yazıcı destekli tasarım, morfolojik tasarım, pompa imalatı

FROM 3D PRINT-AIDED DESIGN TO MODERN MANUFACTURING METHODS: AN INVESTIGATION FOR A CENTRIFUGAL PUMP

Abstract

In manufacturing industry, the usage of 3D print has been increased due to its unique advantages such as net-shape production which enables morphological product design. Centrifugal pumps have been manufactured with casting methods and they are used to transport liquids. Although casting has been used from ancient ages, it has cost and time disadvantages due to the requirement of model, core and mold making processes. 3D print of critical machine parts enables to control of their designs, functions and performances before the manufacturing. In the scope of this investigation, a novel 3D pump design was performed, a comparison has been made with traditional manufacturing methods to shorten the production time and the beneficial role of 3D printing technology was emphasized for modern manufacturing methods.

Keywords: 3D print-aided design, morphological design, pump manufacturing

1. Introduction

Although 3D printing technologies were developed in 1980s, their first usage was seen in 2000s for the net-shape manufacturing of parts due to the some limitations such as material, process time, production cost and intolerable surface roughness. Today their usage can be considered as a revolution for the science of manufacturing from an economical viewpoint [1].

Centrifugal pumps are widely used machines to conduct both the kinetic properties and the movement of the liquids. Their components are the shaft of the pump, bearing housing, casing and impeller. Impeller is the heart of the pump because it determines the flow path of the liquid to perform required energy transfer [2]. It is difficult to estimate actual flow conditions due to the complex structure of the systems such as cavitation physics and turbulence [2, 3]. There are many investigations to design novel impellers. Impeller has four sections such as the front and rear shroud, the hub and the blades. Fluid should be accelerated with appropriate incidence in the impeller inlet to prevent local drops of pressure to prevent cavitation failure. Although inlet and hub diameter has an effect on this failure, morphological design of the blade's pressure and suction surface has the most important role because it determines the total energy transfer to the accelerated fluid [2].

In fact, the development of computer-aided design and calculation systems for pump studies increased for thirty years [3]. In 2000s, fluid flow models were adopted to calculate the performance of the pumps [4]. In

2001, Benra proposed a numerical theory to find optimum impeller morphology for centrifugal pump [5]. Some 2D and 3D mathematical algorithms were adopted to estimate the performance of the pump in steady state conditions [6, 7]. Spence and Amaral-Teixeria investigated the effect of clearances of pump components on pressure variations to prevent the failure of the pump [8, 9]. In 2011, Barrio et al used Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (3D-URANS) to estimate the effect of flow rate on the radial road which was occurred on the impeller for unsteady conditions [10]. Recently other contributions have been made to observe the actual performance of the pump [11-13].

Although some programs were developed to estimate actual flow conditions with using different models and equations, there is a need alternative rapid production methods. In 2016, 3D printed centrifugal fan impeller was reported to test its performance [14]. Thus 3D print of a centrifugal pump impeller will be beneficial. The aim is the present investigation to report the beneficial role of 3D printing method for facilitating the production stage of a centrifugal pump to shorten the total production time. For this reason time and cost management concept was emphasized instead of functional and technical details of the pump from an industrial viewpoint.

2. Material and Method

2.1. Mathematical Principles of Hydraulic Design

Before the experimental set-up section, theoretical background will be beneficial. Hydraulic design is a complex concept which includes gradual design steps which based on the experience. Main components of a centrifugal pump are volute, impeller and casing. Impeller has four important sections such as the front and rear shroud, the hub and the blades. Design of the blade's pressure and suction surface has an important role on the energy transfer. The main purpose of the flow calculation is to calculate the overall dimensions and morphology of the impeller. There are many geometric parameters such as blade number, blade angle, blade twist morphology, outlet width, channel width etc... Also the blade angle has an important role for sufficient suction capacity. In the literature, even it was emphasized that wrong machining tolerances of the blade's leading edges led cavitation problems. Thus before the real design of the radial impeller, required calculations should be made. The calculation principle of the flow is based on the one dimensional theory-Euler's equation with ignoring some complicated flow conditions. High precision force and angle calculations should be made to estimate the balance of the angular momentums which impacted on the impeller surfaces [2].

There are some calculation models such as cascade, channel and airfoil models [2, 15, 16]. Generally velocity vectors and incidences are found with using cascade model. Whole geometrical parameters should be chosen to design the radial impeller such as shaft diameter, inlet and outlet diameters of the impeller, blade number, impeller blade angles, outlet width, outlet angle, blade thickness, blade leading edge profile, blade trailing edge profiles, blade loading, throat area to achieve required quantities (n, Q, H) [2].

The calculation of the velocity triangle at the impeller inlet and outlet are important. Circumferential speed can be calculated with Equation 1. Related nomenclature was given in Table 1 [2].

$$u_1 = \frac{\pi d_1 n}{60} \quad (1)$$

Meridional and circumferential component of the velocities are estimated with using Equation 2 and Equation 3 [2].

$$c_{lm} = \frac{Q_{La}}{A_1} \quad (2)$$

$$c_{lu} = \frac{c_{lm}}{\tan \alpha_1} \quad (3)$$

Flow angle with blockage is calculated with Equation 4 [2].

$$\beta'_1 = \arctan \left(\frac{c_{lm} \tau_1}{u_1 - c_{lu}} \right) \quad (4)$$

The blade inlet angle is found with Equation 5 [2].

$$\beta'_1 = \beta'_1 + i'_1 \quad (5)$$

Table 1. Nomenclature [2]

Physical Properties	Symbol	Unit
Circumferential Speed	U1	m/s
Meridional Component of the Velocity	clm	m/s
Circumferential Component of the Velocity	clu	m/s
Impeller Inlet Diameter	d1	m
Rotational Speed	n	RPM
Flow Rate through Impeller	QLa	kg/S
Area of the Impeller Inlet	A1	m ²
Flow Angle with Blockage	$\beta'1'$	°
Flow Angle with incidence	$\beta'1B$	°
Vane Angle	λLa	°
Number of Impeller Blades	zLa	-
Vane Thickness	e1	m
Blade Blockage	$\tau 1$	-
Incidence	i1	°
Approach Flow Angle	α_1	°

2.2. From 3D

Design to Two Manufacturing Methods: 3D Print and Classical Casting

Impellers, diffusers and volute castings are generally manufactured with using traditional casting methods due to their complex surfaces. CNC-milling is another method to made pump components. In the present study, the approach flow angle (α_1) was used as 90°. The blade number was chosen as 5 to prevent noise and vibrations due to high pressure situation. Designed 3D impeller can be seen in Figure 1. Impeller was manufactured with using a 3D printer. (Figure 1) ABS material was chosen because of the strength requirement. Process parameters were given in Table 2.

Table 2. Parameters of 3D printing machine which were used to manufacture impeller

Printer Model	Da Vinci PRO XYZ Printing
Nozzle Diameter	0,4 mm
Material Diameter	1,75 mm
Printing Temperature	210 °C

Table Temperature	90 °C
Printing Speed	30 mm/s
Layer Thickness	0,3 mm
Fill Factor	% 100
Head Number	1
Printing Geometry	Honeycomb*
Total Process Time	30 hour

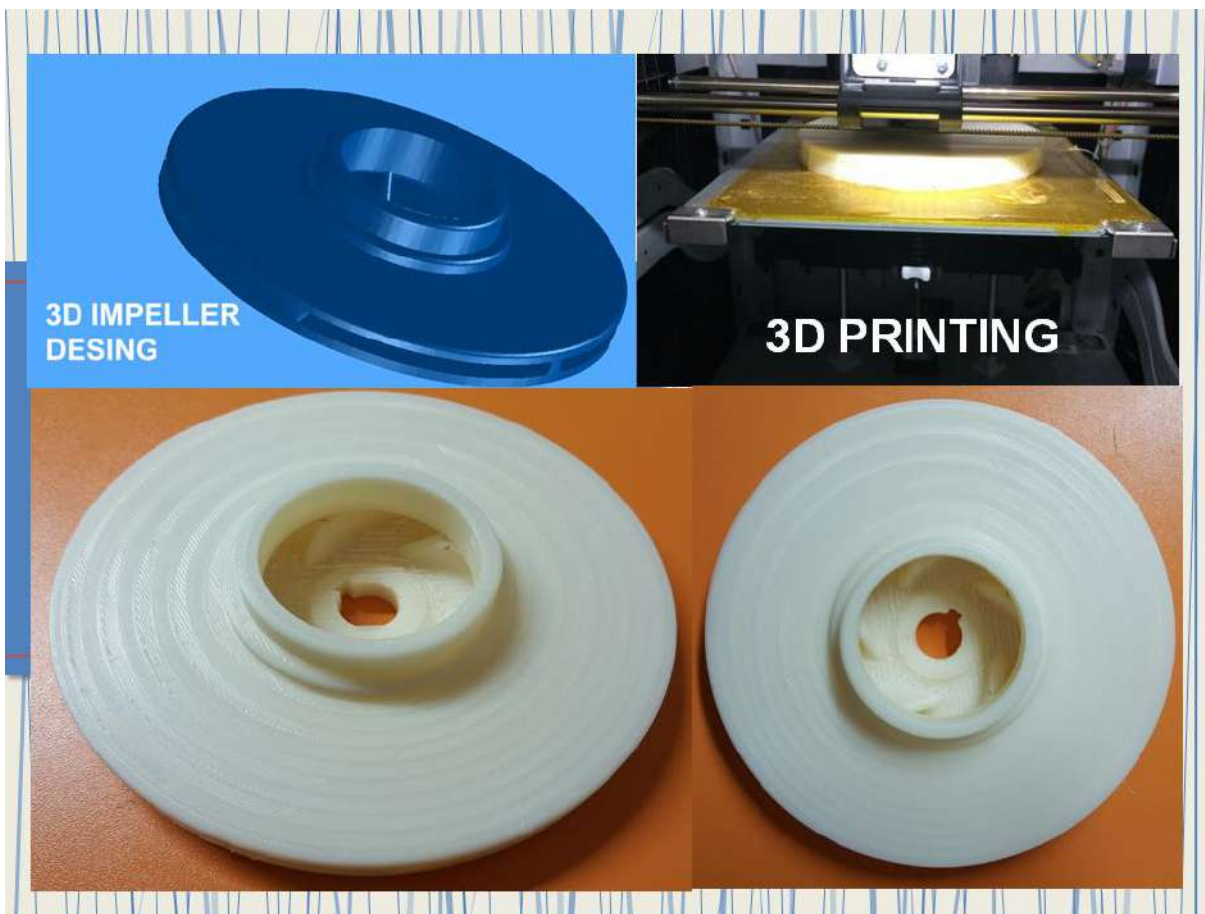
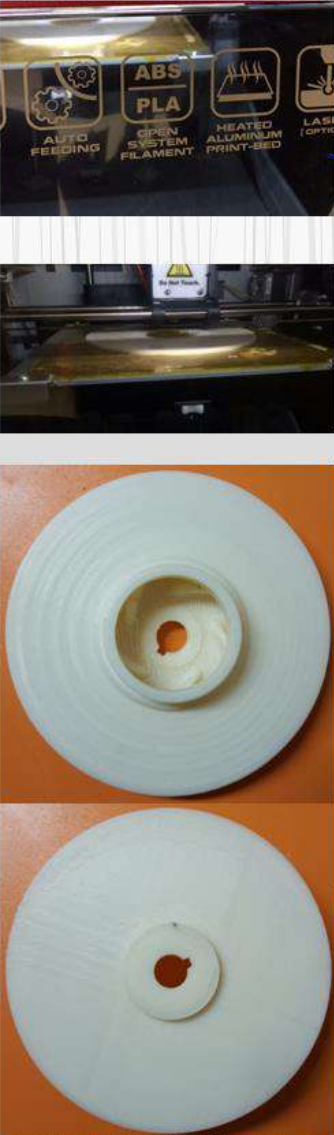


Figure 1. 3D impeller design and 3D printed ABS impeller

3. Results and Discussion

Nowadays, production time gained importance as much as the quality of the production in the industry. Thus companies should be carefully chosen manufacturing methods with the aid of net-shape engineering. 3D print is a key technology to achive this purpose. In this investigation, the role of this additive manufacturing method was proved with reduced production time. A comparison between 3D print and traditional manufacturing technology for the impeller was given in Figure 2. When traditional manufacturing time was estimated as 288 hour, production time with using of 3D printer was observed about 31 hour. Also it reduced the total cost about 95,45% with eliminating difficult manufacturing operations.



3D PRINT	Process Time	SAND CASTING	Process Time	Short Time
Material Selection	10 min	Material Selection	60 min	
Software Setting	5 min	Core Making (Material Supply & CNC Process)	2160 min	
Verifying File Transfer	1 min	Pattern Making (Material Supply & CNC Process)	14400 min	
Adjusting Parameters	1 min	Preparation of sand Mold Prep.	35 min	
3D Production	1800 min	Casting	5 min	
3D Print Total	1817 min	Casting Total	16680 min	
Post Processing Steps	30 min	Post Processing Steps	600 min	
Dimensional Inspection	15 min	Dimensional Inspection	15 min	
		Casting NDT Cont.	10 min	
Total	1862 min 31 h		17285 min 288 h	15423 min 257 h

Figure 2. An Industrial Benchmark for the two different manufacturing methods

4. Conclusions

In conclusion, 3D additive manufacturing technology was formed a backbone with its following advantages.

- Formed a strong bridge as an alternative manufacturing method for critical machine parts.
- Shorten the total process time of the 3D designed impeller.
- Reduced the cost of product.

Acknowledgement

The author expresses her sincere thanks to ICON Machinery and Motorcular Ltd.

References

- [1] Rayna, T. and Striukova, L., From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation, *Technological Forecasting & Social Change*, 102, 214–224, 2016.
- [2] Gülich, J.F., *Centrifugal Pumps*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] Shah, S.R., Jain, S.V., Patel, R.N., Lakhera, V.J., CFD for centrifugal pumps: a review of the state-of-the-art, *Procedia Engineering*, 51, 715-720, 2013.
- [4] Baumgarten, S. and Müller T., Computer aided impeller optimization, *Elsevier World Pumps*, 28-31, 2000.
- [5] Benra, F.K, Economic development of efficient centrifugal pump impellers by numerical methods, *Elsevier World Pumps*, 48-53, 2001.
- [6] Stepanoff, A.J., *Centrifugal and axial flow pumps*, John Wiley, New York, 1957.
- [7] Anagnostopoulos, J.S., A fast numerical method for flow analysis and blade design in centrifugal pump impellers, *Computers&Fluids*, 38, 284-289, 2009.
- [8] Spence, R. and Amaral-Teixeira J., A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump, *Computers&Fluids*, 38, 1243–1257, 2009.
- [9] Spence, R. and Amaral-Teixeira J., Investigation into pressure pulsations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial tests, *Computers&Fluids*, 37, 690-704, 2008.
- [10] Barrio, R., Fernandez, J., Blanco, E. and Parrando, J., Estimation of radial load in centrifugal pumps using computational fluid dynamics, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 30, 316–324, 2011.
- [11] Wu, D., Wang, L., Hao, Z., Li, Z., Bao, Z., Experimental study on hydrodynamic performance of a cavitating centrifugal pump during transient operation, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24, 2, 575-582, 2010.
- [12] Pei, J., Yuan, S., Yuan, J., Wang, W., The influence of the flow rate on periodic flow unsteadiness behaviors in a sewage centrifugal pump, *Journal of Hydrodynamics*, 25, 5, 702-709, 2013.
- [13] Kikuyama, K., Hasegawa, H., Maeda, T., Unsteady pressure change in centrifugal pump impeller passages due to inlet swirl, *Journal of Fluids and Structures*, 6, 3, 337-351, 1992.
- [14] Abbit, J. and Lowry, S., Implementing the Digital Design Process for the Development of a Centrifugal Fan Impeller in the Undergraduate Engineering Curriculum, *Procedia Manufacturing*, 5, 1119–1127, 2016.
- [15] Pfleiderer, C., *Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase*, 5th Ed., Springer Verlag-Berlin, 1961.
- [16] Stepanoff, A.J., *Radial- und Axialpumpen*, Springer Verlag-Berlin, 1959.

3 BOYUTLU YAZICILARDA KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANILMASI

Burak Emre YAPANMIŞ^a, Berat Barış BULDUM^b, İbrahim SEVİM^c

^aMersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin/ TÜRKİYE, burakemreya-panmis@gmail.com

^bMersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin/ TÜRKİYE, barisbul-dum@mersin.edu.tr

^c Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin/ TÜRKİYE, ibrahimse-vim33@gmail.com

ÖZET

3 boyutlu yazıcı teknolojisi, bilgisayar yardımlı mühendislik programları aracılığıyla tasarımlarımızı kolayca hayata geçirebilmemize olanak sağlamaktadır. Tasarımlarımızı hayata geçirirken farklı baskı yöntemleri kullanabileceğimiz gibi metal, plastik, seramik malzemeler gibi birden fazla hammadde kullanmakta mümkündür. Bu hammaddeler tasarım amacımıza, ürünün kullanılacağı yere ve kuvvet taşıma durumuna göre belirlenmektedir. Bazı durumlarda malzemelerden hem gevrek hem de sünek davranış beklenmektedir. Bu üç malzemenin de yetersiz olduğu bu gibi durumlarda kompozit malzemeler önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcı teknolojisinde kullanılan kompozit malzemeler araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: kompozit malzemeler, 3B yazıcı teknolojisi, katmanlı üretim

USE OF COMPOSITE MATERIALS ON 3 DIMENSIONAL PRINTERS

Abstract

3D printer technology allows us to put into practice our designs through computer-aided engineering programs. We can use different printing methods when we put into practice our designs, and it is possible to use more than one raw material such as metal, plastic, ceramic materials. These raw materials are determined according to the purpose of our design, the place where the product is to be used and the force carrying. In some cases both brittle and ductile behavior is expected from the materials. Composite materials have an important role in these situations that these three materials are inadequate. In this study, composite materials, which used in 3D printer technology, were investigated.

Keywords: composite materials, 3D printer technology, additive manufacturing

1. GİRİŞ

3 boyutlu (3B) yazıcılar, bilgisayar ortamında çizilen katı modelleri hızlı ve kolay bir şekilde somut hale getirirler. Bilinen ilk 3B yazıcı hakkındaki çalışmalara 1980'li yılların başında başlanılmıştır. 1981 yılında Hideo KODAMA tarafından enine kesit dilimli katmanlı bir katı model yazdırma işlemi gerçekleştirilmiştir [1]. Aynı yıl patent çalışmasına da başvurmuş fakat yarım kalmıştır. 3 yıl sonra bugünkü 3D Systems firmasının kurucusu olan Chuck Hull tarafından ilk 3B yazıcı üretilmiş ve patenti alınmıştır [2]. Stereolitografi teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen bu yazıcı Hull'un günümüzde halen kullandığımız dijital dilimleme ve dolgu stratejilerine bir armağandır. 1988 yılında 3D Systems Şirketi genel kullanım amaçlı üretilen ilk yazıcı olan SLA-2502'yi piyasaya sürmüştür. 1988 yılında ise sektörün öncü 3B yazıcı firmalarından birisi olan Stratasys kurucusu Scott Crump tarafından geliştirilen Fused Deposition Modeling (FDM) "Ergitmeli Model Yığma" teknolojisi icat edilmiştir [3]. Teksas Üniversitesi'nde çalışan Carl Deckard, 1987'de ABD'de Selective Laser Sintering (SLS) "Seçici Lazer Sinterleme" yöntemi için patent almıştır [4]. 1993 yılında iki boyutlu yazıcılarda kullanılan bir yöntem olan inkjet teknolojisinden esinlenilerek renkli baskı yapmaya olanak sağlayan 3 Dimensional Printing (3DP) "3 Boyutlu Yazıcı" Massachusetts Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir[5]. 1995 yılında MIT'ye lisans ücreti ödenerek ZCorporation firması tarafından 3B yazıcıların satışı yapılmaya başlanmış ve aynı firma tarafından 1996 yılında ilk yüksek çözünürlükte baskı yapabilen üç boyutlu yazıcıyı tasarlamıştır [6]. 2007 yılında Reprap adıyla birçok ev kullanıcısına 3B yazıcı sahibi olmasını ve 3B yazıcıların yaygınlaşmasını sağlayan ilk açık kaynaklı 3B yazıcı projesi başlamıştır [7]. 2008 yılında Object Geometries Şirketi, Connex500 ile aynı anda farklı malzemeler kullanarak ürün üretebilmiş, 2009 yılından itibaren ise Makerbot

ve 3D Systems'in geliştirmiş olduğu sade modeller sayesinde ev tipi üç boyutlu yazıcıların satışları artmaya ve kullanımı yaygınlaşarak gündelik hayata girmeye başlamıştır [8,9].

Hızlı prototipleme, katmanlı üretim, ya da katı form verme olarak bilinen 3B baskı; bilgisayar ortamında 3B modelleri verilen nesnelerin genellikle katman katman birleştirme prosesidir [10]. Bu süreç Solidworks, Catia, 3D AutoCad gibi bilgisayar yardımlı dizayn (CAD) programları kullanılarak CAD dosyasının oluşturulması ile başlar. Oluşturulan CAD dosyalarını yazdırma programları tanıyabilmesi için Surface Tessellation Language (STL) formatına dönüştürülür. Belirlenen katman kalınlığına göre STL dosyası dilimlere ayrılır. Her dilim modelin o katmanındaki kesit alanını temsil etmektedir. Kesitlere ayrılan model kullanılan 3B baskı tekniğine göre inşaa edilir. Baskı sırasında tabla genellikle z yönünde nozül ise x, y yönlerinde hareket eder. Son işlem olarak parça makinadan çıkartılır ve gerekli işlemler temizleme, boyama vb. yapılır.

Hızlı, ucuz ve kolay bir şekilde istenilen modelleri üretilmesinin yanı sıra farklı türdeki malzemelerin seçilebilme özelliğinden dolayı 3B yazıcılar; havacılık [11], otomotiv [12], mimari [13], medikal [14], eğitim [15], moda [16], gıda [17] ve inşaat [18] gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 1'de 3B yazıcı teknolojileri kullanılarak farklı alanlarda üretilmiş ürünler gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı endüstrilerde 3B yazıcı uygulamaları

Akrilonitril bütadien stiren (ABS) [19], polilaktik asit (PLA) [19], poliamid (PA) [20] ve polikarbonat (PC) [21] gibi termoplastik polimer; epoksi reçineler gibi termoset polimer malzemeler bunun yanı sıra kobalt, krom, titanyum gibi metal malzemeler ve seramik malzemeler de 3D baskı teknolojilerinde kullanılırlar [22]. Saf polimer malzemelerin gelişmiş mukavemet değerlerine sahip olmamasından dolayı, kullanılan 3B basılmış polimer ürünlerin çoğu çekme, basma, eğilme gerilmesi, tokluk gibi mekanik özellikleri düşüktür. Bu tür dezavantajlar 3B basılmış polimerlerin birçok endüstriyel alanda uygulamasını kısıtlamaktadır. Bu problem matris ve takviyeleri kullanılarak tek başına ulaşılamayan birçok yapısal özelliklere olanak sağlayan polimer kompozitler tarafından ortadan kaldırılmaktadır [22-23].

Yüksek mekanik özelliklerine sahip polimer kompozitler, polimer malzemelere birleştirici parçacıklar, lifler veya nanomalzemeler ilave edilerek oluştururlar. Döküm, kalıplama, presleme gibi geleneksel üretim yöntemleri karmaşık geometriye sahip ürünler üretmeye olanak sağlar. Bu yöntemlerle üretilen kompozitlerin üretim süreci ve performansı iyi kontrol edilmiş olmasına rağmen, karmaşık içyapıyı kontrol etme yeteneği sınırlıdır. 3B yazıcı teknolojileri sayesinde israf olmadan karmaşık kompozit yapıların boyutu ve geometrisi, bilgisayar destekli tasarım yardımıyla tam olarak kontrol edilebilir. Böylece kompozitlerin mükemmel proses esnekliği ve yüksek performanslı ürün kombinasyonuna ulaşır [22].

Üç boyutlu baskı son otuz yıldır dikkatleri üzerine çekmiş olmasına rağmen yayınlanan makalelerinin birçoğu işleme tekniklerinin tanıtılması ve saf polimer malzemelerin basımı üzerinde durmuştur. Bunun yanı sıra, son yıllarda geliştirilmiş performansa sahip yazdırılabilir polimer kompozitleri geliştirmede önemli başarılar olmuştur [22]. Bu çalışmada 3B baskı teknolojisinde polimer kompozitler üzerine yapılmış daha önceki çalışmalar sunulmaktadır.

2. 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ

Kullanılan 3B yazıcılar hammadde sınıfına göre katı, sıvı ve toz esaslı olarak 3 gruba ayrılabilir. Polimer kompozit üretimi için birden çok yazdırma tekniği mevcuttur. Bunların arasında ergiyik birikimli modelleme (FDM-fused deposition modeling), seçici lazer sinterleme (SLS- selective laser sintering), inkjet 3B yazıcı (3DP-inkjet 3D printing), Stereolitografi (SLA-stereolithography) sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Kullanılan her tekniğin kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. İmalat tekniği; başlangıç malzemesine, işleme hızına ve çözünürlüğüne, nihai ürünlerin maliyet ve performans gereksinimlerine bağlıdır olarak seçilir [22]. Bazı 3B yazıcı teknolojilerinin karşılaştırılması Çizelge 1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Sıklıkla kullanılan 3B yazıcı teknolojilerinin karşılaştırılması[12]

Yöntem	Başlangıç malzeme durumu	Kullanılan malzeme	Çalışma prensibi	Avantaj/Dezavantaj
FDM	Filament	ABS, PA, polietilen(PE), PLA, polikarbonat (PC), polipropilen (PP)	Ekstrüzyon ile yığma	Ofis ortamında kullanılabilir. Üretim maliyeti düşük, hızlı. Küçük parçalarda, detay bölgelerde ve ince kesitlerde çok iyi değildir.
SLA	Sıvı fotopolimer	Reçine bazlı malzemeler, akrilik, epoksi, polipropilen	Fotopolimer malzemenin UV ışını ile katılaştırma	Yüksek doğrulukta parça üretimi için tercih edilir, renklendirme yapılabilir, Yaygın kullanılır, parçalarda çarpılma ve büzülme olabilir.
SLS	Toz	Poliamid, polistren, karbon fiber ve alüminyum katkılı poliamid, polikarbonat, paslanmaz çelik,kobalt krom,nikel krom,titanyum, seramik	Lazer tarama ve ısı tahrikli sinterleme	Geniş bir ürün yelpazesine hitap eden verimli ve hızlı bir imalat yöntemidir, Prototip kalıp üretim maliyeti düşüktür ve çok miktarda parça üretebilir, malzeme değişimi zordur.
3DP	Toz	Yüksek performanslı kompozit	Bağlayıcı ile Toz Bağlama ve Kurutma	Hızlı, ucuz, ofis ortamında kullanılabilir, kullanımı kolay, karmaşık modeller üretilebilir, renklendirme mümkün, parçalar kırılabilir.

2.1. Ergiyik Birikimli Modelleme (FDM)

FDM polimer kompozitlerin basımında kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntemde PC, ABS, PLA gibi termoplastikler düşük ergime sıcaklıkları nedeniyle sıklıkla kullanılırlar. FDM yazıcıların çalışma prensibi Şekil 2 a’da gösterildiği gibi filamentler tarafından kontrol edilerek tabla üzerine basılır. Nozul plastiği ısıtarak yarı sıvı hale getirir ve plastik nozulden çıktıktan sonra hemen sertleşerek aşağıdaki katmana yapışır. Daha sonra platform aşağıya inerek bu işlem ürün tamamlanana kadar devam eder. Katman kalınlığı, yazdırma oryantasyonu, boşluk alanlar gibi baskı parametreleri değiştirilerek baskı kalitesi iyileştirilebilir [12,22].

FDM yönteminin genel bir dezavantajı, kompozit materyallerin ekstrüzyon işlemine uygulanabilmesi için filament formunda olması gerekmektedir. Takviyeleri filament içerisinde homojen olarak dağıtmak ve kompozit filamentlerin imalatı sırasında oluşan boşluğu kaldırmak oldukça zordur. FDM yazıcılarının bir diğer dezavantajı ise uygun viskoziteye sahip kullanılabilir malzemelerin termoplastik polimerlerle sınırlı olmasıdır. Ayrıca, yazdırma sırasında kullanılan destek yapısının tamamen çıkarılması zor olabilir. Bu dezavantajlara rağmen, FDM yazıcılar düşük maliyetli, yüksek hız ve basitlik gibi avantajlar da sunmaktadır. FDM baskısının diğer bir avantajı, çeşitli malzemelerin aynı anda biriktirilmesine olanak sağlama potansiyeline sahip olmasıdır. FDM yazıcılarda farklı malzemelerin yüklenmesine sahip çoklu ekstrüzyon memeleri kurulabilir, böylece baskılı parçalar tasarlanmış bileşimle çok fonksiyonlu olabilir [22].

2.2. Stereografi (SLA)

SLA yöntemi bir tank içine doldurulmuş fotopolimer sıvı reçinenin yüzeyinde yazılımla dilimlenmiş kesitlere karşılık gelen kısımların UV lazer ile kürlenmesi işlemidir. İşlenen katman katılaştıktan sonra platform katman kalınlığı kadar aşağı iner ve sertleşmemiş reçine tabakası işlenmeye hazır olur. SLA yönteminin çalışma prensibi Şekil 2 b'de gösterilmiştir. Tipik olarak kullanılan polimer matris epoksi reçine ve akriliktir [22].

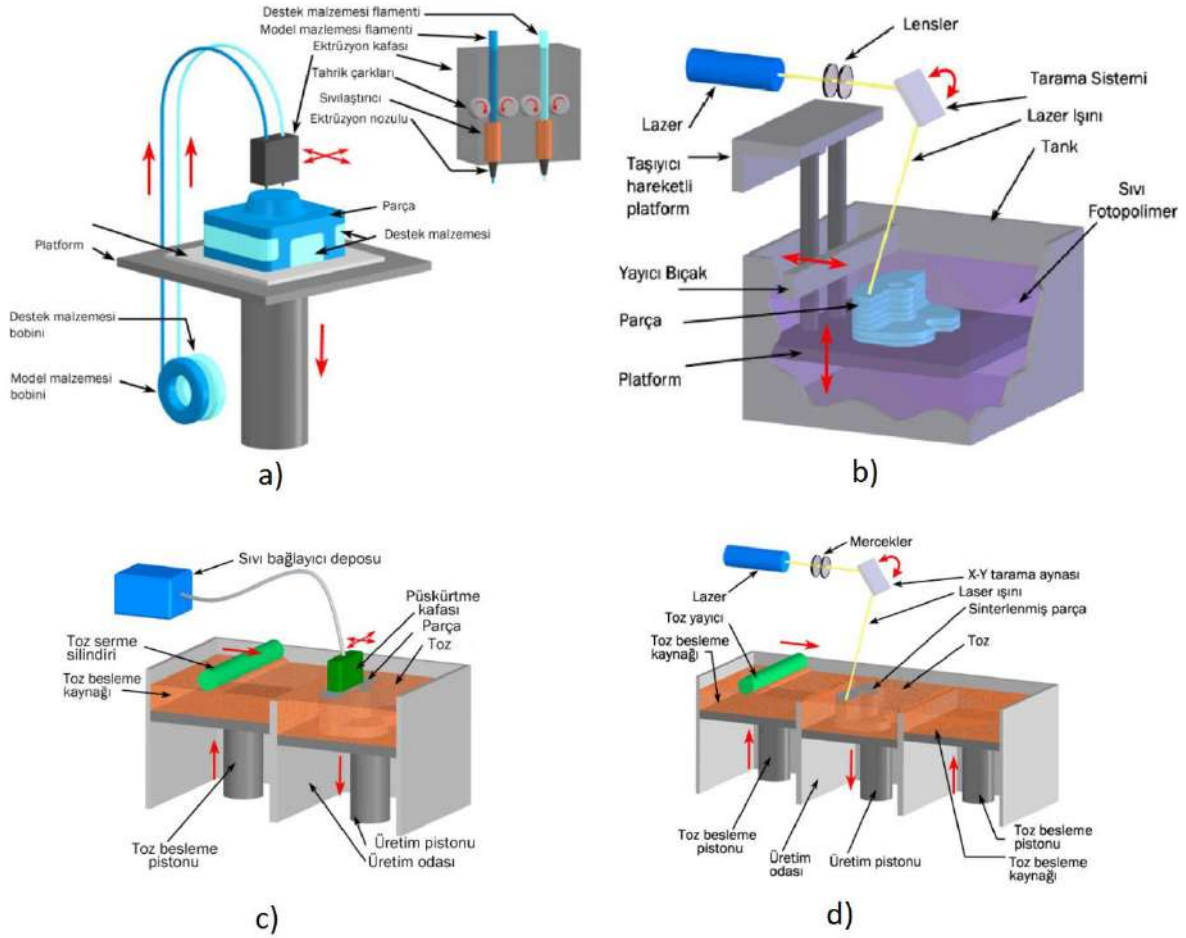
Lazer gücünün yoğunluğu, tarama hızı ve maruz kalma süresi, sertleştirme süresini ve baskı çözünürlüğünü etkiler [24]. Polimerizasyon derinliğini kontrol etmek için foto-başlatıcılar ve UV emicileri reçineye eklenebilir [25]. SLA baskı teknolojisinin temel avantajı, parçaları yüksek çözünürlükte basma yeteneğidir. Buna ek olarak, SLA nozul kullanmadan uygulanan bir teknik olduğundan, nozul tıkanma olasılığı yoktur. Bu avantajlara rağmen, bu sistem oldukça yüksek maliyetli bir yöntemdir.

2.3. Inkjet 3B yazıcı (3DP)

Bu yöntem x-y doğrultularında hareket edebilen inkjet ucun 3B fiziksel prototip üretim tablasına yığılmış toz katmanını sıvı bağlayıcı yardımıyla katılaştırmasıyla gerçekleşir. İstenilen desen oluşturulduktan sonra platform aşağı indirilir ve bir sonraki toz katmanı yayılarak bu işlem tekrar edilir. Inkjet 3B yazıcı çalışma işlemi Şekil 2 c'de gösterilmiştir. Ürün kalitesi toz boyutuna, bağlayıcı viskozitesine, bağlayıcı ve toz arasındaki etkileşime ve bağlayıcı biriktirme hızı gibi parametrelere bağlıdır. Sağlam prototipler üretmek için parça çok kısa bir süre (birkaç saniye) reçine içine batırılabilir ve 70 ° C ye ayarlanmış bir fırında 1-2 saat bekletilir. 3DP prosesinde model malzemesi olarak yüksek performanslı kompozit toz kullanılır [12,22].

2.4. Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Seçici lazer sinterleme tekniği 3DP tekniğine benzer ve her iki yöntemde de toz işleme üzerine kurulmuştur. SLS yönteminde sıvı bir bağlayıcı kullanmak yerine, kontrollü bir yolla bir lazer ışını tozları tarayarak tozların sinterlenmesini sağlar. Bir katman tamamlandığında platform katman kalınlığı kadar aşağı iner ve toz yayıcı mekanizma sayesinde bir katman kalınlığı kadar toz ilave edilir. Bu işlem Şekil 2 d'de gösterildiği gibi her defasında tekrar edilir. Ürün kalitesi toz partikül boyutu, lazer gücü, tarama aralığı ve tarama hızı ile belirlenir. SLS yöntemi poliamid (nylon), polistren, karbon fiber ve alüminyum katkı poliamid gibi plastik malzemeler, paslanmaz çelik, kobalt krom, nikel krom, titanyum gibi metal alaşımları ve doğrudan kalıp için kalıp kumu(alüminyum silikat) gibi seramik malzemeler kullanabilir. Bugüne kadar, polikaprolakton (PCL) ve poliamid (PA) yaygın olarak kullanılan SLS malzemeleridir.



Şekil 2. Şematik gösterim a) FDM yöntemi b) SLA yöntemi c) 3DP yöntemi d) SLS yöntemi

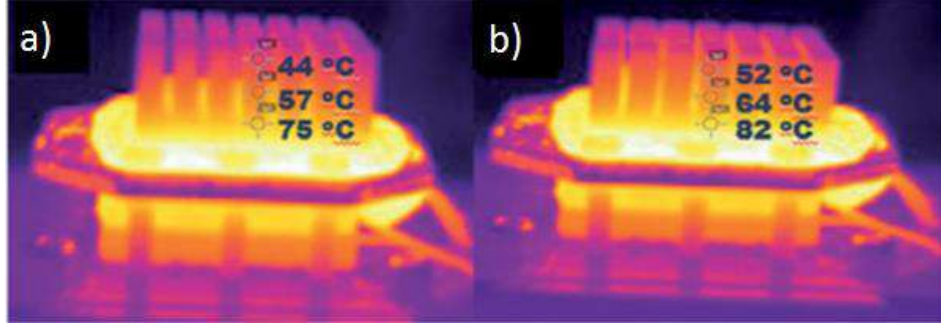
3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN 3B BASIMI

Polimer malzemeler fiyat avantajı ve hafifliklerinden dolayı 3B yazıcı endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. 3B basılmış polimer malzemeler ile karmaşık şekiller elde edilmesine rağmen istenilen mekanik özelliklerinden yoksun olması büyük dezavantajdır. Bu problem farklı malzemelerin bir araya getirilerek istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesiyle çözülmüştür. Bu nedenle, son yıllarda mevcut yazıcılarla uyumlu kompozit malzemelerin geliştirilmesi büyük ilgi görmüştür. Bu tür kompozit malzemeler parçacık, lif veya nanomalzemeler eklenmesiyle elde edilmektedir. Bu çalışmada bu üç takviye malzemeli kompozitler incelenmiştir.

3.1. Parçacık Takviyeli Polimer Kompozitler

Düşük maliyetleri nedeniyle, polimer matris özelliklerini iyileştirmek için polimerlerle kolaylıkla karışabilen parçacık takviyeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler SLS yöntemi için toz formunda, SLA yöntemi için sıvı formda ve FDM yöntemi için filament formunda kullanılırlar. Polimerlere, cam tanecikleri [26], demir ya da bakır [27] parçacıklar eklenerek gelişmiş çekme gerilmesi, alüminyum veya alüminyum oksit (alümina, Al_2O_3) [28] eklenerek gelişmiş aşınma direnci, baryumtitanat ($BaTiO_3$), kalsiyum titanyum oksit ($CaTiO_3$) [29] veya tungsten [30] parçacıkları eklenerek dielektrik (yalıtkanlık) katsayısı yüksek parçacık takviyeli kompozit malzemeler elde edilmiştir.

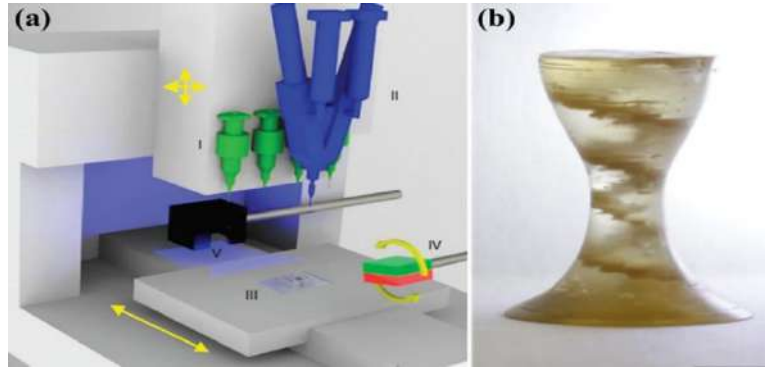
Kalsoom ve arkadaşları [31] Şekil 3'te gösterildiği gibi bir ısı emici kompozit yapının imalatı için SLA tekniğini kullanmışlardır. Bu kompozit yapı akrilat reçine içerisinde %30 oranında mikro elmas parçacıkların karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Isı emiciler 100 °C sıcaklıkta ve 10 dk sürede ısıtıldığında kompozit ısı emicisinin sıcaklığı, saf polimer ısı emicinin sıcaklığına kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir, böylece elmas partikülleri ilavesi ile gelişmiş ısı aktarımı sağlandığı gösterilmiştir. Castles ve arkadaşları [32] FDM tekniği kullanılarak ABS malzemesi içerisine $BaTiO_3$ parçacıklarının eklenmesi ile dielektrik iletkenliğini gözlemişlerdir. Ağırlıkça %70 $BaTiO_3$ eklenen kompozit malzemenin saf polimere kıyasla %240 elektrik direnci sağladığı görülmüştür.



Şekil 3. 3B basılmış a)polimer ısı emici, b)kompozit ısı emici [31]

Parçacıkların polimer malzemelere eklenmesi ile baskı sürecindeki birtakım sorunların çözümüne de yardımcı olur. Örnek olarak FDM baskı işlemi sonrasında ürünler büzülme, bozulmaya uğramaktadır. Bu sorunu metal parçacıklar kullanarak yenmek mümkündür. ABS malzemesi içerisine bakır ve demir parçacıkları eklenerek elde edilen kompozit malzemenin ısı genleşme katsayısını düşürerek basılan parçaların bozulmasını azalttığı görülmüştür [33].

FDM baskı işlemi için bir başka karakteristik ise basılan parçaların anizotropi özelliğe sahip olmasıdır. Basılı parçanın izotropik yükleme koşullarında kullanılması gerekiyorsa, baskı yönüne dik doğrultuda gerilme mukavemetinin daha düşük olacağı bilinmesi gerekmektedir [34]. Termoplastik elastomer (TPE) anizotropik özelliği azaltmada kullanışlı bir katkı maddesidir. Perez ve arkadaşları [35] TPE ile ABS esaslı kompozitler hazırlayıp ve çekme testi uygulamışlar ve iki dikey yöndeki gerilme mukavemeti arasındaki farkın azalmasını göstermişlerdir. Kokkini ve arkadaşları [36] yeni magnetic yardımcı 3B yazıcı platformu geliştirdiler ve polimer matrisi içerisinde miklatılanmış alümina parçacıklarının hareketini kontrol edilebildiğini göstermişlerdir. Manyetik destekli 3B yazıcının şematik görseli ve basılmış bir ürün Şekil 4'te gösterilmiştir.

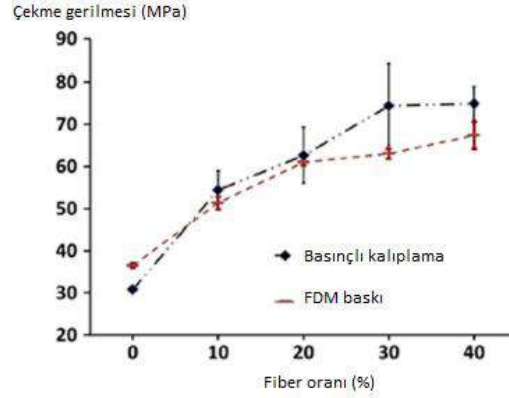


Şekil 4. a) Manyetik yardımcı 3B yazıcının şematik gösterimi, b) Manyetik yardımcı 3B yazıcı ile basılmış obje [36]

Sa'ude ve arkadaşları ABS polimer matris içerisine demir parçacıkları ekleyerek yeni bir polimer matrisli kompozit üretilmişlerdir. Üretilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri farklı metal oranına göre test edilmiş ve sonuçta demir tozunda meydana gelen artışın çekme ve sertlik değerlerini arttırdığı görülmüştür [37]

3.2. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Fiber takviyeler polimer matris malzemelerinin özelliklerini önemli ölçüde geliştirmişlerdir. 3B basılan polimer kompozit ürünlerin mekanik özelliklerini geliştirmede sıklıkla kullanılan lifler genelde cam yünü ve karbon fiberlerdir. Tekinalp ve arkadaşları karbon fiber ile güçlendirilmiş ABS malzemesi kullanılarak 3B yazıcı ve basınçlı kalıplama ile üretilmiş ürünlerin mekanik özelliklerini ve mikro yapısını karşılaştırmışlardır. Basınçlı kalıplama yöntemine göre 3B yazıcı baskılı ürünlerin boşluklu bir yapıya sahip olduğu gözlenmesine rağmen yakın bir çekme gerilmesi sonucu elde edilmiştir. [38] Ayrıca Şekil 5'te gösterildiği gibi fiber içeriğinin artması FDM ile üretilen kompozit parçaların gerilme değerlerinin de artmasına neden olmuştur.



Şekil 5. Fiber oranının çekme gerilmesine etkisi [38]

Lifli kompozit yapımında dikkat edilmesi gereken birtakım kurallar vardır. Yüksek lif oranına sahip kompozitlerin nozul tıkanması sorununa neden olmaktadır. Ayrıca yüksek lif oranına sahip kompozitleri filament haline getirmek zorlaşmaktadır. Bu nedenlerle baskı malzemesinin akıcılığını iyi tespit edip lif oranını bu doğrultuda arttırmak gerekir [22].

Baskı işlemi sırasında oluşan boşluklar baskılı kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde bozduğu için, araştırmacılar boşluk oluşumunun nasıl azaltılacağı üzerinde durmuşlardır. Son zamanlarda, basılan parçalardaki gözenekliliğini azaltmak için genleşebilen mikro kürelerin polimer içine eklenebildiği bulunmuştur. Ağırlıkça %11 oranında mikro kürenin yüklemesi durumunda baskılı parçaların gözenekliliği % 17'den % 7'ye düştüğü görülmüştür [39].

Elyaf bazlı baskı için karşılaşılan engellerden bir diğeri ise sürekli elyaf ilavesinin zor olmasıdır. Bugüne kadar yapılan araştırmaların çoğunda, kısa lifli polimer matrisler üzerinde olmuştur. Matsuzaki ve ark. [40] FDM yöntemiyle basılmış sürekli karbon elyaf takviyeli PLA kompozitlerinin gerilme mukavemetinin 185.2 MPa olarak bulmuş ve bu değer saf PLA numunelerinin gerilme mukavemetinin % 435'idir. Bu mekanik iyileştirme, kısa lif takviyeli PLA kompozitlere kıyasla çok daha büyüktür.

Sezer ve arkadaşları 1.75 mm çapa sahip 2000-2200 mm/dk ekstrüzyon hızında filamentler üretilmiştir. 0.4 mm oranında karbon fiberler eklenmiş ve kompozit malzemelerdeki boşluk oluşumları irdelenmiştir. %20 karbon fiber bulunması durumunda nozul tıkanıklığına neden olacağını belirtmişlerdir [41].

3.3. Nanomalzeme takviyeli polimer kompozitler

Karbon nanotüpü, grafen, grafit, seramik ve metal nanopartikül gibi çok çeşitli kullanılan nanomalzemeler genellikle ürünlerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini arttırmaktadır. Bu nedenle polimerlere nanomalzemelerin eklenmesi yüksek performanslı fonksiyonel kompozitlerin oluşturulmasını sağlayabilir.

Ağırlık olarak % 5 nanotitanyum dioksit (TiO_2) [35], ağırlıkça % 10 karbon nanofiber [42] veya % 10 karbon nanotüp [43] ilavesi içeren kompozit parçaların saf polimer parçalara kıyasla çekme mukavemetinde sırasıyla % 13.2, % 39 ve % 7.5 artış gösterdiği görülmüştür. Ancak kompozit parçalarda daha az uzama yüzdesi ve daha kırılgan bir yapı elde edilmiştir.

Lin ve ark. [44], polimer reçine içerisine % 0.2 oranında grafen oksit (GO) eklenerek SLA yöntemiyle grafen oksit/fotopolimer kompozit numuneler üretmişlerdir. Bu numunelerin çekme mukavemetinde saf polimer numunelere göre % 62.2 ve boyca uzama oranında ise % 12.8 artış gözlenmiştir.

Wei ve ark. [45], FDM yöntemiyle basılan grafen takviyeli ABS kompozit örneklerinin elektriksel iletkenliğin gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça % 5.6 grafenin eklenmesiyle, ABS nanokompozitlerin elektrik iletkenliğinin dört kat arttığı görülmüştür.

He ve ark. [46], SLA yöntemi kullanarak $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ (BST) epoksi reçinelerle harmanlayarak $0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gibi çok düşük bir ısı iletkenliğine sahip kompozit numune üretmişlerdir.

Çantı ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ikiz vidalı ekstrüder ile ABS polimer malzemesinin içine çok duvarlı nano tüpler (MWCNT) ve SiO_2 ekleyerek polimer nano-kompozitler üretmişlerdir. Üretilen malzemenin me-

kanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla 3B yazıcı ile test numuneleri hazırlayarak çekme, eğme ve sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yorumlandığında sertlik değerinde çok fazla bir değişim olmamasına karşılık kopma mukavemetinde nano parçacık takviyeli filamentin sade ABS'ye göre en az %13'lük iyileşme gösterdiği görülmektedir [47].

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, 3B baskı yöntemlerinden polimer matrisli kompozit basabilen birkaç teknik incelenmiş ve polimer matrisli kompozitler hakkında literatürde bulunan çalışmalar sunulmuştur. Çalışmalarda SLA ve FDM en yaygın kullanılan yöntem olduğu görülmektedir. SLA yöntemiyle yüksek çözünürlük ve hassasiyette renkli parçalar yapılmasına karşılık pahalı bir teknoloji olmasından dolayı FDM teknolojili cihazlar ev, ofis ortamlarına kolaylıkla taşınabilmektedir. Bu iki yöntem ile metal parça basılamamasına karşın SLS yöntemi metal parçaların basımına olanak sağlamaktadır. Polimer matrislere takviye olarak parçacık, nanomalzeme ve fiber yapılar eklenerek kompozit malzemeler elde edilmektedir. Polimerlere cam, metal tanecikleri, cam veya karbon lifler eklenerek çekme dayanımı; alümina eklenerek aşınma direci; BaTiO₃, CaTiO₃, W eklenerek dielektrik katsayısı yüksek malzemelere elde edilir. Ayrıca metal ilaveli polimer filamentler basımdan sonra büzülme ve çarpılma önlenmektedir.

REFERANSLAR

1. Hideo Kodama, "Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer," Review of Scientific Instruments, Vol. 52, No. 11, pp. 1770–1773, November 1981
2. Ferry P.W. Melchels, "Celebrating three decades of stereolithography", Virtual and Physical Prototyping, Volume 7, 2012 - Issue 3 , Pages 173-175.
3. <http://kedkem.com/urunler/3-boyutlu-yazicilar/3-boyutlu-yazicilar-hakkinda-genis-bilgi-10538.htm> (10.02.2017)
4. <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/> (10.02.2017)
5. David L. Chandler , Printing of the Paper, MIT News Office, 2011, <http://web.mit.edu/newsoffice/2011/3d-printing-0914.html> 2016
6. How 3D Printing worksTheVision, Innovationand Technologies BehindInkjet 3D Printing http://www.zcorp.com/documents/791_8914-3DPrintingWhitePaper.pdf
7. Research and developed open source 3d printing, <http://repraplttd.com/about/> (10.02.2017)
8. 3D Yazıcı Teknolojisi <http://www.prioid.com/3d-yazici-teknolojisi/>
9. TANDIRCIOĞLU F. E., SELÇUK S. A., 3 Boyutlu Yazıcılar Ve Geleceğin Mimarlık Teknolojisi, 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, pp 84-90.
10. Standard A. F2792, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken, Pa, USA: ASTM International; 2012
11. Kroll E, Artzi D. Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models. Rapid Prototyp J 2011;17(5):393-402.
12. Çelik İ., KARAKOÇ F., ÇAKIR M. C., DUYSAK A., Hızlı prototipleme teknolojileri ile uygulama alanları, DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2013, 31, 53-69.
13. Wong KV, Hernandez A. A review of additive manufacturing. ISRN Mech Eng 2012:2012.
14. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. Nat Biotechnol 2014;32(8):773-285.
15. Short DB. Use of 3D printing by museums: educational exhibits, artifact education, and artifact restoration. 3D Print Addit Manuf 2015;2(4):209-215.
16. Vautard F, Ozcan S, Poland L, Nardin M, Meyer H., Influence of thermal history on the mechanical properties of carbonacrylate composites cured by electron beam and thermal processes. Composites Part A 2013;45:162–72.
17. Bourland, Charles T. The development of food systems for space, Trends in Food Science & Technology, 1993, 4.9: 271-276.
18. J. Pegna, Exploratory investigation of solid freeform construction, Automation in Construction, 5 (5) (1997), pp. 427–437
19. Tymrak B, Kreiger M, Pearce J. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Mater Des 2014;58:242-246

20. Caulfield B, McHugh P, Lohfeld S. Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. *J Mater Process Technol* 2007;182(1):477-488.
21. Garcia CR, Correa J, Espalin D, Barton JH, Rumpf RC, Wicker R, Gonzalez V. 3D printing of anisotropic metamaterials. *Prog Electromagn Res Lett* 2012;34:75-82
22. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J, Hui D., 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective, *Composite Part B*, 2017, 110, 442-458
23. Malhotra SK, Goda K, Sreekala MS. Part One Introduction to Polymer Composites. In: *Polymer Composites*. 1st ed.1. Wiley-VCH; 2012.
24. Cho Y, Lee I, Cho D-W. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in micro-stereolithography. *Microsyst Technol*, 2005;11(2-3):158-167.
25. Heller C, Schwentenwein M, Russmueller G, Varga F, Stampfl J, Liska R. Vinylesters: low cytotoxicity monomers for the fabrication of biocompatible 3D scaffolds by lithography based additive manufacturing. *J Polym Sci Part A Polym Chem* 2009;47(24):6941-6954
26. Chung H, Das S. Processing and properties of glass bead particulate-filled functionally graded Nylon-11 composites produced by selective laser sintering. *Mater Sci Eng A* 2006;437(2):226-234.
27. Nikzad M, Masood S, Sbarski I. Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling. *Mater Des* 2011;32(6):3448-3456.
28. Boparai K, Singh R, Singh H. Comparison of tribological behaviour for Nylon6-Al-Al₂O₃ and ABS parts fabricated by fused deposition modelling: this paper reports a low cost composite material that is more wear-resistant than conventional ABS. *Virtual Phys Prototyp* 2015;10(2):59-66.
29. Isakov D, Lei Q, Castles F, Stevens C, Grovenor C, Grant P. 3D printed anisotropic dielectric composite with meta-material features. *Mater Des* 2016;93:423-430.
30. Shemelya CM, Rivera A, Perez AT, Rocha C, Liang M, Yu X, Kief C, Alexander D, Stegeman J, Xin H. Mechanical, Electromagnetic, and X-ray Shielding Characterization of a 3D Printable TungstenePolycarbonate Polymer Matrix Composite for Space-Based Applications. *J Electron Mater* 2015;44(8): 2598-2607
31. Kalsoom U, Peristyy A, Nesterenko P, Paull B. A 3D printable diamond polymer composite: a novel material for fabrication of low cost thermally conducting devices. *RSC Adv* 2016;6(44):38140-38147
32. Castles F, Isakov D, Lui A, Lei Q, Dancer C, Wang Y, Janurudin J, Speller S, Grovenor C, Grant PS. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃/ABS polymer composites. *Sci Rep* 2016;6.
33. Hwang S, Reyes EI, Moon K-s, Rumpf RC, Kim NS. Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *J Electron Mater* 2015;44(3):771e7.
34. Ahn S-H, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyp J* 2002;8(4): 248e57.
35. Perez ART, Roberson DA, Wicker RB. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *J Fail Analysis Prev* 2014;14(3):343e53.
36. Kokkinis D, Schaffner M, Studart AR. Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials. *Nat Commun* 2015;6.
37. N. Sa'ude, M. Lbrahim, ve M. H. Ibrahim: Mechanical Properties of Highly Filled Iron-ABS Composites in Injection Molding for FDM wire Filament, *Materials Science Forum Vols. 773-774* (201a), 2014;pp 456-461
38. Tekinalp HL, Kunc V, Velez-Garcia GM, Duty CE, Love LJ, Naskar AK, Blue CA, Ozcan S. Highly oriented carbon fibrepolymer composites via additive manufacturing. *Compos Sci Technol* 2014;105:144-150.
39. Wang J, Xie H, Weng Z, Senthil T, Wu L. A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Mater Des.*, 2016;105:152-159
40. Matsuzaki R, Ueda M, Namiki M, Jeong T-K, Asahara H, Horiguchi K, Nakamura T, Todoroki A, Hirano Y. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. 2016. p. 6.
41. Sezer H. K., Eren, O., Börklü H. R., Karbon fiber takviyeli abs filament üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması, *International Symposium On 3d Printing Technologies Proocedeing Book*, 2016, 138-148
42. Shofner M, Lozano K, Rodríguez-Macías F, Barrera E. Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *J Appl Polym Sci.*, 2003;89(11):3081-3090.
43. Hector Sandoval J, Wicker RB. Functionalizing stereolithography resins: effects of dispersed multi-walled carbon nanotubes on physical properties, *Rapid Prototyp J* 2006;12(5):292-303.
44. Lin D, Jin S, Zhang F, Wang C, Wang Y, Zhou C, Cheng GJ. 3D stereolithography printing of graphene oxide reinforced complex architectures, *Nanotechnology* 2015;26(43):434003

45. Wei X, Li D, Jiang W, Gu Z, Wang X, Zhang Z, Sun Z. 3D Printable Graphene Composite. 2015.p. 5.
46. He M, Zhao Y, Wang B, Xi Q, Zhou J, Liang Z. 3D Printing Fabrication of Amorphous Thermoelectric Materials with Ultralow Thermal Conductivity. Small 2015;11(44):5889-5894.
47. Çantı E., Aydın M., Yıldırım F., DEVELOPMENT OF NOVEL NANOCOMPOSITE MATERIALS FOR 3D PRINTING, , International Symposium On 3d Printing Technologies Proocedeing Book, 2016, 76-82

Production and Characterization of Composite Filaments for FDM Printing

Ebubekir ÇANTI^a, Mustafa AYDIN^{1a}, Ferhat YILDIRIM^b

d. University of Dumlupınar, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 43100, Kütahya

e. University of Dumlupınar, Faculty of Simav Technology, Department of Manufacturing Engineering, 43100, Kütahya

Özet

Bu çalışmada, yoğunluk, yüzey alanı, saflık ve parçacık morfolojisi gibi farklı özelliklere sahip çeşitli nano ve mikro parçacıklar, 3D baskıda kullanılacak polimer kompozit filamentlerin üretimi için takviye parçacıkları olarak kullanılmıştır. Akrilonitril bütadien stiren (ABS) matris malzemesi iken, MWCNTs, SiO₂, ZrB₂, Al partikülleri takviye olarak kullanılmıştır. Kompozit filamentlerin üretimi ikiz vidalı bir ekstrüder kullanılarak gerçekleştirildi. Üretilen kompozit filamentler DSC, SEM-EDS ve çekme testleri ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, ABS matrise mikro/nano parçacıklarının eklenmesinin, takviyesiz ABS ile karşılaştırıldığında kopma gerilmesini yaklaşık 16% oranında artırdığını göstermiştir. ZrB₂ ve Al mikro parçacıklarının takviye edilmesi sonucunda, katkısız ABS filamentin çekme mukavemeti sırasıyla %17.8 ve %40 kadar yükselmiştir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, Polimer, ABS, Kompozit, Filament, FDM.

Abstract

In this study, various nano and micro particles with different properties, including density, surface area, purity and particle morphology were used as reinforcement particles for the production of polymer composite filaments to be used for 3D printing. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) was matrix material and Multi wall carbon nanotubes (MWCNTs), SiO₂, ZrB₂, and, Al particles were reinforcements. Production of the composite filaments were carried out by using a twin screw extruder. Produced composite filaments were characterized via Differential scanning calorimetry (DSC), Scanning electron microscope (SEM), Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), tensile test and surface roughness tests. Results showed that addition of micro/nano particles into ABS matrix improved Ultimate tensile strength (UTS) of composites of around 16% compared to non-reinforced one. As a result of reinforcing with micro particles, ZrB₂ and Al, the tensile strain of neat-ABS filament increased 17.8% and 40%, respectively.

Keywords: Additive Manufacturing, Polymer, ABS, Composite, Filament, FDM.

1. Introduction

Today, ABS, polycarbonate (PC), polylactide (PLA), polyamide (PA), and the mixtures of different types of thermoplastics are the most common feedstock material in other words filaments in FDM technique [1]. However, the parts to be manufactured using these filaments lack sufficient mechanical strength and robustness, due to inherent nature of the polymeric materials, to withstand mechanical loading, which is a prerequisite for all functional mechanical components. This shortcoming restricts implementation of the FDM technology significantly and limits its applicability to industrial applications. Therefore, there is an urgent need for development of novel materials with enhanced mechanical properties for manufacturing of functional mechanical components [2,3]. Polymer nanocomposites stand out as a potential solution to overcome this limitation. Because of having larger surface area over a given volume by transition of the dimension scale from

micrometer to nanometer, nanometer scaled particles improves mechanical and physical properties significantly of the polymer materials [4, 5].

Even though effects of manufacturing parameters on the mechanical properties of 3D printed parts have been vastly studied in the literature [6-10] using composite materials as filaments for FDM is limited. Therefore, the aim of the current study was to produce ABS micro/nano composite filaments with different reinforcements, including MWCNTs, SiO₂, ZrB₂, and Al, and to characterize mechanical properties of the produced composite filaments.

2. Experimental Studies

2.1. Used Materials and Properties

In this study, MWCNTs, SiO₂, ZrB₂, Al, particles were used as reinforcements for the production of polymer composite filaments. Al particles were produced by gas atomization method in gas atomization unit in Dumlupınar University. The SiO₂ and MWCNTs particles were supplied from EgeNanotech (Izmir, Türkiye, code EN/N-EA234 and EN/N-KNT14-1, respectively). ZrB₂ particles were purchased from the ABCR (Karlsruhe, Germany, code 82299).

Figure 1 shows SEM microstructure of the reinforcement particles. Material properties of used micro/nano particles were presented in Table 1. As shown in Table 1 and Figure 1, the particles have different properties, including density, surface area, purity and particle morphology.

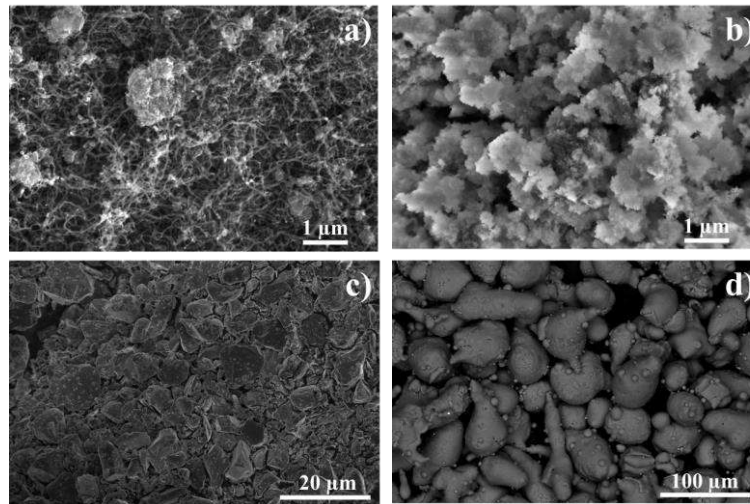


Figure 1. The SEM microstructure of used micro/nano particles, a) MWCNTs, b) SiO₂ c) ZrB₂, d) Al.

Table 1. Properties of the used particles.

Properties	Unit	Reinforcements			
		MWCNT	SiO ₂	ZrB ₂	Al
Density	gr/cm ³	2,1	2,2-2,6	6,1	2,64
Surface Area	m ² /gr	40	440	1,6	-
Purity	%	>95	99,90	96-97	96-98
Morphology	-	Tube	Spheri-	Hexagonal, Irregula	Spheri-
Outer Diame-	nm	< 50	30	10 micron	35
Inner Diameter	nm	<5-15	-	-	-

2.2. Fabrication of the composite filaments

A twin screw extruder, AES Lab-30 (Aysa Machine, Istanbul, Türkiye), was utilized for the filament production. The extruder has twin screw one of each has a diameter of 22 mm. Also, length/diameter (L/D) ratio of the extruder is 32. The machine can be operated in a temperature range 60°C-400°C precisely by the help of 6 heat zones and cooling installations located on the main barrel.

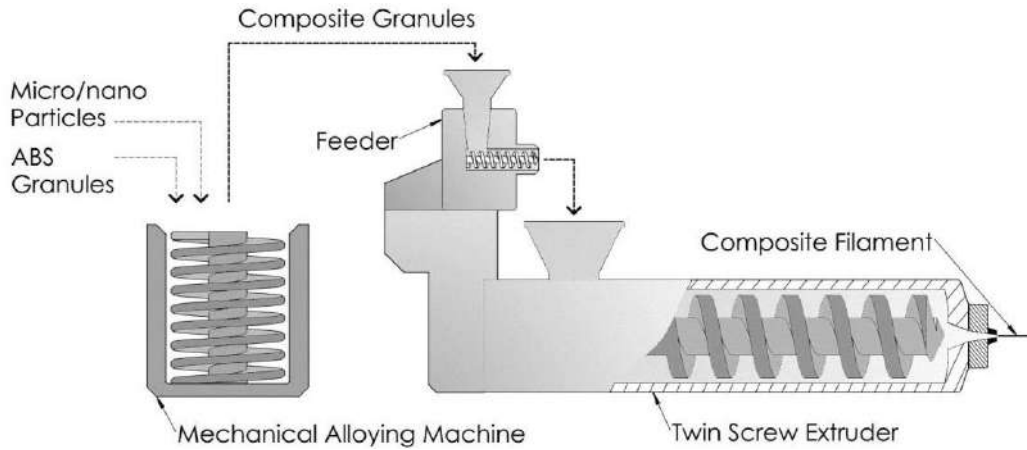


Figure 2. The production steps of nano-micro polymer composite filaments.

Production steps was illustrated in Figure 2. Firstly, mixing of the reinforcement particles with the ABS granules was done in a mechanical alloying machine without steel balls for ten minutes, in order to provide penetration of the fillers into the ABS granules. Following, the composite granules were poured into the feeder of the extruder to maintain uninterrupted extrusion. For constant feeding, rotation speeds of the feeder and main twin screw were set to 15 rpm and 73 rpm, respectively. 6 heating zones on the barrel allowed temperature control on each zone, independently. Extrusion temperatures of the six heat zones, from 1st heat zone to last, were set in range 175°C to 210°C by equal increment. An extruder die contains only a single exit with a diameter of 2 mm was employed in the process. Having been extruded from die, filaments dived into water pool (19°C) for solidification and ensuring retain its shape. Drawn rotor speed was set to 50 rpm to improve consistency of the filament diameter, which was resulted in a filament with diameter of 1.75. Table 2, shows weight ratios of the reinforcement particles and matrix material beside containing images of the produced filaments.

Table 2. The weight ratio of the particles added into the ABS matrix and produced filament images.

ABS, (wt%)	Additive, (wt%)	Additive	Produced Filaments
98.5	1.5	MWCNTs	
98.5	1.5	SiO2	
98.5	1.5	ZrB2	
98.5	1.5	Al	
100	0	-	

2.3. Characterization of ABS Composite Filaments

The composite filaments were characterized via different methods, including DSC, tensile test and SEM-EDS. Tensile test were performed on 4 samples extracted from various sections of the filaments then subjected to axial loading by using Zwick BF2-FZ0.5TH.D16 (Zwick, Germany) at room temperature. Maximum tensile load allowed by the tensile machine was of 5kN and extension resolution was <0.1 microns. Distance

between grippers was set to 100 mm and all of the specimens were stretched at 25 mm/min with constant speed. SEM-EDS studies were conducted via FEI Nova NanoSEM 650 (FEI, Oregon, USA) in Advanced Technology Center at Dumlupınar University (ILTEM). DSC was performed on granulated filaments by using SETSYS Evolution TGA&DTA/DSC (SETARAM Instrumentation, USA) in the same center.

3. Results and Discussion

3.1. SEM-EDS Analysis of the Filaments

Following the filament production, EDS studies of the composite filament's cross sections have been obtained to validate dispersion of micro/nano particles in the ABS matrix. In Figure 3, EDS graphs were plotted. The EDS studies showed that reinforced particles were present in the ABS matrix. According to the graphs and into the tables, it can be seen that the existence of the elements as C, Si, Zr an Al.

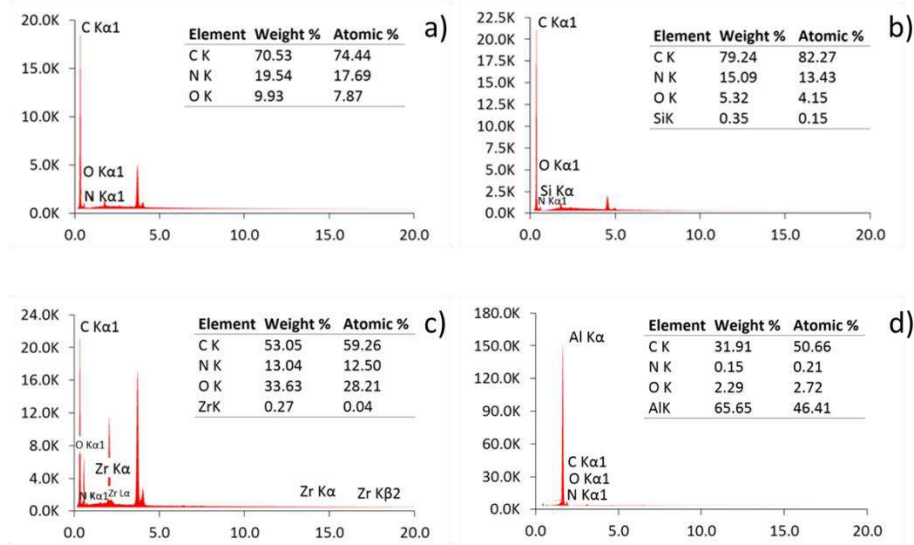


Figure 3. The SEM-EDS plot of the composite filaments, a) MWCNTs/ABS, b) SiO₂/ABS, c) ZrB₂/ABS, and d) Al/ABS.

3.2. Tensile Test of the Filaments

Corresponding tensile stress to tensile strain, based on the Tensile test results, were plotted in Figure 4 and presented in Table 3. According to results, nanoparticle addition decreased elongation at break values up to of 17.8%. However, UTS values of the filaments increased 6.7% and 16% by reinforcing MWCNTs and SiO₂, respectively.

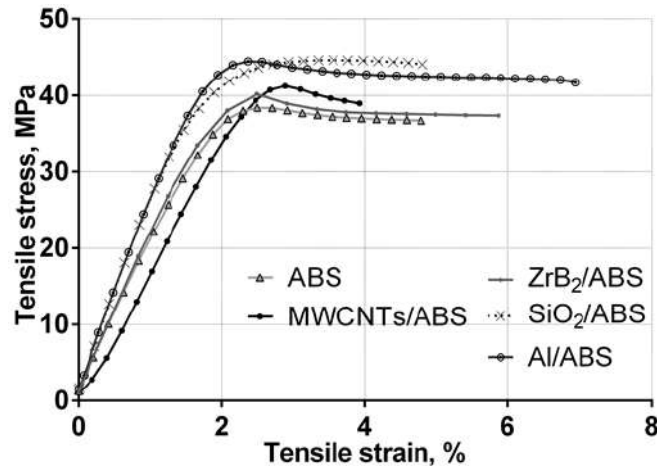


Figure 4. The stress-strain graph of the produced ABS composite filaments.

Micro particle reinforcement effects the tensile-strain more thoroughly than tensile-stress. Reinforcing with ZrB_2 increased UTS 4.5% while its elongation at break increased 18%. Results were more promising with Al reinforcing. An UTS increase of around 16% and an elongation at break increase of around 40% were observed in Al reinforced filament. Young modulus of all filaments except MWCNTs were increased. Significant decrease, of around 18%, was observed in MWCNTs reinforced filament.

Table 3. The weight ratio of the particles added into the ABS matrix and produced filament images.

Matrix	Reinforcement	Young Modulus, (GPa)	UTS, (MPa)	Elongation at break, (%)
ABS	-	2,05	38,44	4,99
ABS	(nm) MWCNTs	1,68	41,2	4,05
ABS	(nm) SiO_2	2,49	44,72	4,84
ABS	(μm) ZrB_2	2,14	40,2	5,88
ABS	(μm) Al	2,55	44,56	6,99

3.3. Comparing of the Filament Diameters

In Figure 5, cross section surfaces of both of neat-filament and the filament reinforced with SiO_2 were compared. Today, commercial FDM filaments are mostly have a diameter of 1.75 mm. Following the extrusion process, produced filaments were used in an FDM printer to trials. Too thin or too thick filaments caused printing errors, interrupted the process, and made impossible to print fully integrated parts. Trial processes showed that the importance of the consistency of the filament diameter. In this study, neat and SiO_2 reinforced filament were compared and their diameter measured as 1.771 mm and 1.741 mm, respectively. Results shows that the by arranging the extrusion process parameters properly, achieving suitable filaments compatible with FDM printing can be provided either using reinforcement particles or not using.

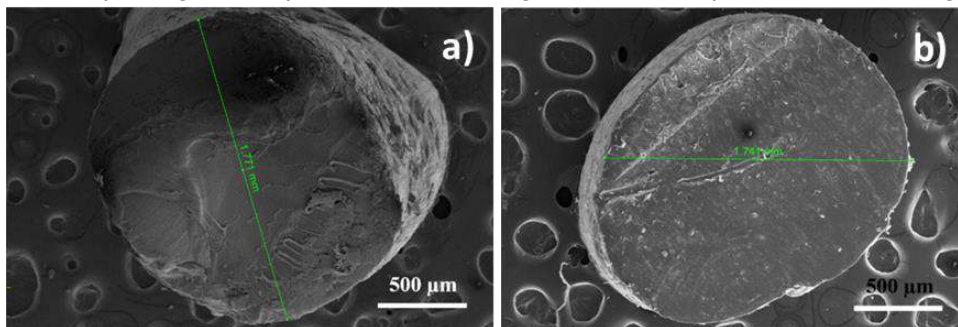


Figure 5. The SEM microstructure of a) neat-ABS, b) SiO_2 /ABS composite filaments, x150 magnification.

3.4 SEM Microstructure of Fracture Surface

SEM microstructures of fractured surface of tested filaments are shown in Figure 6. Fractured surface formations of the both non-reinforced filament and filament with ZrB_2 reinforcement were almost same (Figure 6a, b). Fracture surface formation of the specimen with SiO_2 reinforcement indicates ductile fracture same like filaments with non-reinforced and ZrB_2 reinforced (Figure 6b, c). SEM images of these filaments indicated ductile fracture and show agreement with the elongation at break values were presented in Table 3 (4.84%, 4.99% and 5.88%; SiO_2 , non-reinforced and ZrB_2 , respectively). To validate presence of the micro Al alloy particle in the polymer matrix, the SEM image was added as Figure 6f. Examination of the specimen with MWCNTs reinforcement showed agglomeration of the nano-tubes (Figure 6d, e). It can be said that there was non-uniform dispersion of MWCNTs in the ABS matrix, due to the morphology of MWCNTs and weak adhesion between particles and the ABS matrix. Beside, agglomeration of the particles in the cross section of the filament was acted as a stress concentrator resulted with poor capability to withstand failure. Although, UTS value of the filament with MWCNTs was slightly higher than the non-reinforced one, there was notable decrease in elongation at break value (4.99% and 4.05%, respectively; Table 3).

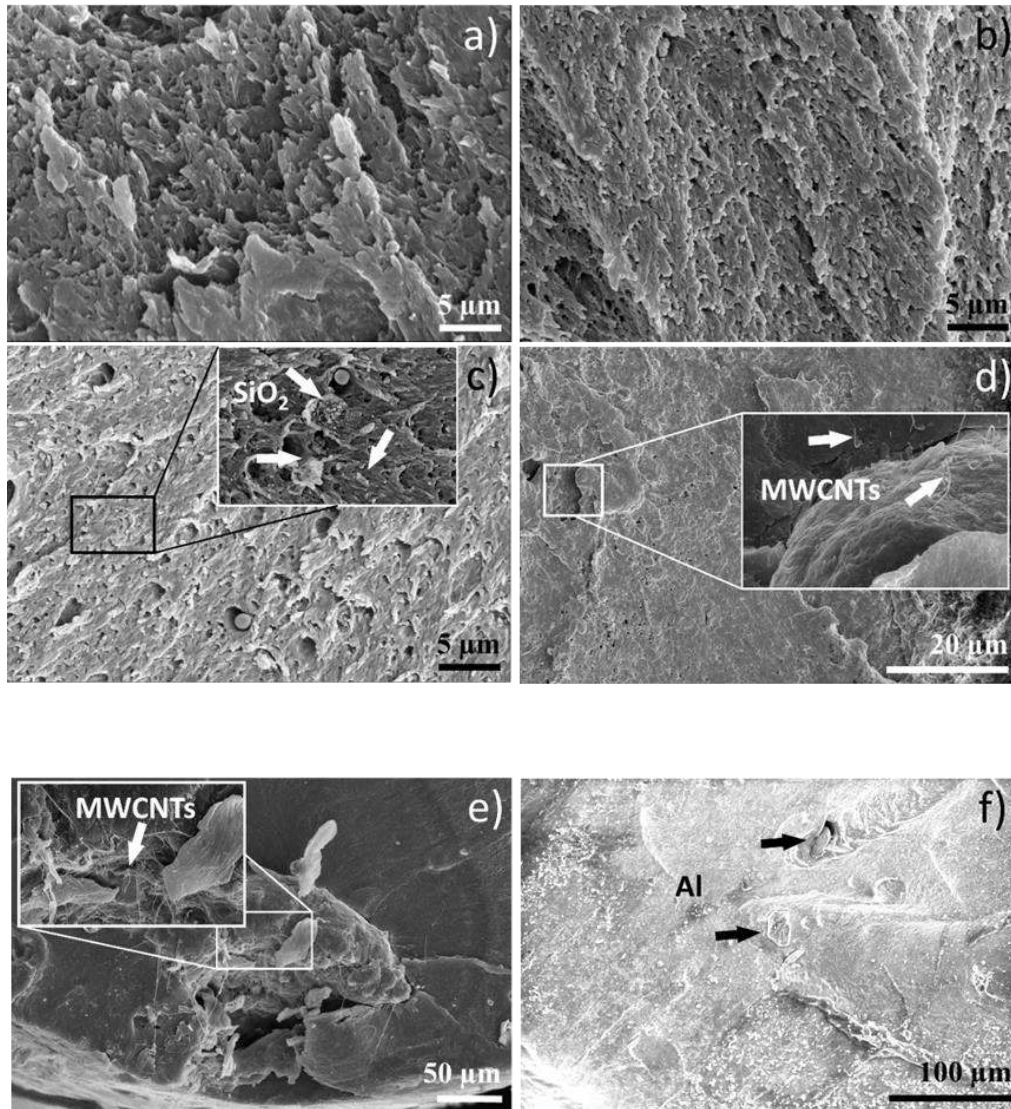


Figure 6. The fracture surface of neat-ABS and reinforced ABS filaments, a) neat-ABS x10.000, b) ZrB_2 /ABS x10.000, c) SiO_2 /ABS x10.000 with higher magnification, d) MWCNTs/ABS x5000 with higher magnification, e) MWCNTs/ABS x1000 (agglomeration) with x10000 magnification, f) Al/ABS x1000.

The specimen with SiO_2 has the highest UTS value presumably owing its morphology and of size. SiO_2 particles has the highest surface area with the $440 \text{ m}^2/\text{gr}$ value among all of the reinforcements with spherical morphology. This can be thought that the possible reason for the UTS increase for SiO_2 reinforced filament. SEM images indicated more homogenized distribution of the reinforcement particles in the ABS matrix except MWCNTs.

3.5 DSC Studies of the Produced Filaments

For all of the produced filaments, results of the DSC studies were shown in Figure 7. According to results neat-ABS shows a glass transition temperature (T_g) around of 107°C . This finding was compatible with the result of Faes and friends' study **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..** Also, there have been shown mixed values for T_g of the ABS from 105°C to 108°C in literature [12, 13].

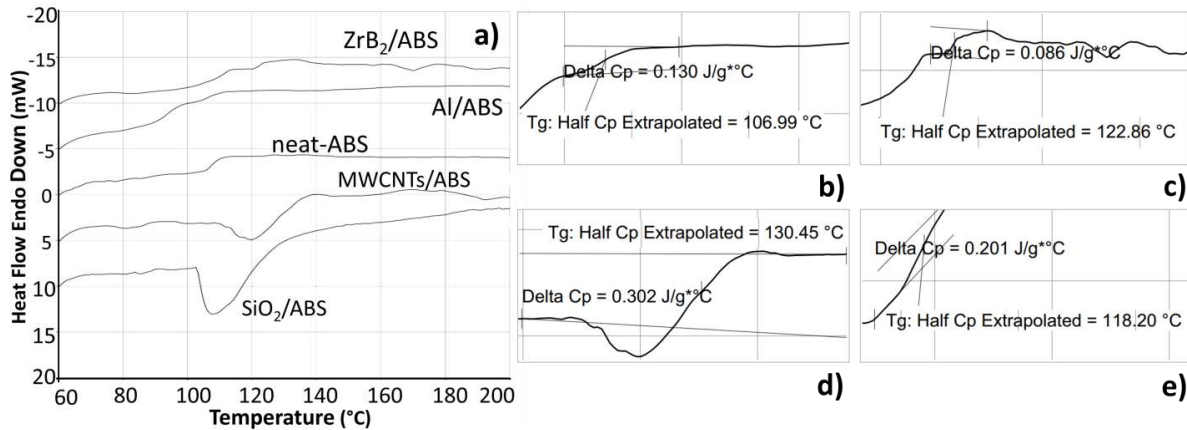


Figure 7. DSC studies of a) all produced samples, b) Al/ABS, c) ZrB_2 /ABS, d) MWCNTs/ABS, e) SiO_2 /ABS.

T_g of the Al/ABS, ZrB_2 , MWCNTs/ABS, and SiO_2 /ABS were 107°C , 123°C , 130°C , and 118°C respectively. Results indicate a maximum increase up to 130°C which is of around % 21 respect to neat-ABS. Today, commercial FDM devices' extruder units use 230°C as processing temperature. It is obvious that produced composite/ nanocomposite ABS filaments' T_g values are much lower than standard processing temperature. Hence, without doing modification on the heating components on the printer, these filaments can be used in commercial FDM printers.

4. Conclusion

ABS composite filaments reinforced with different nano / micro particles have been successfully produced by using a twin screw extruder in this study. Characterization results shows that these novel composites can be used as filament material in commercial FDM devices without requiring modification. According to the results;

- 1- The nano and micro reinforced ABS composite filaments for FDM type 3D printer were produced via a twin screw extruder between 175°C - 210°C without degradation of the matrix.
- 2- DSC studies showed that produced filaments were compatible with commercial 3D printers because of having lower T_g values (maximum value was 130°C for MWCNTs/ABS nanocomposite) than standard processing temperatures of the commercial 3d printers (mostly 230°C). However, a Melt flow index (MFI) should be applied on the composite polymers for determining exact processing temperature.
- 3- Addition of micro sized particles (ZrB_2 and Al alloy) in the polymer matrix was resulted increase of the tensile strain at least 18%.
- 4- The EDS results showed that, in generally, the micro reinforcements were embedded and distributed in the ABS matrix well while nano particle reinforced filaments had local agglomeration and internal void problems.

- 5- SEM microstructure of fracture surfaces indicated brittle fracture mode for the MWCNTs reinforced ABS filament as opposed to expectation. This can be aroused mainly by the weak matrix-filler interaction between polymer matrix and MCWCNTs filler.
- 6- During the extrusion process, the nanocomposite filaments need to be fabricated-granulated for a couple cycles to achieve well dispersion of the reinforcement particles in the ABS matrix.

References

5. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B: Engineering*, vol. 80, pp. 369-378, 2015.
6. Hill, N., & Haghi, M., Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no 3, pp., 221-227, 2014.
7. Chatterjee, A., & Deopura, B. L., High modulus and high strength PP nanocomposite filament, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no 5, pp. 813-817, 2006.
8. Nawani, P., Burger, C., Rong, L., Hsiao, B. S., & Tsou, A. H., Structure and permeability relationships in polymer nanocomposites containing carbon black and organoclay, *Polymer*, vol. 64, pp. 19-28, 2015.
9. Weng, Z., Wang, J., Senthil, T., & Wu, L., Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials & Design*, vol. 102, pp. 276-283, 2016.
10. Ciprari, D., Jacob, K., & Tannenbaum, R., Characterization of polymer nanocomposite interphase and its impact on mechanical properties. *Macromolecules*, vol. 39, no 19, pp. 6565-6573, 2006.
11. Mueller, J., Shea, K., & Daraio, C., Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design. *Materials & Design*, vol. 86, pp. 902-912, 2015.
12. Dawoud, M., Taha, I., & Ebeid, S. J., Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 21, pp. 39-45, 2016.
13. Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., & Gu, P., Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 4, no 2, pp. 129-141, 2002.
14. Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P., Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, no 2, pp. 72-80, 2008.
15. Faes, M., Ferraris, E., & Moens, D., Influence of inter-layer cooling time on the quasi-static properties of ABS components produced via Fused Deposition Modelling, *Procedia CIRP*, vol. 42, pp. 748-753, 2016.
16. Dul, S., Fambri, L., & Pegoretti, A., Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 85, pp. 181-191, 2016.
17. Forest, C., Chaumont, P., Cassagnau, P., Swoboda, B., & Sonntag, P., Generation of nanocellular foams from ABS terpolymers, *European Polymer Journal*, vol. 65, pp. 209-220, 2015.

ÜÇ BOYUTLU YAZICILARDA ÇOKLU-EKSTRÜDER YÖNTEMİ, GELİŞTİRİLMESİ ve EĞİTİME KATKISI

Mehmet Fatih UÇAR, Mustafa YAŞAR

Güzelyalı Eğitim Mahallesi 806. Sokak no 8 Daire 7 Kat 4 Mudanya / BURSA
mfu@pidacs.com

Karabük Üniversitesi

myasar@karabuk.edu.tr

ÖZET

Üretim teknolojisine devrim yaratacak nitelikte değişiklikler ve yenilikler getiren üç boyutlu yazıcılar insanoğlunun hayal gücünü zorluyor. Yaratıcı fikirler ve tasarımlar gerçek modellere, son ürünlere, parçalara ve prototiplere hızlı bir şekilde dönüşüyor. Kullanılmaya başlandığı ilk günden itibaren aklınıza gelebilecek her türlü ürünün yanı sıra çok özel ve ilginç ürünler de ortaya çıkaran bu yeni nesil teknoloji, geleceğimizi inanılmaz biçimlerde şekillendirecektir. Çoklu-ekstrüder yöntemi de yapısında birden fazla renk ve malzeme çeşitliliğinin bulunduğu doku ve katmanlarını tek bir süreç içerisinde üretilebilmesi amacı ile geliştirilmeye başlanmıştır. Araştırmalarımız sonucunda Duet Arduino ve DUET RAMPS ek genişletme ana kartı kullanılarak X, Y, Z ana üç boyut yazıcı eksen olmak üzere E0, E1, E2, E3 ve E4 çoklu-ekstrüderli üç boyutlu yazıcıları geliştirmemiz mümkündür.

Çoklu ekstrüderli üç boyutlu yazıcıların geliştirilmesi ve bu yazıcıların eğitimde kullanılmasıyla görülecek olan faydaları doğrultusunda, okullarımızda 3 boyutlu yazıcı kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu sayede, öğretmenlerimiz öğretmenin yeni yöntemlerini keşfedecekler ve teknolojinin geliştirilmesine katkıda bulunacaklardır.

Anahtar Kelimeler: 3 boyutlu yazıcılar, RAMPS, Duet Arduino, Çoklu-Ekstrüder, Eğitimde 3 boyutlu yazıcılar

ABSTRACT

3D printers which brings sweeping changes and breakthroughs to manufacturing technology are stretching the human's imagination. Creative ideas and designs are in a snap transforming to real models, last products, parts and prototypes. This new generation technology which produce strictly private and interesting products except of all descriptions product since day of come into use will shape our future unbelievably. Furthermore, way of multi extruder has begun to develop in order to produce tissue and layer which contains multiple color and variety of material . By using Duet Arduino and DUET RAMPS card of additional extension, E0, E1, E2, E3 and E4 multi extruder 3D printer are manufacturable providing that X,Y,Z are main 3D printer axis.

Development of multi extruders 3d printers and utility of when used that 3d printers in education in line with, it is necessary to become widespread in our schools. Thus, our teachers will discover new method of teaching and will be contributed to development of technology.

Keyword: 3D printer, RAMPS, Duet Arduino, Multi-extruder, 3D printers in Education

1. GİRİŞ

3 boyutlu yazdırma işlemini yapan cihazlara 3 boyutlu yazıcılar denilmektedir. 3 boyutlu yazıcılar bilgisayar-daki bir tasarımı başka bir alete ihtiyaç duymadan imal edebilmektedirler. 3 boyutlu yazıcıların çalışma prensipleri evlerde kullanılan yazıcılara benzemektedir. Kâğıda baskı yapan yazıcıların yazdırdıkları malzemenin kalınlığı ihmal edilebilecek kadar ince iken, 3 boyutlu yazıcılarda katmanlar üst üste gelerek yazdırma 3 boyutlu olmaktadır. Tasarlanan bir aksesuar ya da makine parçası bu yazıcılardan çıkarılıp kullanılabilir. Üstelik çoğu zaman başka bir makineye ya da işleme ihtiyaç kalmaksızın ürün kullanıma hazır hale gelmektedir[1]. 3 boyutlu yazıcı teknolojisiyle ilgili literatürde sayısız çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak, Stefan Junk ve Rebecca Matt tasarım eğitiminde üç boyutlu dijital teknolojilerin eğitimdeki uygulamalara

yeni yaklaşım yöntemlerini incelemiştir[2]. Sasaki¹ ve Rashmi Koul hasta eğitimi için üretilen anatomik modellerin üretimlerinde üç boyutlu yazıcı teknolojisini kullanarak yeni bir dönem başlatmıştır[3]. Carling L. Cheung, ve Nikoo R. Saber, Tıp simülasyon ve Eğitiminde üç boyutlu yazıcı uygulamaları geliştirmiştir[4].

Günümüz 3 boyutlu yazıcı teknolojisi, lazer sinterleme, bileşimli yığma ve polimer kürleme gibi bir- çok farklı tekniği kapsıyor. Lazer sinterleme, bileşimli yığma ve polimer kürleme. Bu teknoloji, ürünlerin, modellerin, kalıpların ya da aletlerin doğrudan elektronik verilerden hızlı, esnek ve maliyet açısından etkin biçimde üretilmesine imkân veriyor[5]. Üç boyutlu yazıcılar temelde bir ürünün piyasaya çıkmadan önce son halini görebilmek için tasarlanmış makinelerdir. Bu sayede bir ürün seri üretime geçmeden önce bu yazıcılardan çıkış alınıp son haline bakılarak ürünün elle tutulduğunda nasıl bir şeye benzediği görülebiliyor. Bu da hem maliyet tasarrufu hem de olası sorunların önceden görülmesini sağladığı için ciddi bir kolaylık getiriyor[6].

Üç boyutlu yazıcılarda ürün içindeki çeşitliliğin artması, karmaşık algoritmalarla oluşan üretim ve imalat yöntemlerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Ürünlerin yapısında bulundurduğu renk, doku, malzeme vb. çeşitli varyasyonları tek bir işlem altında üretebilmek ihtiyacımız olan ekipmanların işlem kapasitelerini ve imalat yöntemlerini değiştirmektedir. Bu gibi çeşitli varyasyonlar tek ekstruderli yaygın olarak kullanılan üç boyutlu yazıcıların iki, üç, dört ve hatta altı ekstruder kapasiteli yazıcıların yaygınlaşmasına olanak sağlayacaktır.

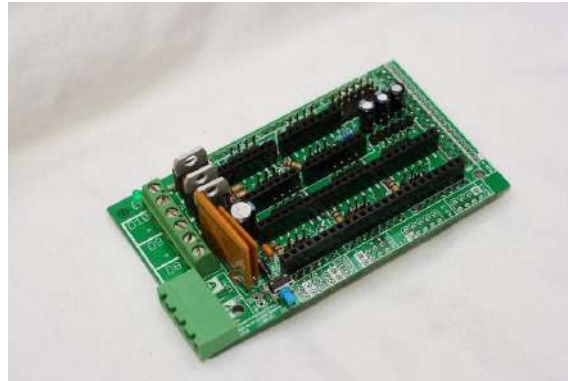
Araştırmalar 3D Yazıcıların eğitimde ağırlıklı olarak kullanılmasının STEM (Science-Technology-Engineering-Mathematics) öğretimini zenginleştirdiğini ortaya koymuştur. 3D yazıcıların katkısı ile oluşturulacak farklı eğitim yöntemlerinin daha kompleks yapılardaki bilimsel ve matematiksel verilerin anlaşılmasında kolaylaştırıcı etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Özellikle matematik ve fen derslerinde nesneleri anlamanın çok daha farklı yöntemleri ortaya koyulabilmektedir. 2D ve 3D dünyalar arasındaki farklar çok daha net açıklanabilmektedir. 3 boyutlu nesnelerin çizimleri, uzay, boşluk gibi kavramların anlaşılmasına ve dolayısı ile geometrinin gelişmesine yardımcı olmaktadır. 2D nesnelerden 3D nesnelerin ortaya çıkartılması nesneleri anlama kabiliyetini artırmaktadır. Ayrıca planlama, dizayn, yapma ve geliştirme aşamalarından oluşan üretim süresi kısaldığı için, planlama ve dizayn üzerinde daha fazla zaman ayrılarak çok daha iyi ürünler ve inovasyonlar ortaya konulabilmektedir[7].

2. YÖNTEM

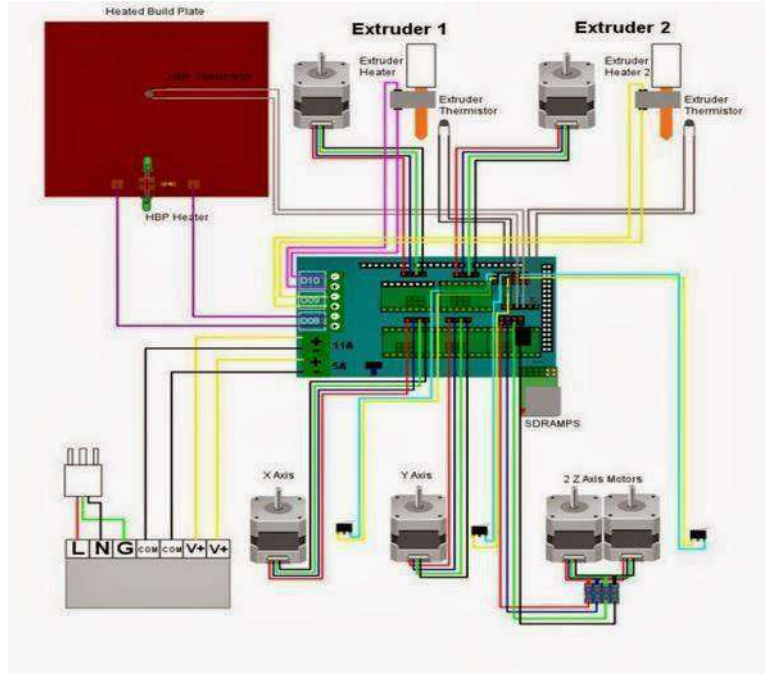
Kontrol kartı en basit tabiri ile 3d printerin beynidir. Bizim ülkemizde karmaşık olan tüm elektronik kartlara genelde beyin denir zaten. Piyasada mevcut bulunan tüm 3d printer elektronik kontrol kartları Arduino'ya dayanmaktadır. Farklı tasarımlara ve özelliklere sahip olsalar da bütün kontrol kartları aynı işlemi gerçekleştirmektedir. Kontrol kartının temel görevi step motorları, ısıtıcı zemin ve ısıtıcı kontrol etmektedir[8].

RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) : Açılımından da anlaşılabilir olduğu gibi RAMPS bir Arduino ek kartıdır (shield). RAMPS 3d yazıcı için gereken tüm elektronik kontrol işlevini kapsamak üzere tasarlanmıştır.



Resim 1. RAMPS

RAMPS'i diğer parçalara bağlayabilmek için Resim 2'deki bağlantı şemasını kullanılabilir. Bu şema 3D Yazıcı kontrol kartının nasıl gereken tüm işlevleri gerçekleştirdiğini anlamak için de oldukça kullanışlıdır.

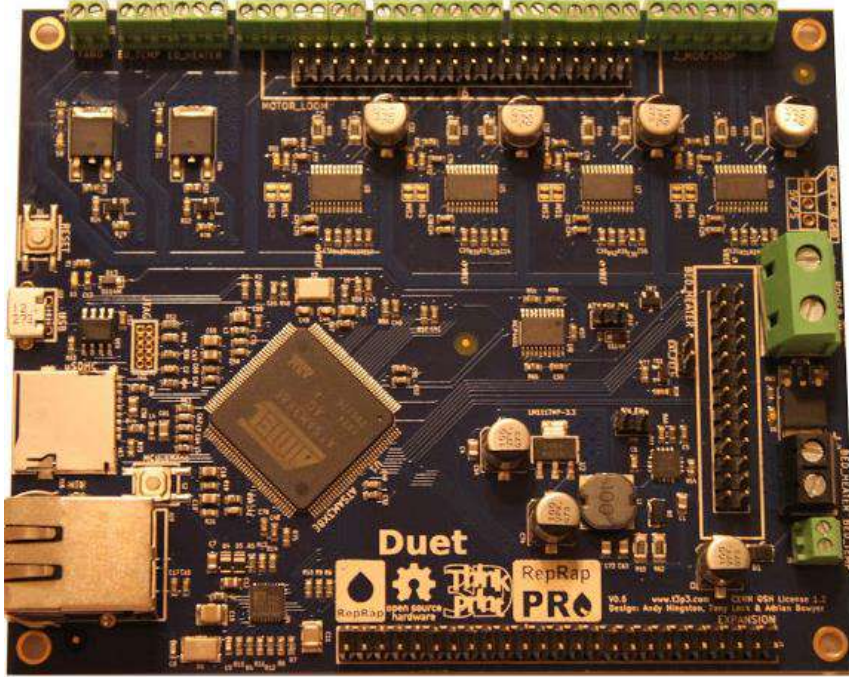


Resim 2. RAMPS bağlantı şeması

3. BULGULAR ve YORUM

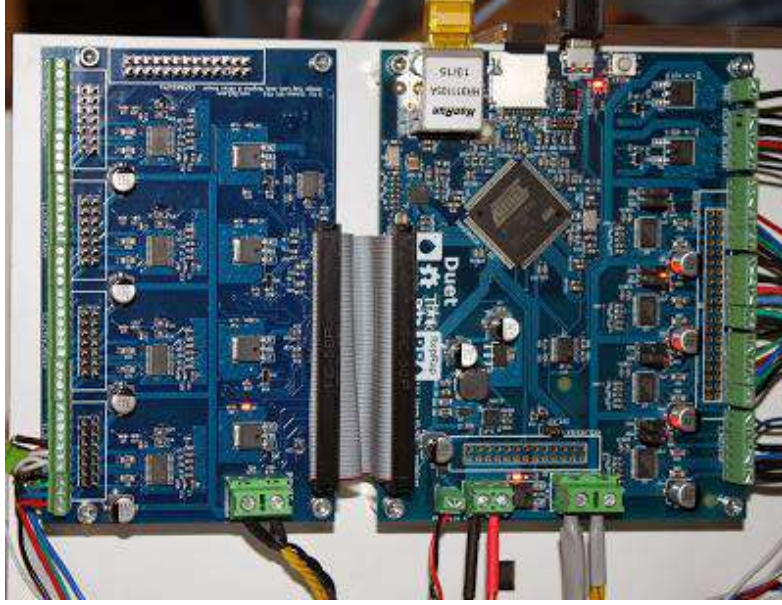
3.1 ÇOKLU-EKSTRÜDERLİ ÜÇ BOYUTLU YAZICI GELİŞTİRİLMESİ

Andy Hingston ve Tony Lock tarafından geliştirilen, "The Duet" Arduino Due ile uyumlu yeni bir üç boyutlu yazıcı kontrol kartıdır. Bu üç boyutlu kontrol kartı ile 4 step motor kontrol ünitesi, ethernet girişi ve yüksek hızda SD kart slotu entegre edilmiştir.



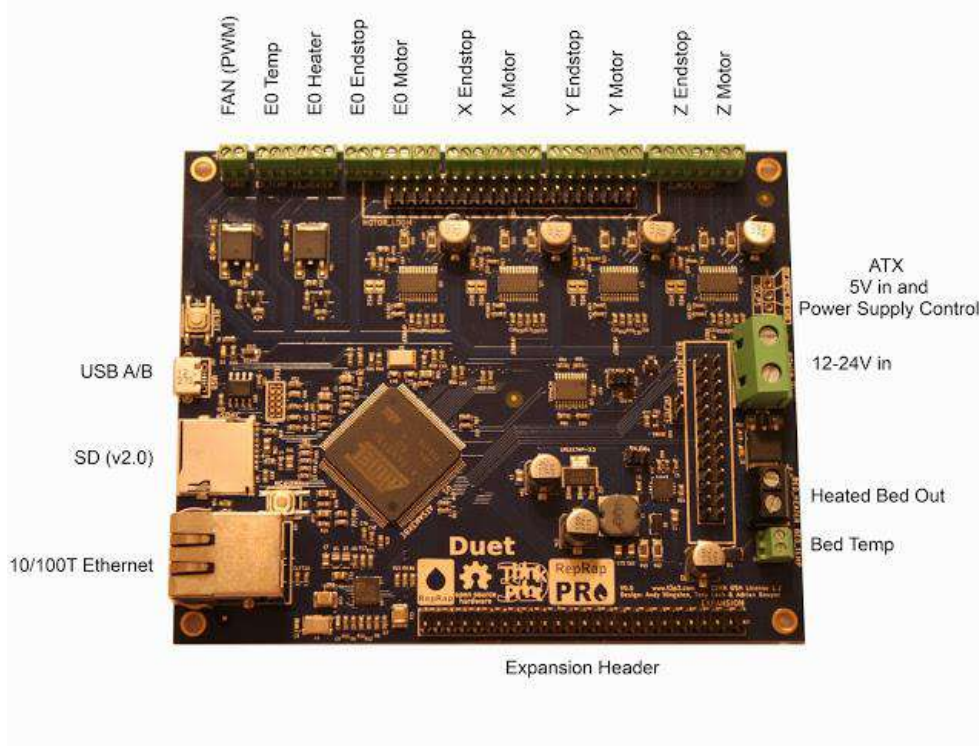
Resim 3. DUET RAMPS ana kartı

Ayrıca DUET RAMPS ek genişleme kartı sayesinde 4 step motor daha ilave edilerek toplamda 5 ekstrüder ile 8 eksene kadar yükseltilebilme özelliği geliştirilmiştir. (bkz. Resim 4-6)



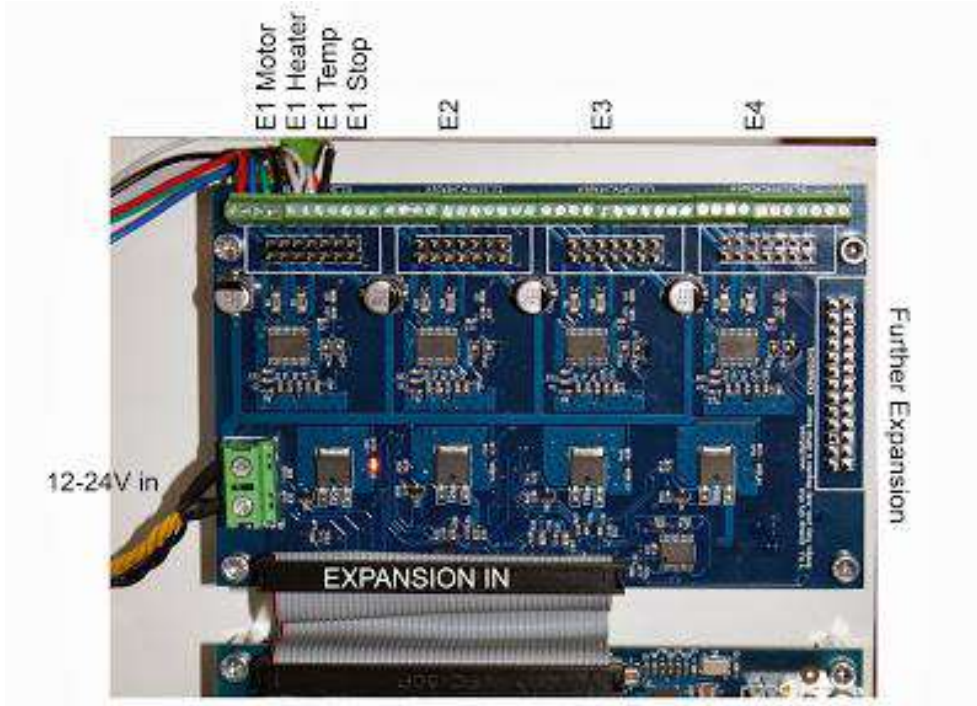
Resim 4. DUET RAMPS ve ek genişletme ana kartı

“Duet” 32 bit sistem olarak ARM çekirdeği ve SAM3X8E mikro işlemcisi olarak geliştirilmiştir. Bu 8 bitlik mikro işlemcilerin iş yükü ve kapasitelerini oldukça rahatlatabilecek bir kapasitededir.



Resim 5. DUET RAMPS bağlantı şeması

Ana kart üzerinde 4 adet Allegro A4982 step sürücü girişi (X,Y,Z,E0), 3 adet FETs (Heated Bed, E0, Fan), 2 adet termositor girişis (Heated Bed, E0), 4 adet Endstop (X, Y, Z, E) bulunmaktadır. (bkz. Resim 5.)

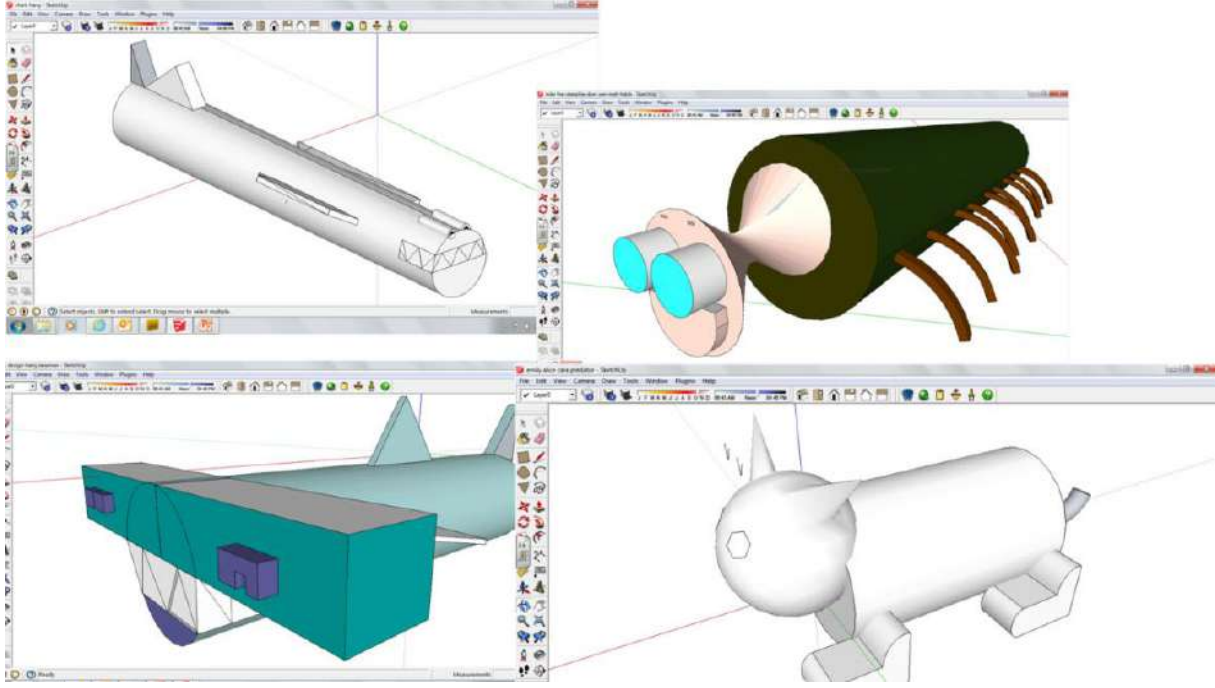


Resim 6. DUET RAMPS ek genişletme kartı

Duet RAMPS yazılım tasarımı CERN OHW lisansı ile lisanslandırılmıştır ve açık kaynak kodu olarak kullanıcılara ücretsiz olarak dağıtılmaktadır. Günümüzdeki geleneksel 3D yazıcıların büyük kısmı ilk düşük maliyetli yazıcılardan olan açık kaynak olan RepRap projesini baz almıştır. RepRap projesi açık kaynak 3D yazıcılar da devrim niteliği taşımaktadır ve günümüzde 3D yazıcıların yaygınlaşmasında büyük bir öneme sahiptir[9].

3.2 ÜÇ BOYUTLU YAZICILARIN EĞİTİME KATKISI

Öğrenciler kendi çizimlerini ortaya koyabildikleri gibi, açık kaynak kodları internette paylaşılan çok farklı ürünleri de basabileceklerdir. Bu ürünler arasında gerek ölçü gerekse fonksiyonerlik açısından geliştirmeler yapabileceklerdir. Örneğin motor kitleri dosyalarını indirerek bir motoru çalışır hale getirebilecekler, roket üretebilecekler, robotlar üreterek ve geliştirebileceklerdir. İnternet üzerinde thingiverse.com gibi sitelerde yüzlerce 3d dosyası paylaşılmaktadır.



Resim 7. Ders içeriklerinde uygulanabilecek örnek modellemeler [?]

Bastırılan parçalar ile ortaya çıkartılan bir sandalye fizik kurallarını anlamakla sonuçlanmasının yanısıra, yapılacak model geliştirmeleri ile mühendisliğe adım atılmış olacaktır. Sandalyenin dengesi, sağlamlığı ve dizaynı, ne kadar ağırlığa dayanabileceği ve estetik görünüşü kavranabilir ve geliştirilebilir olarak keşfetmeye yöneltecektir. Ayrıca ortaya çıkan ürünün maliyet hesabı dahi öğrenciler tarafından yapılabilir olacaktır.

3 boyutlu yazıcının eğitime kazandırdıkları nelerdir?

- Bazı derslerde öğrenciler tarafından anlaşılması güç olan konular öğretmenleri veya kendileri tarafından kısa sürede üretilerek 3 boyutlu görseller sayesinde anlatılması daha kolay olacaktır.
- Özellikle temel derslerde veya tasarım ağırlıklı derslerde anlatacağı konularla ilgili örneklerin küçük modelleri çıktı alınarak öğrencilerin derse olan ilgisi ve motivasyonu daha uzun süre korunabilir.
- Öğrencilerin proje tabanlı öğrenimine katkı sağlar. Öğrencilerin kendi projelerini sadece bilgisayar ortamında bırakmadan bizzat ürüne dönüştürmelerini sağlar.
- İnteraktif sınıf aktivitelerinin gerçekleştirilmesini sağlar. Öğretmenlerin öğrencileri ile paylaştığı bilgiyi sadece kitap sayfaları arasında bırakmadan istediği örneği oluşturarak öğrencilerle paylaşmasını sağlar.

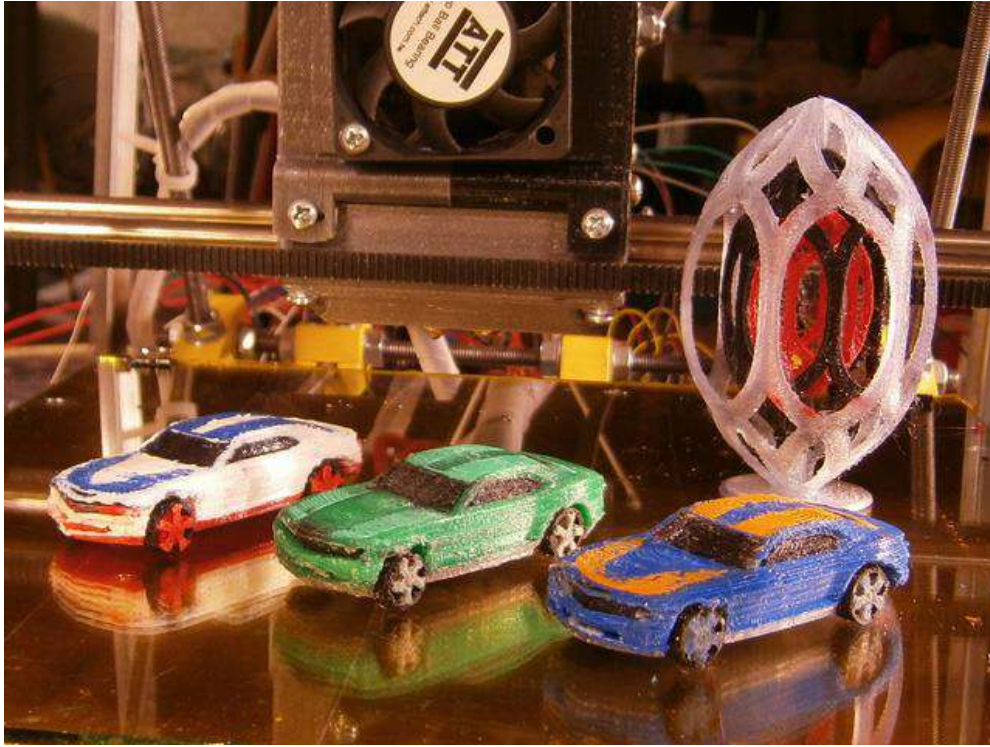
Özellikle eğitim sistemimiz içerisinde yer alan Bilgisayar ve Bilişim öğretmenlerimizin katkısı deneysel öğretime büyük katkı sağlayacaktır. Öğretmenlerimizin bu teknolojiyi eğitimlerinin içerisine almaları için teşvik edilmeleri ve bilgilendirilmeleri gerekmektedir. Yüksek teknoloji çok hızlı ilerlemesine rağmen öğretmenlerin birbirlerine desteği ile sonuca çok hızla ulaşılabilir ve kullanımını yaygınlaştırabileceklerdir. Eğitim sistemimizde 3 boyutlu yazıcıların kullanılması süreci bir alışma süresi sonucunda daha etkin olarak kullanılabilir olacaktır. Pilot olarak başlanan okullarda projeye destek veren öğretmenlerimizin gerek 3d grafik uygulamaları kullanmaları, gerekse 3d yazıcı kullanımı konusunda eğitimleri çok önemlidir. Eğitimi mutlaka pratik uygulamalar takip etmelidir[10].

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Duet RAMPS ve ek genişletme kartlarının kombinasyonu ve konfigürasyonları sayesinde, günümüzde yaygın olarak kullanılan tek ekstrüderli üç boyutlu yazıcıların çoklu-ekstrüderli yazıcılara dönüştürülebilmesi mümkün olacaktır. Ekstrüder sayısının çok olması, ürün özelliklerinde çeşitlilik ve detayların öne çıkartılmasında son derece etkilidir. Herbir katman içerisinde yer alan farklı dokuların, renk ve özelliklerin, filament de-

ğiştirme işlemi olmadan kendi katmanları içerisinde tek bir işlem sırası ile işlenebiliyor olması çoklu ekstrüder yönteminin gerekliliğini ve önemini ortaya çıkarmaktadır.

Sonuç olarak geliştirilen çoklu ekstrüderli 3d yazıcıların eğitime ve öğrencilerin yaratıcılıklarını artırma konusundaki katkıları saymakla bitmeyecektir. Bu teknolojinin okullarda kullanılmasına öncelik verebilecek ve öğrenmeye, öğrendiklerini öğrencilerine öğretmeye ve teknolojiyi kullanmaya açık öğretmenlerimize destek verilmelidir. Edinilen bilgilerin paylaşılmasına imkan sağlanmalıdır. Öğrencilerin motivasyonunun artması derslerdeki başarılarını katlanmaktadır.



Resim 7. Çoklu-ekstrüder yöntemleri ile üretilmiş ürünler.

KAYNAKLAR

1. Mustafa Halid KARAARSLAN, 3 Boyutlu Yazdırma Teknolojisi: Sosyo-Ekonomik Etkileri İçin Yeni Ufuklar
2. Stefan Junk ,Rebecca Matt “New Approach to Introduction of 3D Digital Technologies in Design Education” Procedia CIRP, Volume 36, 2015, Pages 35-40
3. Arbind Dubey¹ , Alok Pathak¹ , Ankur Sharma¹ , Chad Harris² , Daniel Rickey¹ , David Sasaki¹ , Rashmi Koul “Using 3d Printer Technology To Manufacture Anatomic Models For Patient Education: A New Frontier” University of Manitoba, Volume 120, Supplement 1, September 2016, Pages S79–S80
4. Carling L. Cheung, , Nikoo R. Saber, “Application of 3D Printing in Medical Simulation and Education” Bioengineering for Surgery, 2016 , Pages 151-166
5. Bilim ve Teknik Dergisi, Aralık 2012 Sayı 541 s. 26
6. <http://kedkem.com/urunler/3-boyutlu-yazicilar/3-boyutlu-yazicilar-hakkinda-genis-bilgi-10538.htm>
7. <http://www.alikesfet.org/3-boyutlu-yazicilarin-egitime-katkisi/>
8. <http://www.3byazici.com/2013/12/3d-printer-yapm-1-elektronik-kontrol.html>
9. Global Sanayici Dergisi, Ekim 2015 s.67
10. <http://www.alikesfet.org/3-boyutlu-yazicilarin-egitime-katkisi/>

3B TARAMA YÖNTEMİYLE SAC METAL PARÇALARIN KALINLIK DAĞILIMLARININ BELİRLENMESİ

Murat Dilmeç¹, Fahrettin Öztürk², Hüseyin Selçuk Halkacı³

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Müh.Mim.Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

²TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Kahramankazan, Ankara, Türkiye

³Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

ÖZET

Sac metal parçaların kalınlık dağılımlarının belirlenmesinde en pratik çözümlerden birisi üç boyutlu (3B) tarama yöntemidir. Sac parçaların belirli bir kesitinden kesilerek, profil projeksiyon, SEM gibi hassas cihazlarla sadece o kesitinden ölçüm yapılması yerine, bu yöntemde, parça kesilmeden, tüm parça boyunca kalınlık dağılımları belirlenebilmektedir. Özellikle anizotropik davranış gösteren sac metal malzemeler için bu durum daha da önemlidir. Ancak, 3B tarama yöntemi ile sac parçaların taranmasında, iç ve dış yüzeyler arasında geçiş yaparken, ortak referans noktaların yakalanacağı bir açının elde edilmesi zordur. Parçaların iç ve dış yüzeyleri ayrı ayrı tarandığı zaman da, yüzeylerin eşleştirilmesinde problem yaşanmaktadır. Bu çalışmada, bahsedilen problemin çözümü için numunelerin flanş bölgelerine, farklı açılardan rahatça görülebilecek dik-dörtgenler prizması şeklindeki referans parçaları yapıştırılmıştır. Bu sayede iç ve dış yüzeyler arası geçiş sağlanmıştır. 3B tarama yönteminin sac metal parçaların kalınlık dağılımlarının belirlenmesinde güvenle kullanılabileceğini test etmek için, şekillendirilmiş sac metal parçaların kalınlık dağılımları, 3B tarama, profil projeksiyon ve SEM ile ölçülmüş olup sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, farklı yöntemlerle elde edilen kalınlık dağılımlarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 3B yöntemi ile sac parçaların kalınlık dağılımlarının hassas olarak belirlenebileceği tespit edilmiştir. Böylece tersine mühendislik yoluyla 3B verileri elde edilen ince cidarlı derin parçalar 3B yazıcılarla hassas olarak üretililecektir. Ayrıca, sac metal parçaların geometrilerinin ölçülmesiyle kalite kontrol yapılarak Endüstri 4.0'ın alt yapısına kolaylık sağlanış olacaktır.

Anahtar kelimeler: 3B tarama yöntemi, sac kalınlığı ölçümü, Endüstri 4.0

3B TARAMA YÖNTEMİYLE SAC METAL PARÇALARIN KALINLIK DAĞILIMLARININ BELİRLENMESİ

ABSTRACT

One of the most practical methods is 3D scanning method for thickness distribution of the sheet metal parts. In this method, thickness distribution through whole part can be determined without cutting, instead of only cutting section with using sensitive device such as profile projector and SEM. It is very important for especially sheet metals which show anisotropic behavior. However, during scanning sheet metal part, catching the partner reference points during translate from inner surface to outer surface is very hard work. When the inner and the outer surfaces of the sheet metal are separately scanned, match-up the surfaces is problem. In this research, a reference rectangular solid part which is easily seen at different angles on the flange region of the sheet part has been glued in order to overcome this problem. So, transition between the inner and outer surfaces has been provided. The thickness distributions of the deformed parts are measured by 3D scanning method, profile projector and SEM to test the reliability of 3D scanning method for determination of the thickness distribution of the sheet metal parts. The obtained results have been compared with each other. Consequently, it is shown that the thickness distributions obtained from different methods are compatible with each other. Hence, it is concluded that 3D scanning method is reliably used for determination of the thickness distribution of the sheet metal. So, the thin-walled deep parts which are obtained the 3D data with using inverse engineering can be sensitively produced by 3D printing method. Moreover, the measurement of geometries of sheet metal parts using scanning device by performing quality control contributes the infrastructure of the Industry 4.0

Keywords: 3D scanning method, Industry 4.0, sheet thickness measurement

1.GİRİŞ

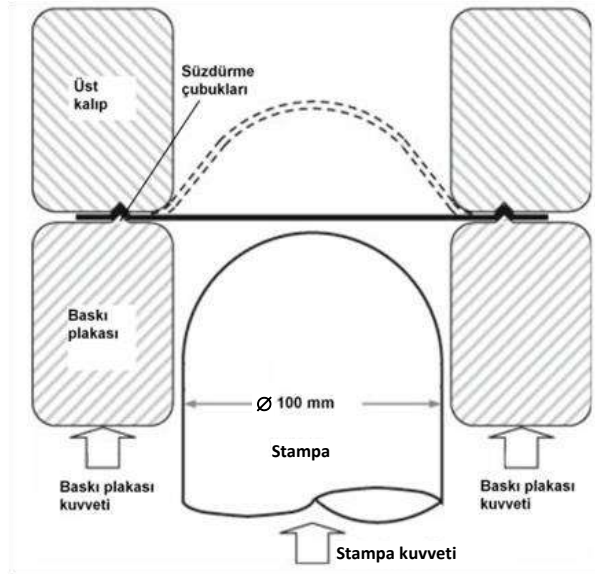
Sac metal ürünler birçok alanda çok geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu noktada sac malzemelerin şekillendirilebilirliği önem kazanmaktadır. Sac metal ürünlerin istenilen şekli almasının yanı sıra, mukavemet ve korozyon direnci açısından kalınlık dağılımlarının belirlenmesi önemlidir. Sac metal parçaların kalınlık dağılımları birkaç yöntemle belirlenebilmektedir [1]. Bunlardan birisinde, parça fiziksel olarak belirli bir kesitinden kesilerek, o kesit boyunca, profil projeksiyon ve SEM (Scanning Electron Microscope) gibi cihazlarla ölçülebilmektedir. Bu yöntemler, sadece kesilen kesitten ölçüm alabilme, numune hazırlanması zorluğu, ölçme işleminin kişisel hatalara açık olması, ölçme süresinin uzunluğu ve uygun olmayan maliyet gibi dezavantajlara sahiptir. Bir başka yöntemde, ultrasonik kalınlık ölçme cihazlarında da noktasal olarak kalınlık ölçülebilmektedir ve uygun problemler kullanılmadığında özellikle köşe radyüslerinde sağlıklı sonuçlar elde edilememektedir.

Günümüzde sac metal parçaların kalınlık dağılımlarının belirlenmesinde kullanılmaya başlanan en pratik çözümlerden ve son teknolojilerden birisi, üç boyutlu (3B) tarama yöntemidir [2,3]. Bu yöntemde, profil projeksiyon ve SEM gibi yöntemlerin aksine parça kesilmeden ve ultrasonik yöntemden daha hassas tüm parça boyunca kalınlık dağılımları belirlenebilmektedir. Sac malzemeler anizotropik bir davranış gösterdiğinden, tüm parça boyunca kalınlık dağılımlarının belirlenmesi önemli olacaktır [4, 5].

Bu çalışmada, bir şekillendirilebilirlik testi olan ve yaygın olarak kullanılan [6] Nakajima testi [7] ile şekillendirilmiş sac metal parçaların kalınlık dağılımları, 3B tarama, profil projeksiyon ve SEM yöntemleriyle ölçülmüş-tür ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Nakajima testinde numuneler, çift etkili bir preste, Şekil-1’de görülen 100 mm çaplı yarı küresel bir stampa ve süzdürme çubuğuna sahip kalıp seti kullanılarak boyunlaşma veya yırtılma başlangıcına kadar şekillendirilmiştir. Deneylerde Al 2024-T4 alaşımlı alüminyum sac malzeme kullanılmıştır. Nakajima deneyi ile şekillendirilen numuneler Şekil-2’de gösterilmiştir.



Şekil-1 Nakajima test takımı [8]

Şekillendirilmiş sac numunelerin hasar mekanizmalarını incelemek amacıyla kalınlık dağılımları 3B tarama yöntemiyle belirlenmiştir.



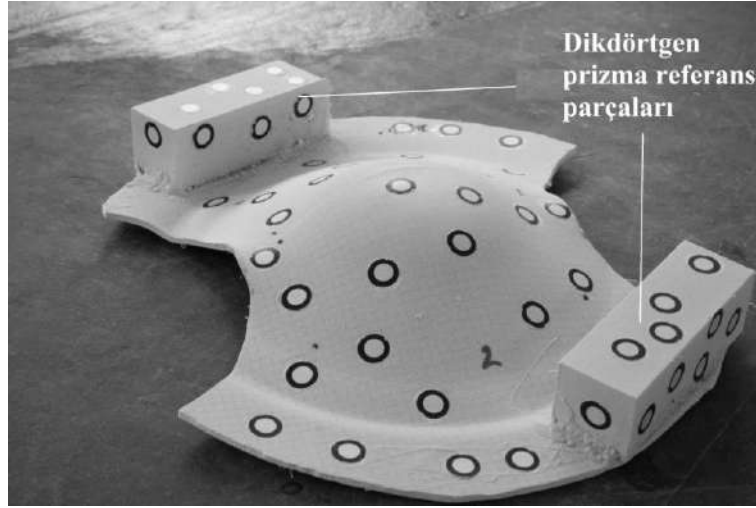
Şekil-2 Şekillendirilmiş Nakajima numuneleri

Parçaların tamamı için kalınlık dağılımını daha kolay ve kısa sürede ölçmek için, 3B Optik tarama yöntemi ile elde edilen nokta bulutları kullanılmıştır. Nakajima numunelerinden 2 mm ilk kalınlığındaki ve 100 mm genişliğindeki (g100) numuneler Şekil-3'te görülen optoTop-HE 3B optik tarama cihazında taranmıştır. Tarama yaparken referans noktaları oluşturmak için, parçanın iç ve dış yüzeylerine indeks etiketleri yapıştırılmıştır.



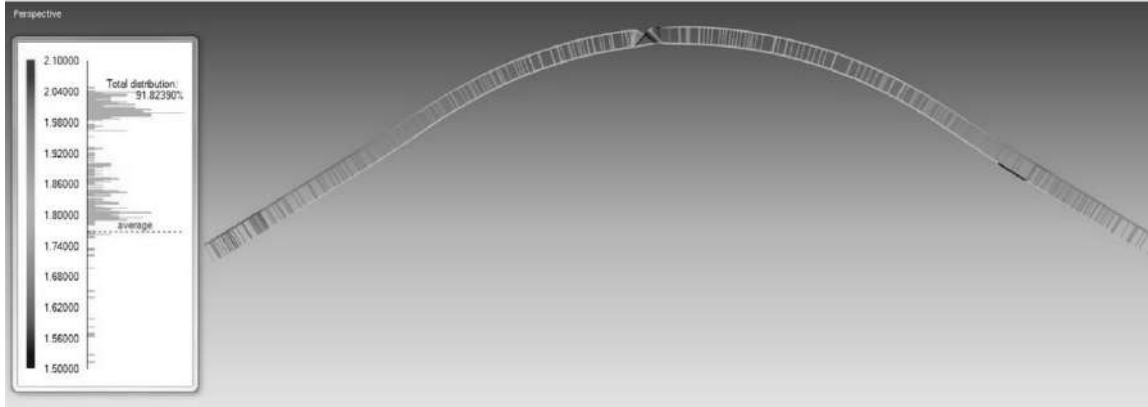
Şekil-3 Nakajima numunelerinin optik tarama cihazı ile taranması

3B tarama yöntemi ile sac parçaların taranması sırasında, sac parçanın iç ve dış yüzeyleri arasında geçiş yaparken, referans için ortak indeks etiketlerinin olacağı bir açının yakalanması mümkün olamamakta veya çok zor olmaktadır. Parçaların iç ve dış yüzeyleri ayrı ayrı tarandığı zaman da, yüzeylerin eşleştirilmesinde problem ortaya çıkmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için numunelerin flanş bölgelerine, Şekil-4'te görüldüğü gibi, farklı açılardan rahatça görülebilecek dikdörtgenler prizması şeklindeki referans parçaları yapıştırılmıştır. Bu sayede sac parçanın iç ve dış yüzeyleri arası geçiş, dikdörtgenler prizması üzerindeki indeks etiketleri ile sağlanabilmektedir. Böylece numuneler bir bütün halinde taranmıştır.



Şekil-4 Flanş bölgesine dikdörtgenler prizması şeklinde parçalar yapıştırılmış örnek bir numune

Nokta bulutları oluşturulduktan sonra Rapidform XOR yazılımında kubbe tepe noktasından geçen dik bir düzlem çizilerek Şekil-5'te görüldüğü gibi kalınlık profili ortaya çıkarılmıştır. Tüm ölçümler 3 tekrarlı olarak yapılmıştır.



Şekil-5 Optik tarama cihazı ile ölçülen örnek bir kalınlık profili

3B yöntemi ile sac parçaların taranmasının hassasiyeti ve doğruluğunu ortaya koymak amacıyla, sac parçaların kalınlık dağılımları,

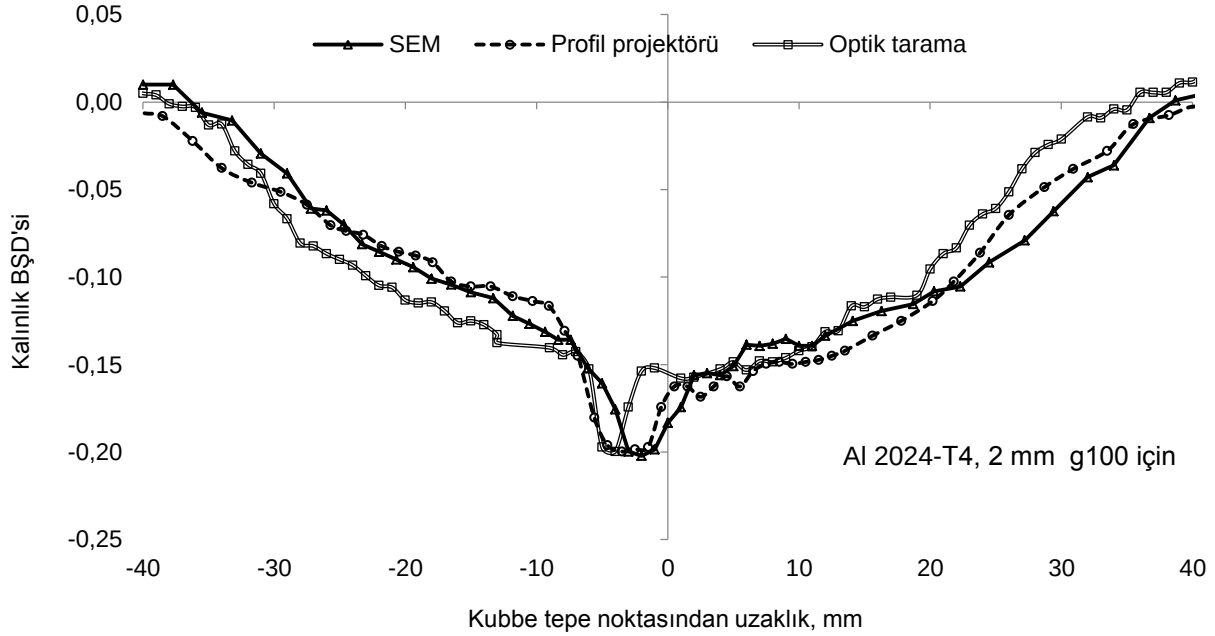
- Profil projektörü
- SEM (Scanning Electron Microscope-Taramalı Elektron Mikroskobu)

ile de belirlenmiştir. Karşılaştırmalar için 1 mm ilk kalınlığındaki g100 şekillendirilmiş Nakajima numuneleri kullanılmıştır.

3B tarama ile kalınlık dağılımları belirlenen aynı numuneler, kubbe tepe noktasından geçecek şekilde, formunu bozmayacak tarzda ortadan kıl testere ile kesilmiştir. Sonra kalınlık dağılımları profil projektörü ile 20X büyütme oranında, 1 mm aralıklarla ve 0.002 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Ayrıca kalınlık dağılımı SEM cihazı ile 70X büyütme oranında, 1 mm aralıklarla ve 0.001 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Yapılan tüm ölçümler 3 tekrarlı olarak yapılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3B optik tarama yöntemi ile ölçülen kalınlık dağılımlarının doğruluğunu belirlemek için, 2 mm ilk kalınlığındaki g100 Nakajima numuneleri için 3B optik tarama, profil projektörü ve SEM cihazı ölçülen gerçek kalınlık birim şekil değiştirmeleri (BŞD) karşılaştırmalı olarak Şekil-5'te verilmiştir.

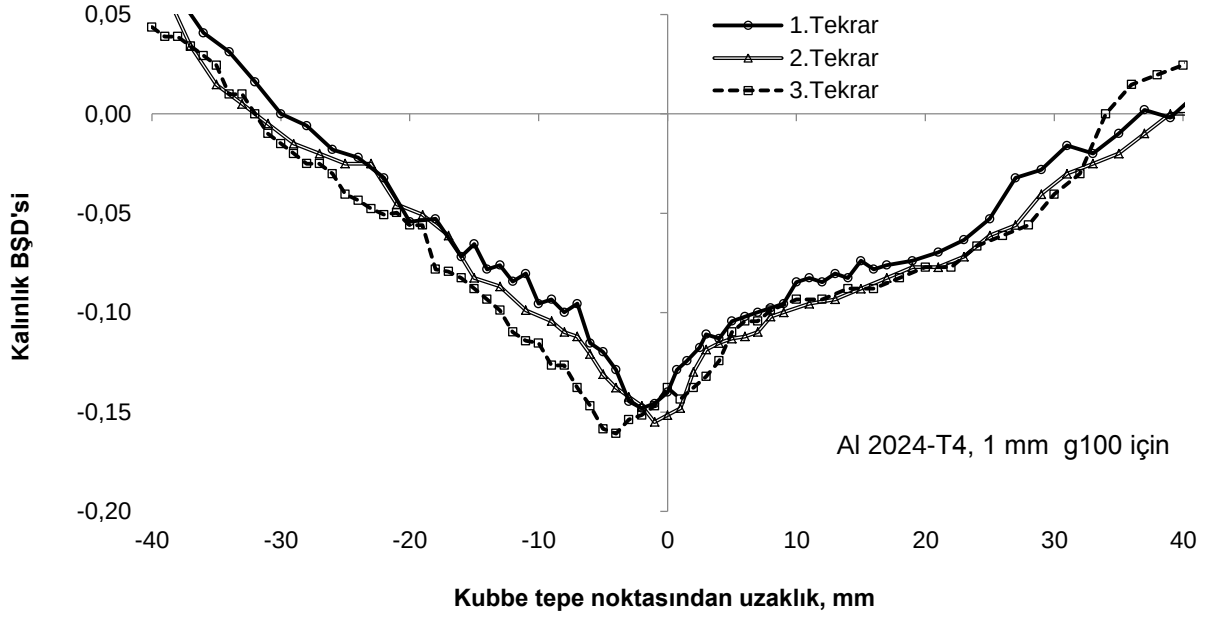


Şekil-5 Kalınlık dağılımı ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması

Şekil incelendiğinde, farklı ölçme yöntemleri sonucu elde edilen kalınlık BŞD'lerinin birbirine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Farklı genişlikteki şekillenmiş Nakajima numuneleri için de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

3B tarama yöntemiyle belirlenen kalınlık dağılımı ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini belirlemek amacıyla, bu yöntemle ölçülen Nakajima numunelerinin gerçek kalınlık BŞD dağılımları Şekil-6'da verilmiştir. 1. ve 2. tekrarlardan elde edilen dağılımlar maksimum 0,02 BŞD bir hata ile birbirine oldukça yakındır. 3. tekrar numunenin kubbe tepe noktasından diğerlerine göre uzak bir bölgede yırtılmış olması nedeniyle elde edilen dağılım biraz farklı görünmektedir. Yani burada aynı koşullarda şekillendirilmiş farklı numuneler ölçüldüğünden, parçaların üretim tekrarlanabilirliği de göz ardı edilmemelidir. Ancak 3.tekrar için olan bu eğri sağa doğru 3 mm kadar ötelenerek kalınlık dağılımının yırtık konumuna göre verilmesi ile dağılımın tekrarlanabilirliği çok daha küçük olurdu. Burada önemli olan nokta maksimum inceleme miktarıdır ve bu değer 0,006 BŞD gibi kabul edilebilir bir tekrarlanabilirlikle elde edilmiştir.

SEM ile kalınlık ölçümü, numune hazırlamadaki zorluk, ölçüm zamanının uzunluğu ve maliyet açısından uygun olmamaktadır. Profil projektörü ile ölçme işlemi de oldukça uzun sürmekte ve ölçme işlemi kişisel hatalara açık olmaktadır. Ayrıca bu her iki yöntemde de sac parçalar kesilmek zorundadır ve sadece kesilen yüzeylerdeki kalınlık dağılımları belirlenebilmektedir. Sac malzemeler ise anizotropik bir davranış gösterdiğinden farklı kesitlerdeki kalınlık dağılımlarının da belirlenmesi önemli olacaktır. 3B tarama yönteminde ise, parça bir bütün olarak tarandığından tüm parça boyunca kalınlık dağılımı elde edilebilmektedir. Ayrıca ölçme işlemi daha pratik olmaktadır. Hassasiyet bakımından da yöntemin uygun olduğu görülmüştür. Böylece tersine mühendislik yoluyla 3B dataları elde edilen ince cidarlı derin parçalar 3B yazıcılarla hassas olarak üretilebilecektir.



Şekil-6. Optik tarama ile kalınlık ölçümünün tekrarlanabilirliği

Sonuç olarak, sac parçaların kalınlık ölçümlerinin tüm numune boyunca rahatça ölçme yapılabilen 3B optik tarama ile yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Nakajima testi ile şekillendirilmiş sac metal parçaların kalınlık dağılımları, 3B tarama, profil projeksiyon ve SEM ile ölçülmüş ve elde edilen kalınlık dağılımları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. 3B tarama yöntemi ile sac parçaların taranmasında, iç ve dış yüzeyler arasında geçiş yaparken, ortak referans noktaların yakalanacağı bir açının elde edilmesi zorluğu probleminin çözümü için, numunelerin flanş bölgelerine, farklı açılardan rahatça görülebilecek dikdörtgenler prizması şeklindeki referans parçaları yapıştırılmıştır. Böylece tarama sırasında, yüzeyler arası geçiş kolayca yapılabilmiştir.
2. Farklı yöntemlerle elde edilen kalınlık dağılımı sonuçlarına göre, 3B tarama ile elde edilen kalınlık dağılımlarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 3B yöntemi ile sac parçaların kalınlık dağılımlarının hassas olarak belirlenebileceği tespit edilmiştir.
3. Profil projeksiyon ve SEM gibi yöntemlerde sac parçaların sadece kesilen yüzeylerdeki kalınlık dağılımları belirlenebilirken, 3B tarama yönteminde parça bir bütün olarak tarandığından tüm parça boyunca kalınlık dağılımı elde edilebilmektedir. Özellikle anizotropik davranış gösteren sac malzemelerde farklı kesitlerdeki kalınlık dağılımlarının belirlenmesi için bu yöntem daha uygundur.
4. Bu sayede tersine mühendislik yoluyla 3B dataları elde edilen ince cidarlı derin parçalar 3B yazıcılarla hassas olarak üretilebilecektir.

5. KAYNAKLAR

1. Lewison, D.J. and Lee D., 1999, Determination of Forming Limits by Digital Image Processing Methods.
2. Schneider M. et al, 2008, Validation and Optimization of Numerical Simulations by Optical Measurements of Tools and Parts, International Deep Drawing Research Group IDDRG 2008 International Conference, 16-18 June 2008, Olofström, Sweden.
3. Vogel J.H. and Lee D., 1990, The Automated Measurement of Strains From Three-Dimensional Deformed Surfaces, Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, Vol. 42, No. 2, pp. 8-13.
4. Marciniak, Z., Hu, S.J., Duncan, J.L., 2002, Mechanics of Sheet Metal Forming, *Butterworth-Heinemann*, London.
5. Kohara, S., 2005, Influence of Strain Path on the Forming Limit Curve in Aluminum, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36A, 1033-1037.
6. Raghavan, K.S., 1995, A Simple Technique to Generate In-Plane Forming Limit Curves and Selected Applications, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A, 2075-2084.
7. Lewison, D.J., 1999, An Assessment of Different Experimental Methods for Determination of Forming Limits, Master's Thesis, *Rensselaer Polytechnic Institute*.
8. Emilie, H. et al., 2008, Development of Forming Limit Diagrams of Aluminum and Magnesium Sheet Alloys at Elevated Temperatures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17 (3), 288-296.

3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN ABS POLİMERLERİN MEKANİK, YÜZEY VE MİKROSKOBİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE KATMAN KALINLIĞI VE FAN HIZI ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mustafa ASLAN^a, Ümit ALVER^b, Onur Güler^c, Kutay CAVA^d

a, KTU, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon/TÜRKİYE, maslan@ktu.edu.tr

b, KTU, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon/TÜRKİYE, ualver@ktu.edu.tr

c, KTU, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon/TÜRKİYE, onurguler@ktu.edu.tr

d, KTU, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon/TÜRKİYE, cavakutay@gmail.com

Özet

Eriyik yığıma modelleme tekniği, bilgisayarda tasarlanmış ürünlerin 3 boyutlu bir yazıcı ile kolayca direk olarak ürüne dönüşebildiği ve birbirini izleyen birçok katmanlı üretim parametresinin kullanıcı tarafından kontrol edilebildiği en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Ortaya çıkan ürünlerin kalitesi yazıcı üretim parametreleri ile kontrol edilmektedir. Bu çalışmada, katman kalınlığı (0.1, 0.2 and 0.3 mm) ve fan hızının (3750 ve 2250 rpm) üç boyutlu olarak basılan ABS (Akrilo bütadien stiren) polimerinin çekme özellikleri, sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve kırılma yüzeylerine ait mikroskopik gözlemlere olan etkisi incelenmiştir. Katman kalınlığı 0,1 mm olan ABS numunelerde çekme dayanımı, uzama değerleri diğer numunelere göre daha yüksek elde edilmiştir. Bununla birlikte, katman kalınlığının ve fan hızının numunelerin elastikiyeti ve sertliği üzerinde etkisi açısından bir farklılık belirlenmemiştir. Fan hızı 2250 rpm olan test numuneleri, fan hızı 3750 rpm olan numunelerden daha yüksek çekme dayanımı, daha yüksek uzama ve daha fazla yüzey pürüzlülüğü göstermiştir. Test numunelerine ait kırılma yüzeylerinden elde edilen mikroskopik gözlemler ile kırılma tipleri, porozite miktarı ve filamanların ergime davranışı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3 boyutlu yazıcı, ABS, Katman Kalınlığı, Fan hızı, Mekanik Davranış, Mikroskop

INVESTIGATION OF EFFECT OF LAYER THICKNESS AND FAN SPEED ON MECHANICAL, SURFACE AND MICROSCOPIC PROPERTIES OF 3D PRINTED ABS POLYMERS

Abstract

Fused deposition modelling is one of the most used techniques that allows users to control many sequential layering process parameters and can be directly manufactured from computer-generated 3D printed products. The quality of the products is controlled by the process parameters of the printers. In this study, the effect of three-layer thickness (0.1, 0.2 and 0.3 mm) and two fan speeds (3750 and 2250 rpm) on tensile properties, hardness, surface roughness as well as microscopic observation of fracture surfaces of 3d printed Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) were investigated. It was observed that the tensile strength and elongation of the samples with 0.1 mm layer thickness showed the highest results when compared with other samples. However, the stiffness and hardness of the ABS samples were not affected with layer thickness and fan speed. The fan speed with 2250 rpm of samples showed higher tensile strength, higher elongation and higher surface roughness than those of fan speed with 3750 rpm. With the microscopic observations on fracture surface of the samples revealed, failure types, an amount of porosity and melting behavior of the filaments were investigated.

Keywords: 3d printing, ABS, Layer Thickness, Fan Speed, Mechanical Behavior, Microscopy

1. Introduction

By selecting manufacturing parameters, Fused Deposition Modelling (FDM) processes can potentially produce prototypes with desired properties. The properties of FDM parts can be locally controlled in by changing deposition densities and orientation [Comb et. al. 1994]. To fully exploit this potential, issues concerning the fabrication process and the mechanical properties of FDM parts should be investigated [Li et. al.].

Common research studies in FDM have been focused on development of a new material, deposition method and characterization of quality of the FDM parts [Alexander 2000]. Kulkarni and Dutta (1999) described the relation between deposition variables and stiffness properties of FDM parts produced. ABS parts made by FDM process consist partially melted and bonded filaments. Many researchers have studied optimization of process parameters for production of ABS parts by Taguchi method and found that FDM parameters, i.e. layer thickness, raster angle and air gap significantly affect the elastic performance of

the compliant polymer prototype [Anitha 2001, Sood et al 2010]. Ahn et al. (2002) also described that decreasing of layer thickness results to improving surface quality and mechanical properties by decreasing gap size in microstructure. Similarly, as the layer thickness increases, less number of layers will be required and distortion effect is minimized and hence, strength increases [Bellehumeur 2008]. Another important factor is the air gap that forms during fabrication and remains present between fibers of the FDM specimens. This is a significant factor in considering tensile ultimate and yield strengths and comparing these properties to those of injection molded ABS specimens.

Even though the fan speed is not a common process variable to control, the setting of fan speed is another indirect process factor required to be determined for each polymer raw material type. Because, it is likely that more cooling of each beads might potentially affect viscosity and flow rate of the polymers [Ahn S. et al 2002]. Previous research results suggested that better control of the cooling state might have strong influence on the mechanical properties and accuracy of the final FDM parts [Sun 2008]. The purpose of this paper is to show experimental findings in which the effect of two basic process parameters, layer thickness and fan speed, on the tensile behavior of unidirectional ABS samples was examined.

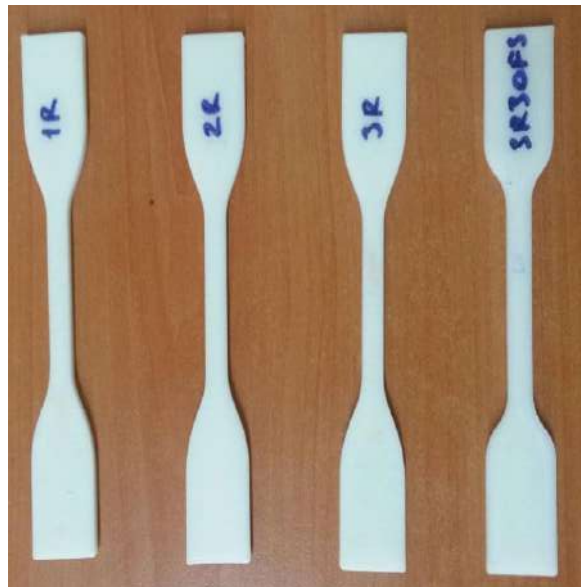
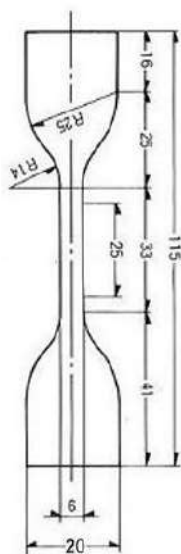
2. Experimental

In this study, ABS (Acrylo butadiene styrene) filaments were used for producing of the tensile testing with 3D printing. The ABS filaments were provided from Zaxe 3D Printing Technologies, İstanbul, Turkey. Five samples that have the dimensions in Figure 1 were printed according to related standards (ISO 527a 5b) for each tests. The tensile testing samples produced by 3D were designed with SolidWorks CAD Software and converted STL format. Afterwards, a FDM machine (Zaxe X1 3D Printer) that has the design of the samples drawing was used to produce of the tensile test samples. Figure 2 shows the technical drawing of the samples design produced by 3D printing process and Figure 7 shows the printed samples for tests.

The printing parameters of the samples produced by 3D printer were given at Table 1. Given parameters were kept constant for all samples throughout the experiment. Extrusion temperature of the samples was 220 °C and table temperature was set as 100 °C. During printing, first layer was used as a raft layer in order to release samples easily. Extrusion speed was kept at 50 mm/s and fill density was %100 for all samples. The deposition angle of the sample in the gauge section was set as 0 degree in order to determine effect of fan speed and layer thickness on interaction of melted filaments in the failed section.

Table 1. The printing parameters

Parameters	Unit	Value
Printing Temperature	[°C]	230
Table Temperature	[°C]	100
Nozzle diameter	[mm]	0.4
Primary Layer Height	[mm]	0,15
Outline Shell Thickness	[mm]	1
Fill Density	[%]	100
Flow	[%]	100
Print Speed	[mm/s]	50

**Figure 1.** 3D printer**Figure 2.** Technical drawing of the samples (ISO 527a 5b) and printed samples

The tensile strength measurements were done using an MTS model 45 electromechanical test instrument at room temperature with a cross-head speed of 1 mm/min (Figure 3). While the specimens with the layer heights of 0.1 mm, 0.2 mm and 0.3 mm were coded as 1R, 2R and 3R, respectively, the produced specimen with the fan speed of 2250 rpm and the layer height of 0.3 mm was coded as 3R30FS. The hardness of all samples was measured by the Vickers Hardness Method and at least five measurements was taken at a load of 500 gf.

The surface roughness values of the ABS samples produced with FDM machine were obtained with a profilometer (Mahr MarSurf PS1). Measurements were made based on ISO 4287/1 for determining the average surface roughness (Ra) value. The cut off value is 0.8 mm and the total measurement length (Cut-off x 5) is 4 mm. The average roughness values were saved after the tests were done five times for each sample.



Figure 3. Tensile strength equipment

The fracture surfaces of the printed samples obtained after the tensile tests were characterized with a scanning electron microscopy (SEM) (Zeiss Evo LS10).

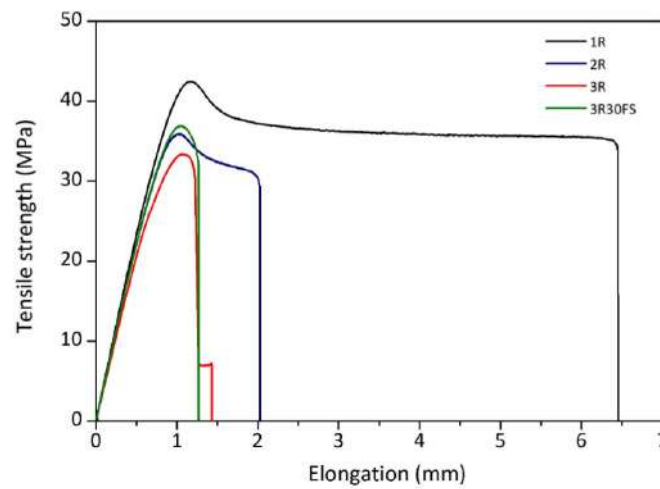
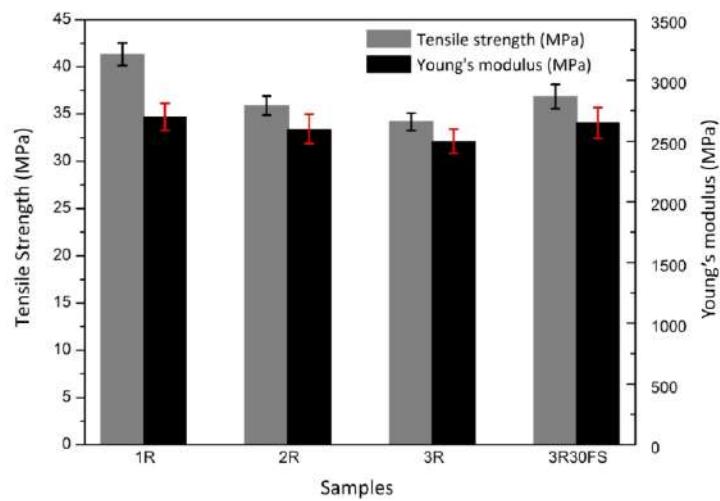
3. Results

3.1. Tensile properties

As shown in Table 2, the obtained values of the 3d printed tensile test samples is presented. Moreover, the combined tensile strength- elongation graphs of the all printed samples in this study can be seen in Figure 4. As can be understood from Figure 4, 1R sample showed the highest elongation value while 3R30FS sample showed the lowest one. It is considered that the fan speed is a very effective parameter for the elongation because slower fan speed caused the cleavage fracture of the sample. Therefore, 30R30FS sample didn't show that much elongation. And it is clear that while increasing the layer thickness, elongation value is decreased.

Table 2. The tensile properties of the printed samples

Samples	Tensile Strength	Young's Modulus	Elongation (%)
	[MPa]	[MPa]	
1R	41,32217	2700	7
2R	35,8936	2600	4
3R	34,17867	2500	5
3R30FS	36,8484	2650	4.5

**Figure 4.** The tensile strength-elongation lines of the samples**Figure 8.** Comparison of the values of tensile strength and young's modulus for the printed samples

Moreover, increase of number of layers increases the number of heating and cooling cycles and thus residual stress accumulation increases. This may result in distortion, interlayer cracking and part de-lamination or fabrication failure. Therefore, strength will reduce (Figure 8). Thick rasters are concluded with stress accumulation along the width of part and have a same effect like the long rasters. But this stress accumulation causes high temperature near the bonding surfaces. This situation can enhance the diffusion and can provide the strong bond formation.

3.2. Surface roughness

The obtained surface roughness values from the printed samples were given above Table 3.

Table 3. Surface roughness values of the printed samples

Samples	Surface Roughness (Ra)
1R	4.339
2R	4.260
3R	2.339
3R30FS	4.046

Considering the surface roughness values of ABS samples, the following results can be achieved: Increasing the layer thickness increases the surface roughness. The best surface roughness value was determined at 50% fan speed and 0.1 mm measurement. When the fan speed is running at 30% speed (2250 rpm), the surface roughness shows roughly twice the surface roughness compared to the working condition of %50 speed (3750 rpm). The late realization of the frost negatively affects the surface roughness. Especially at higher layer heights, this difference can be clearly seen.

3.2. Surface hardness

When it is observed the hardness values of the printed samples, it was seen not much difference of the values. But, it can be considered that the hardness value of 3R30FS sample is higher than the others because of the closing of the gaps formed on the surface when the fan speed is lowered.

Table 4. Surface hardness values of the printed samples

Samples	Hardness values (HV)
1R	13.405
2R	13.052
3R	13.69
3R30FS	14.28

3.3. Fracture Surfaces

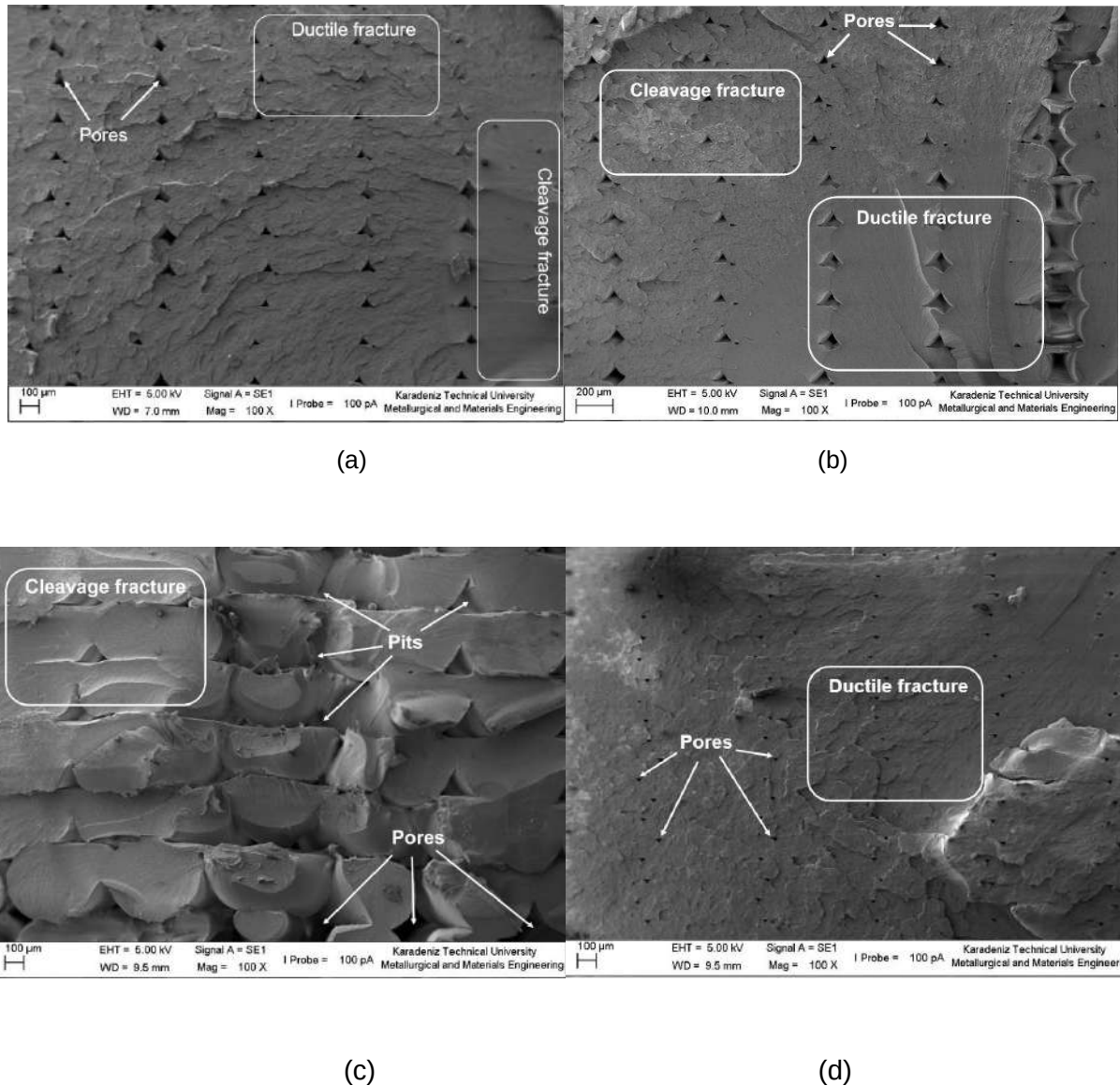


Figure 9. Fracture surfaces of the printed samples with layer height of (a) 0.1 mm, (b) 0.2 mm, (c) 0.3 mm and fan speed of (d) 2250 rpm for sample with 0.3 mm layer height

Although the 3d printer settings shows a desired air gap of zero, the fiber geometry inherently causes the presence of triangular air voids as seen in the SEM image. The tensile strength of these specimens depended much more heavily upon the fibre-to-fibre fusion and any air gap resulting between the fibres, as opposed to the strength of the fibres themselves. Positive air gap causes flow of material towards the adjacent layers through the gap and increases bonding surfaces. Therefore, the number of air gaps decrease and these air gaps became narrower (Figure 9 d). And this situation is concluded with the increase of the surface hardness. With the increase of the layer thickness, the pits and gaps increase on the fracture surfaces as can be seen in Figure 9. But as mentioned before, by using the lower fan speed, that effect can be prevented to obtain higher tensile strength and hardness. Already, when compared the fracture surfaces of the 3R (fan speed of 3750 and layer thickness of 0.3 mm) and the 3R30FS (fan speed of 2250 and same layer thickness of 0.3 mm), it can be clearly seen that pores decreased and became smaller (Figure 9 c and d, respectively).

4. Conclusions

The response layer thickness and fan speed involving interaction terms were studied and the obtained results were summarized as follows.

When it is seen from the obtained surface roughness values of the printed samples, it was determined that with the increase of the layer thickness, surface roughness decrease when the layer thickness became 0.3 mm (3R ABS sample). But when the fan speed was decrease for this sample, the surface roughness almost doubles.

With the increase of the layer thickness, tensile strength and elongation values of the ABS samples were decreased. In addition, when compared the values of tensile strength of 3R and 3R30FS, even so that ABS sample have the same layer thickness of 0.3 mm, it was seen that 3R30FS ABS sample had higher tensile strength and hardness value than 3R ABS sample. Because it is considered that with the decrease of the fan speed, the bonding between layers become stronger. Moreover, as can be seen in fracture surfaces, with the increase of layer thickness cleavage fracture increases with decreasing of the elongation. And on the other hand, the amount of the air gaps almost become lost with the fan speed decrease. And this can result in increase of the surface hardness and tensile strength.

References

1. Sood, A K, Ohdar, R.K. Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts Materials and Design 31 (2010) 287–295
2. Q. Sun G.M. Rizvi C.T. Bellehumeur P. Gu, (2008), "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments", Rapid Prototyping Journal, Vol. 14 Iss 2 pp. 72 – 80
3. L. Li and Q. Sun, C. Bellehumeur, P. Gu, Composite Modeling and Analysis for Fabrication of
4. FDM Prototypes with Locally Controlled Properties Journal of Manufacturing Processes Vol. 4/No. 2 130-139, 2002
5. P. Kulkarni and D. Dutta Deposition Strategies and Resulting Part Stiffnesses in Fused Deposition Modeling J. Manuf. Sci. Eng 121(1), 93-103 1999
6. Alexander, P. and Dutta, D. (2000), "Layered manufacturing of surfaces with open contours using localized wall thickening", Computer Aided Design, Vol. 32 No. 3, pp. 175-89.
7. Comb, J. W. ,Priedeman, W. R., Turley, P. W., Layered Manufacturing Control Parameters and Material Selection Criteria Manufacturing science and engineering, PED; 68 (2), 547-556, 1994
8. B.H. Lee, J. Abdullah, Z.A. Khan Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object Journal of Materials Processing Technology 169 (1),54–61, 2005
9. Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P. K.: Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, Rapid Prototyping Journal, 8(4), 2002, pp.248–257.
10. Anitha, R., Arunachalam, S. and Radhakrishnan, P. (2001), "Critical parameters influencing the quality prototypes in fused deposition modelling", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118 Nos 1/3, pp. 385-8.
11. Bellehumeur CT, Gu P, Sun Q, Rizvi GM. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid Prototyp J 2008;14(2):72–80.
12. Ziemian, C., Sharma M., and Ziemian S., Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling Mechanical engineering Chapter 7 April 11, 2012

Comparison of the Production Processes of Nickel-Titanium Shape Memory Alloy through Additive Manufacturing

Peduk G.S.A.^{1,2}, Dilibal S.², Harrysson O.¹, Özbek S.²

¹ North Carolina State University, NC, USA

² İstanbul Gedik University, Turkey

ABSTRACT

Shape memory alloys are a group of intermetallic materials that exhibit distinctive properties in biomedical, aerospace, robotics, mechatronics and many other engineering applications. Among them, the nickel-titanium (NiTi) shape memory alloys (SMA) are the most attractive materials due to their significant physical and mechanical properties including one-way and two-way shape memory effect, superelasticity and high damping coefficient. Development of these materials using conventional production methods is still a challenging task due to the high chemical sensitivity and thermomechanical characteristics. However, the recent technological innovations provide a new manufacturing technique which is called additive manufacturing. Additive manufacturing has attracted much attention and can provide more effective, lower cost and higher productivity solutions rather than the conventional melting and powder metallurgical methods for the NiTi components. As part of AM, the electron beam melting (EBM) or a direct selective laser melting (SLM) processes provide new opportunities for direct melting of parts using a high-power electron beam or a laser beam. In this study, a comparison is made on the processing of NiTi alloy via AM. Furthermore, the effect of powder properties on the production of NiTi shape memory alloy is investigated.

Keywords: Additive Manufacturing, Nickel-Titanium Alloy, Shape Memory Alloys

Katmanlı İmalatla Üretilen Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşımların Üretim Proseslerinin Karşılaştırılması

ÖZET

Şekil bellekli alaşımlar, biyomedikal, havacılık, robotik, mekatronik ve diğer birçok mühendislik uygulamasında ayırt edici özelliklere sahip olan intermetalik malzeme grubudur. Bunların arasında, nikel-titanyum (NiTi) şekil bellekli alaşımlar (ŞBA), tek yönlü ve iki yönlü şekil bellek etkisi, süperelastik davranış ve yüksek sönümlenme katsayısı gibi önemli fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı en etkin kullanılabilen malzemelerdir. Bu malzemenin geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak geliştirilmesi, yüksek kimyasal hassasiyet ve termomekanik özelliklerden dolayı halen zor bir süreçtir. Bununla birlikte, son teknolojik gelişmeler, katmanlı imalat olarak adlandırılan yeni üretim tekniğini ortaya çıkarmıştır. Katmanlı imalat, NiTi bileşenleri için geleneksel ergitme ve toz metalürjisi yöntemlerinden daha etkili, düşük maliyetli ve yüksek üretilebilirlik çözümleri sağlamaktadır. Katmanlı imalat yöntemleri içerisinde yer alan, elektron demet ergitme (EBM) ve direkt seçmeli lazer ergitme (SLM) işlemleri, parçaların yüksek güçlü elektron ışını veya lazer ışını kullanılarak doğrudan ergitilmesi ile yeni fırsatlar ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada, katmanlı imalat ile NiTi alaşımın üretim süreçleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, kullanılan toz özelliklerinin NiTi şekil bellekli alaşım üretimine etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı İmalat, Nikel-Titanyum Alaşım, Şekil Bellekli Alaşımlar

1.Introduction

Additive Manufacturing (AM) used to be referred to as rapid prototyping (RP) and 3D printing in the industry for many years until the actual users noticed that the meaning of these terms is limited to describing the prototyping aspect and not the manufacturing capabilities that these technologies provide [1]. According to the terminology which is defined by the ASTM subcommittee, the additive manufacturing (AM) is defined as "a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies". Additionally, synonyms are expressed as additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing, and freeform fabrication [2]. In the AM process, material is added layer by layer according to the original CAD data in order to produce the actual part. Thus, the description of the desired part geometry as a 3D design, formation of the geometrical information of layers and generation of the physical part are the fundamental key factors to be considered. Despite the fact that the type of the production process or raw material characteristics may be

different in AM techniques, the fabrication consists of eight similar stages of all types throughout the development process as described in Fig.1.

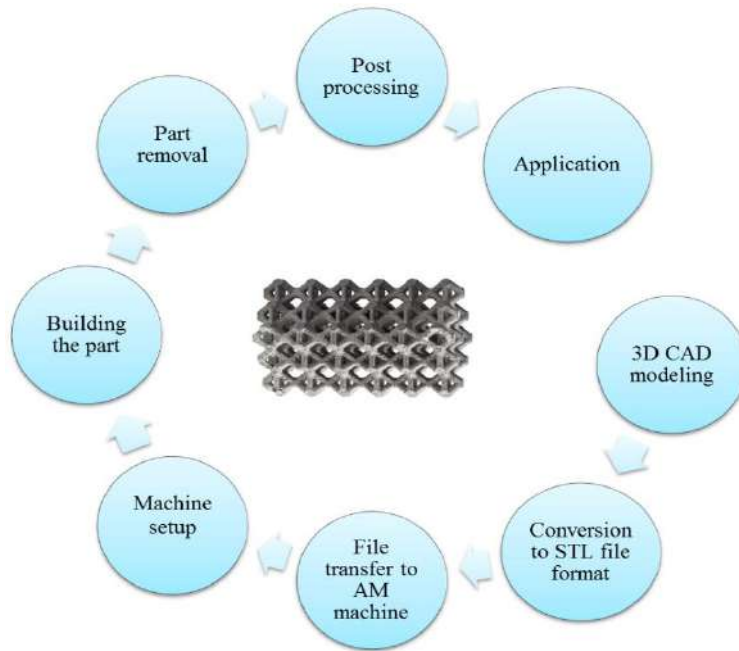


Figure 1.General AM processing steps

The term shape memory alloys (SMA) refers to a group of intermetallic materials that exhibit reversible shape change upon heating above the austenite final temperature after applying the required thermomechanical treatments [3,4]. After the discovery of the shape memory and superelastic effects in NiTi alloys, its applications have been expanded in both commercial and industrial fields including biomedical, aerospace, automotive, robotics, soft actuators, and micro-electromechanical systems [5-9].

2. Additive manufacturing of nickel-titanium shape memory alloys

Although NiTi SMAs are promising materials, the difficulties of the processing, melting and machining limit its potential applications. Particularly, due to the induced martensitic transformation and poor thermal conductivity properties, the adhesion and the tool wear can easily occur during machining. The grinding and laser cutting applications which involve crucial challenges create intermetallic phases and lead to crack formation in the heat affected zone [10-12]. The intermetallic compounds cannot be removed with conventional processing methods and require post-processing heat treatments. Additionally, fully dense materials cannot be achieved even with PM processes owing to the capillary forces coming from these compounds [13]. Thus, the production of NiTi alloy with high chemical homogeneity and good shape-memory properties especially for complex shapes and geometries is still challenging. The microstructural properties of the Ni-Ti alloys have significant effect on the static and dynamic mechanical behavior. The average diameter of the equiaxed grains should be maximum of 90 μm according to the related ASTM standard and Hall-Patch relation. Layer-based melting techniques provide anisotropic microstructures with elongated grains in the building direction and lead to that the crystallization depends on the process parameters including the powder layer thickness, the laser/ beam power, and the scanning velocity [14]. Thus, the additive manufacturing technique provides an attractive processing method for NiTi SMAs to overcome the manufacturing challenges by using layer by layer fabrication principles and the design flexibilities [15-17].

3. Comparison of the production processes

NiTi alloys can be produced using different AM techniques depending on the heating source for the melting of the powder materials; such as electron beam and laser beam. The main difference between the EBM method and laser-based methods is the usage of photons instead of electrons as a source of energy to melt the powder particles as seen in Figure 2.

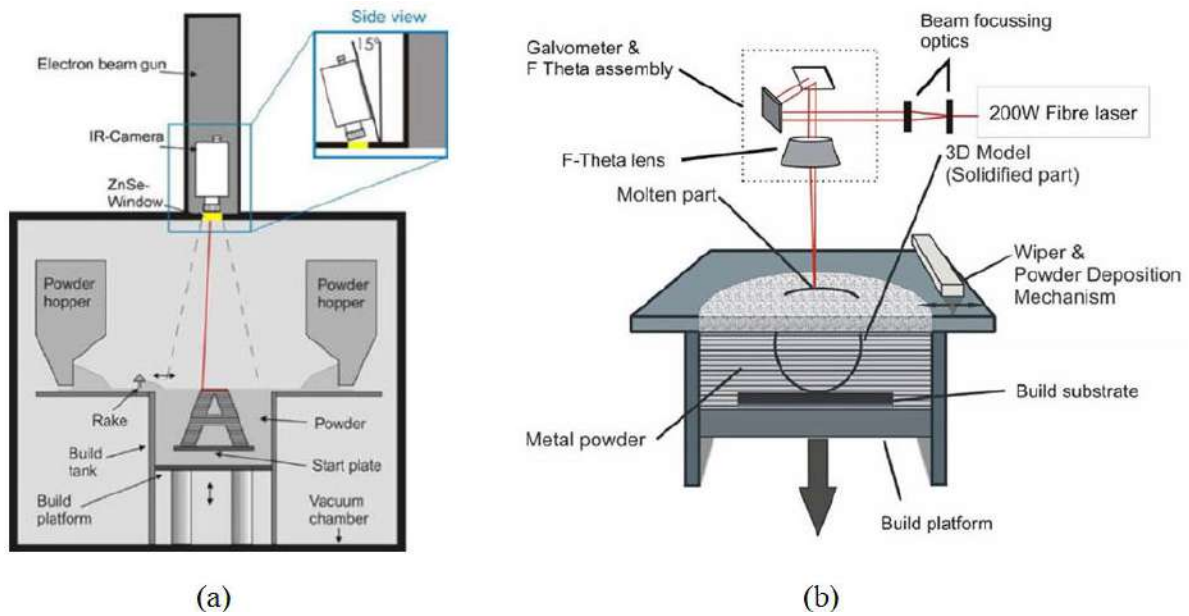


Figure 2. Schematic illustration of working principles; a) Electron beam melting [18], b) Laser beam melting [19]

There are many advantages of the EBM process compared to laser systems as described in Table 1; such as higher power efficiency, superior material properties, and 98% recyclability of metal powders used as raw materials. The control of process parameters in the EBM system is similar to the laser based systems. However, the electron beam control system does not contain any optical or moving reflectors as in laser based control systems. In addition, in order to obtain maximum efficiency in the laser system, it is necessary to match the wave lengths to different materials. While very high energy levels can be achieved with a narrow beam in electron beam systems, the power efficiency is reduced due to the excessive reflection of the photons in the laser systems. The penetration depth of an electron beam into the irradiated material is obviously greater than a laser beam. The EBM method does not require moving parts in order to deflect the beam, resulting in high scan and production speeds [20]. While the lifetime of the laser is limited, there is no restriction on the duration of use of the electron beam other than the life of the filament. The vacuum system in the EBM machines ensures a clean environment and helps to outgas impurities during processing which is highly important for the reactive metals such as Ni and Ti [21]. In contrary to EBM process, the selective laser melting (SLM) process with its inert argon atmosphere leads to higher oxygen content. Another significant advantage of the EBM system is the high scanning capability of the electron beam to preheat the powder. These advantages are important for the build process selection and the final physical properties of NiTi alloys [22, 23]. However, no previous report was found to date in the literature associated with the production of NiTi alloys via electron beam melting. In the scope of our future work, the additive manufacturing of NiTi alloys via the EBM process is going to be investigated including development of process parameters and observation of their effects on the physical properties of the alloy.

Table 1. Comparison of the main features of laser beam melting and electron beam melting

Features	Laser Beam Melting	Electron Beam Melting
Thermal Source	Fiber Laser [24]	Electron Beam [25]
Environment	Inert Gas (Argon/Nitrogen) [24, 26]	Vacuum <5 × 10 ⁻² Pa chamber pressure, <5 × 10 ⁻⁴ Pa column pressure [25, 26]
Building Volume	250x250x325 mm [24]	200x200x180 mm [24]
Max. Beam Power	200/400 W [24]	3000 W [25]

Layer Thickness	20-100 μm [27]	50-200 μm [27]
Powder Fractions	25-75 μm [28]	45-105 μm [21, 29]
Operation Temperature	100-200 $^{\circ}\text{C}$ [26]	400-1000 $^{\circ}\text{C}$ [26]
Main process parameters	Melting: Laser power, scan speed, hatch spacing, and layer thickness [30]	Preheating, melting stages: Scanning speed, beam current, focus offset, line order, layer thickness, speed function [31]
Residual Stresses	Significant [26]	Minimum due to the preheating [26]

Several research groups have studied the production of Ni-Ti alloys using AM processes. These research projects have focused on the laser-based AM systems such as selective laser sintering (SLS), selective laser melting, direct metal laser sintering and LaserCUSING to produce NiTi components [28, 32-34]. In this regard, while fabricating dense parts via any of the AM systems, the process parameters should be optimized by minimizing the impurity pick-up without affecting the phase transformation temperatures with correct energy input in order to improve the functional properties of the alloy. For instance, Hamilton et al. fabricated Ni-Ti alloys by laser-based directed energy deposition system on a CP-Ti substrate after preheating up to 390 $^{\circ}\text{C}$ as seen in Figure 3. This established setup diminished the thermal excursions and residual stresses [35].

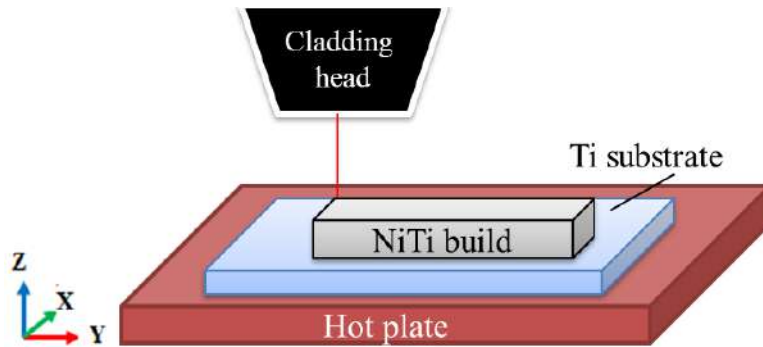


Figure 3. The build plan for laser-based directed energy deposition of NiTi SMAs [35]

Xu et al. investigated the effect of laser solid forming process parameters on the microstructure of Ti-50wt%Ni alloy. After setting the laser power to 2-3 kW, the scanning speed of 3-7 mm/s and the beam diameter of 4 mm, TiNi dendrites are obtained as the main phase. Additionally, increasing laser energy density caused the coarsening of dendrites. Furthermore, increasing the scanning velocity and decreasing the laser power, decreased dendritic arm spacing and caused the formation of two-phase TiNi + B2 eutectic dendrites and finally to TiNi + Ti₂Ni anomalous eutectic microstructures from the primary TiNi dendrite [36]. In another study by Shishkovsky et al. Ti-55wt%Ni alloy fabricated with 97 % of relative bulk density via SLM process preheating up to 900 $^{\circ}\text{C}$ with the process parameters following as: the hatch distance of 100 μm , laser power of 50 W, laser beam diameter of 60 μm and the scan velocities 100 and 160 mm/s under the additional heating up to nearly 500 $^{\circ}\text{C}$. At lower energy input, the monolayers dispersion was indicated and grains were segregated after a high-speed laser recrystallization from the melt [37].

4. The effect of powder properties on the production

The EBM process begins with the formation of the first layer by raking spherical metal powders of 45-100 μm in size onto a steel platform serving as an initial substrate that has been preheated by the beam. After the accelerated electron beam has melted the metal powder by scanning a layer respectively, new powder is spread to form the second layer at the determined thickness. Preheating is carried out by a defocused beam,

between the layers to ensure that the powder is added to the previous layers with low thermal stress and sintered. After a layer is melted, new metal powders are added to form the other layer, so that the cycle continues until the final part is built, based on the CAD design [31, 38, and 39]. Therefore, the feedstock quality of the powder is seen as one of the most important process inputs which is identified by the powder morphology, size, distribution, composition, conductivity and evaporation [29, 40]. In this regard, some powder characterization methods are utilized within the AM processes as classified in Table 2.

Table 2. Powder characterization types and their measurement methods

Characterization type	Application method
Powder Density and Flow Rate Measurements	Tap Density Apparent Density Flow Rate
Particle Size, Morphology and Distribution Analysis	Optical Microscopy (OM) Laser Diffraction X-Ray Computed Tomography
Chemical Analysis	Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) Auger Electron Spectroscopy Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry Inert Gas Fusion
Microstructural Characterization	Scanning Electron Microscopy (SEM) Transmission Electron Microscopy (TEM) X-Ray Diffraction

A variety of techniques are used for the production of powders including; Plasma Atomization, Plasma Spheroidization, Vacuum Induction-melting, Inert Gas Atomization (VIGA) and Electrode Induction-melting Inert Gas Atomization (EIGA) methods [32]. The elected powder production technique plays an important role on the final material characteristics. Depending on the atomization methods, the powder shape (irregular, spherical or satellites etc.), size and porosity amount in the built material indicate some variations. Spherical particles and smaller particle sizes improve the viscosity and apparent density [26]. Fine and midfraction powders provide a large surface area which leads to absorb high energy and higher sintering rate. The ideal powder for additive manufacturing is completely spherical with Gaussian type particle size distribution and low oxygen content due to its good flowing characteristics, high packing density and new appearance after recycling in the process. Among these methods, the gas atomization is generally preferred for additive manufacturing due to the highly spherical shape of the powder. In contrast, the water atomization is very economical to produce economical irregular shaped powder. In this process, the water imparts more energy into the molten metal stream leading to the rough shape of the powder particles with rapid cooling. A spherical powder with a Gaussian particle size distribution can be optimized for additive manufacturing [41].

For the layer-based manufacturing methods, the management of the melt pool geometry, which is highly dynamic becomes necessary to achieve a successful result. The powder packing density is also an effective parameter for the melt pool geometry. Low packing density leads to the formation of a high initial porosity in the powder bed and shrinkage takes place largely after the melting stage of the material. When the powder packing density is reduced, the thermal conductivity between the layers tends to decrease due to the high amount of porosity. As a result of the reduction in the packing density the liquid pool deepens and spreads to a wider area. Thus, the high packing density is inevitable to have the desired melt pool geometry. Regarding

the determination and the development of EBM parameters, the power density in the direction of the beam and the powder density distribution should be evaluated as significant parameters. Assuming that the acceleration is constant, in order to define powder density distribution, the electron beam density measurement becomes necessary [42, 43]. Additionally, the electron beam movement shows a Gaussian distribution (normal distribution). The schematic illustration of the Gaussian-shaped electron beam in the EBM machines can be seen in Figure 4 [44].

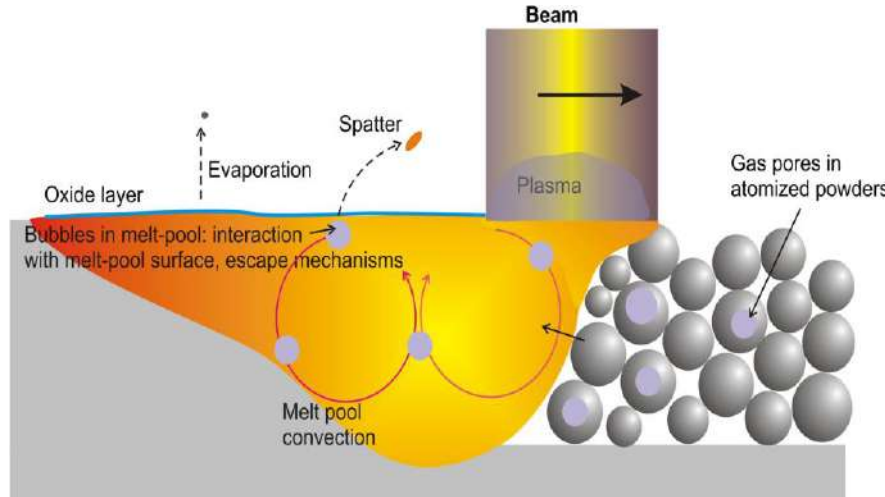


Figure 4. Schematic illustration of beam-powder interaction during powder bed melting stage [44]

The layer thickness is the other main process parameter in AM. The deposition rate of the material is associated with the z-axis layer height or layer thickness. Layer thickness is identified by the powder raking amount. During the 'raking' stage, powder is distributed to the built surface with a metal rake bar. Powder layers should be quite thin in order to obtain bulk structures with a tighter bonding. Thus during the scanning, the required energy can be easily transferred to the surface by an electron or laser beam to melt the previous layer. Eventually, the value of the layer thickness should be as low as possible in addition to powders with smaller particle size and bimodal size distribution in order to improve the surface quality of the built parts as seen in Figure 5 [45].

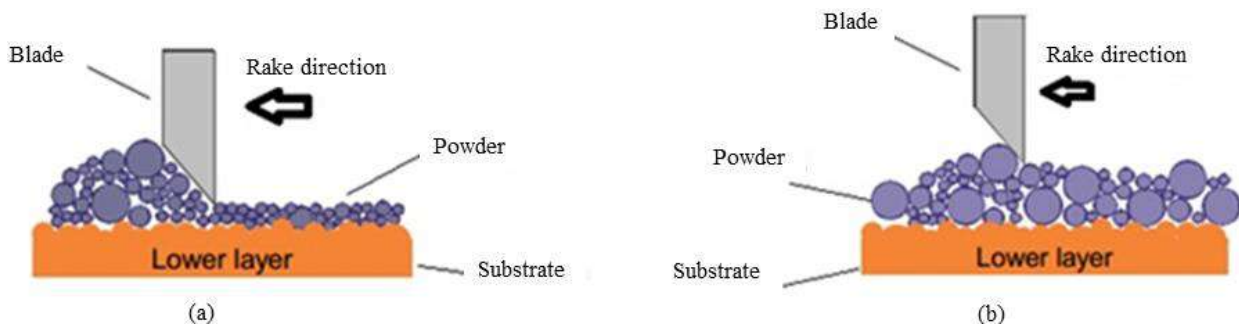


Figure 5. a) 30 µm layer thickness, high density of powder particles; b) 70 µm layer thickness, low density of powder particles [45]

5. Conclusion

The layers are provided in powders and melted by energy sources using the laser or electron beams sources for the AM of the metals. In comparison with the laser beam melting, the electron beam melting have a greater energy density, faster scan speed, and higher temperatures of the powder bed. Moreover, the higher surface quality on finished parts can be obtained in addition to the eliminated secondary processing and reduced manufacturing costs. Final manufactured material properties are highly affected by the physical properties of the powder particles in EBM and DSLM as well as other AM techniques. In general, powder structures used in AM are supposed to be nominally spherical. They should have a homogenous particle size distribution for the purpose of obtaining fully dense final manufactured parts with desired physical and mechanical properties. In the future work, the experimental results which will be obtained from electron beam melting will be released.

5. References

- [1] Gibson I., Rosen D., Stucker B., Additive manufacturing technologies, 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, ISBN 978-1-4939-2113-3, Springer, 2015.
- [2] ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. <http://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>.
- [3] [Lexcelent, C.](#), Shape Memory Alloys Handbook, London, 2013.
- [4] Elahinia M., Hashemi M., Tabesh M., Bhaduri S. B., Manufacturing and processing of NiTi implants: A review, Progress in Materials Science, 2012, 57, 911–946.
- [5] Kauffman G. B., The story of nitinol: The serendipitous discovery of the memory metal and its applications, the chemical educator, 1996, 2, 3-21.
- [6] Mohd Jani J., Leary M., Subic A., Gibson M. A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials and Design, 2014, 56, 1078–1113.
- [7] Engeberg E. D., Dilibal S., Vatani M., Jae-Won Choi J. W., Lavery J., Anthropomorphic finger antagonistically actuated by SMA plates, Bioinspiration&Biomimetics, 2015, 10, 056002.
- [8] Moghaddam N.S., Toward patient specific long lasting metallic implants for mandibular segmental defects, University of Toledo, 2015.
- [9] Haberland C., Elahinia M., Walker J., Meier H., Visions, concepts and strategies for smart Nitinol actuators and complex Nitinol structures produced by additive manufacturing, ASME 2013 conference on smart materials, adaptive structures and intelligent systems, American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [10] Haberland C., Elahinia M., Walker J., Meier H., Frenzel J., On the development of high quality NiTi shape memory and pseudoelastic parts by additive manufacturing, Smart Mater Struct, 2014;23(10):104002.
- [11] Guo Y., Klink A., Fu C., Snyder J., Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, 62, 83–86.
- [12] Moghaddam N. S., Skoracki R., Miller M., Elahinia M., Dean D., Three dimensional printing of stiffness-tuned, nitinol skeletal fixation hardware with an example of mandibular segmental defect repair, Proc CIRP, 2016, 49, 45–50.
- [13] Andani M. T., Moghaddam N.S., Haberland C., Dean D., Miller M., Elahinia M., Metals for bone implants. Part 1. Powder metallurgy and implant rendering, ActaBiomater 2014, 10, 4058–4070.
- [14] Bormann T., Müller B., Schinhammer M., Kessler A., Thalmann P., Wild M., Microstructure of selective laser melted nickel–titanium, Materials Characterization, 2014, 94, 189-202.
- [15] Shishkovsky I. V., Volova L. T., Kuznetsov M. V., Morozov Y. G., Parkin I. P., Porous biocompatible implants and tissue scaffolds synthesized by selective laser sintering from Ti and NiTi, J Mater Chem, 2008, 18, 1309–1317.
- [16] Rahmanian R., Moghaddam N. S., Haberland C., Dean D., Miller M., Elahinia M., Load bearing and stiffness tailored niti implants produced by additive manufacturing: a simulation study, SPIE smart structures and materials + nondestructive evaluation and health monitoring. International Society for Optics and Photonics, 2014, p. 905814.
- [17] Haberland C., Elahinia M., Walker J., Frenzel J., Additive manufacturing of complex NiTi shape memory devices and pseudoelastic components, ASME conference on smart materials, adaptive structures and intelligent systems, Snowbird, 2013.
- [18] Schwerdtfeger J., Singer R. F., Körner C., In situ flaw detection by IR-imaging during electron beam

melting, Rapid Prototyping Journal, 2012, 18, 259-263.

- [19] Fusion Implants, Research and Development, <http://www.fusionimplants.com/r-d/>, (Accessed in March 2017)
- [20] Koike M. , Greer P., Owen K., Lilly G., Murr L.E., Gaytan S.M., Martinez E., Okabe T., Evaluation of titanium alloys fabricated using rapid prototyping technologies-Electron beam melting and laser beam melting, Materials, 2011, 4, 1776-1792, doi:10.3390/ma4101776.
- [21] Murr L.E., Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting, Additive Manufacturing, 2015, 5, 40–53.
- [22] Haberland C, Meier H, Frenzel J. On the properties of Ni-rich NiTi shape memory parts produced by selective laser melting, ASME 2012 conference on smart materials, adaptive structures and intelligent systems, American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [23] Loeber L., Biamino S., Ackelid U., Sabbadini S., Epicoco P., Fino P., Eckert J., Comparison of selective laser and electron beam melted titanium aluminides, Solid Freeform Fabrication Symposium, Texas, U.S.A, 2011.
- [24] EOS Manufacturing Solutions, Laser sintering system EOSINT M 280 for the production of tooling inserts, prototype parts and end products directly in metal brochure, 2017.
- [25] Arcam AB: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/justaddbrochure-web.pdf>, (Accessed in March 2017).
- [26] Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S., The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, International Materials Reviews, DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649, 2016.
- [27] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., Additive Manufacturing of Metals, Acta Materialia , 2016, 117, 371-392.
- [28] Walker J. M., Additive Manufacturing towards the Realization of Porous and Stiffness-tailored NiTi Implants, Thesis of Degree of Doctor of Philosophy, The University of Toledo, 2014.
- [29] Sutton A. T., Kriewall C. S., Leu C. M., Newkirk J. W., Powders for additive manufacturing processes: characterization techniques and effects on part properties, Solid Freeform Fabrication Symposium, Texas, U.S.A, 2016.
- [30] Gong H., Rafi K., Gu H., Starr T., Stucker B., Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes, Additive Manufacturing, 2014, 1–4, 87–98.
- [31] Murr L. E, Quinones S. A., Gaytan S. M., Lopez M. I., Rodela A., Martinez E. Y., Hernandez D. H., Martinez E., Medina F., Wicker R. B., Microstructure and mechanical behaviour of Ti–6Al–4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications, Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials, 2009, 2, 20-32.
- [32] Elahinia M. H., Moghaddam N. S., Andani M. T., Amerinatanzi A., Bimber B. A., Hamilton R. F., Fabrication of NiTi through additive manufacturing: A review, Progress in Materials Science, 2016, 83, 630–663.
- [33] Halani P. R., Kaya I., YungC.Shin Y. C., Karaca H. E., Phase transformation characteristics and mechanical characterization of nitinol synthesized by laser direct deposition, Materials Science & Engineering A, 2013, 559, 836–843.
- [34] Meier H., Haberland C., Frenzel J. Structural and functional properties of NiTi shape memory alloys produced by selective laser melting, Innovative developments in design and manufacturing: advanced research in virtual and rapid prototyping. p. 291–6.
- [35] Hamilton R. F., Palmer T. A., Bimber B. A., Spatial characterization of the thermal-induced phase transformation throughout as-deposited additive manufactured NiTi bulk builds, Scripta Materialia,

2015, 101, 56–59.

- [36] Xu X., Lin X., Yang M., Chen J., Huang W., Microstructure evolution in laser solid forming of Ti–50 wt% Ni alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 480, 782–787
- [37] Shishkovsky I, Yadroitsev I, Smurov I. Direct selective laser melting of nitinol powder. *PhysProc*, 2012, 39, 447–454.
- [38] Horn, T.J. and O.L.A. Harrysson, Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications, *Science Progress*, 2012. 95(3): p. 255-282.
- [39] Wooten J., Dennies P. D., *Electron Beam Melting Manufacturing for Production Hardware*, SAE International, 2008.
- [40] Slotwinski J. A., Garboczi E. J., Stutzman P. E., Ferraris C. F., Watson S. S., Peltz M. A., Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2014, 119, 460-493.
- [41] Wong K. V., Hernandez A., A Review of additive manufacturing, *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*, 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [42] Attar E., *Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes*, Thesis of Degree of Doctor of Philosophy, Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [43] Scharowsky T., Bauereiß A., Singer R.F., Körner C., Observation and numerical simulation of melt pool dynamic and beam powder interaction during selective electron beam melting, *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Texas, U.S.A, 2012.
- [44] Hebert R. J., Viewpoint: metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing, *J Mater Sci*, 2016, 51, 1165–1175
- [45] K. Abd-Elghany, D.L. Bourell, Property evaluation of 304L stainless steel fabricated by selective laser melting, *Rapid Prototyp. J.* 2012, 18, 420–428.

TERSİNE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMINA DAYALI YENİ BİR İMALAT İÇİN TASARIM İŞLEM MODELİ

Tamer TÜRKÜCÜ^a, H. Rıza BÖRKLÜ^b

a, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara/TÜRKİYE, tamerturkucu@gazi.edu.tr

b, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE, rborklu@gazi.edu.tr

Özet

Mühendislik; ileriye (normal) ve tersine mühendislik olarak ikiye ayrılır. Bunlardan ileriye mühendislik, normalde ve genelde mühendislerin yaptığı iş ve çalışmaları yansıtır. Burada süreç, problem tanımından tasarım ve imalata doğru ilerler ve gelişir. Tersine mühendislikte ise süreç tersten işler. Yani burada işlem, mevcut bir ürünü inceleme/analiz sonrası bunun yeniden tasarımı, geliştirilmesi ve imali şeklinde sürer. Bu tebliğ, tersine mühendislik konusunda yapılan bir çalışmayı içermektedir. Çalışma kapsamında; mevcut ve güncel tersine mühendislik yaklaşımları hakkında ayrıntılı bir kaynak araştırması yapılmıştır. Ayrıca, tersine mühendislik yaklaşımı uygulayacak tasarımcılara kaliteli destek sağlayacak yeni bir imalat için tasarım işlem modeli de önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tersine mühendislik, Bilgisayar destekli tasarım, İmalat ve montaj için tasarım

A NEW DESIGN PROCEDURE MODEL FOR MANUFACTURING BASED ON REVERSE ENGINEERING

Abstract

Engineering can be classified into two groups which are forward (normal) and reverse engineering. Forward engineering involves general procedures normally conducted by most engineers. The procedures here progress from the definition of problems to design and manufacturing. On the other hand, the procedures in reverse engineering are conducted in reverse order, such that the design, development and manufacturing of a product are determined after its examination and analysing. Within the context of this work, a comprehensive literature review, that includes new and original research in the field, is conducted. Moreover, a new design method which can provide qualitative support for the designers to apply reverse engineering approach for their design works has been suggested.

Keywords: Reverse engineering, Computer-aided design, Design for manufacturing and assembly

1. Giriş

Mühendislik; ürün, sistem ve yapıların tasarım, imalat, inşaa ve bakımını içeren bir uzmanlık ve meslek alanıdır. Yüksek düzeyde mühendislik: (1) İleriye (normal) mühendislik ve (2) Tersine (geriye) mühendislik olarak iki çeşide ayrılabilir. Bunlardan ileriye mühendislik, bir sistemin yüksek düzeyde soyutlama ve mantıksal tasarımından fiziki gerçekleştirilmesine dek gelişen geleneksel bir işlemdir. Yani bu yaklaşım, normalde her mühendisin kullandığı bir ihtiyaç veya problemten çözüme giden genel yol veya yöntemi içerir. Ancak bazı hallerde bu yaklaşım zaman ve maliyet artışı gibi olumsuz sonuçlara neden olabilir. Eğer mevcut bir ürün veya çözüme dayalı çalışma söz konusu ise burada tersine mühendislik avantaj sağlayabilir. Tersine mühendislik (TM), mevcut ürün veya modele ait tasarım ve mühendislik bilgisini analiz (geometri, malzeme, işlev, çözüm prensibi vb. belirleme) sonrası bunun yeniden tasarımı, geliştirilmesi veya imal edilmesini içerir. TM ihtiyacı ürün geliştirme ve tasarım sürecinde başlayarak ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca sürer. TM geniş bir alana hitap eder ve tasarım geliştirme aracı olarak da kullanılabilir. Tasarımcı TM süreci içinde aynı ürünü kopyalar veya daha üstün özelliklerde tekrar tasarlayabilir. Bu amaçla bilgi yönetim sistemleri kullanılarak mühendislik bilgisinden etkin faydalanılması gerekir.

Bu çalışmada şu konular yer almaktadır: Önce TM teknolojisinin kullanım alan ve ilgili örnekleri verilecektir. TM yaklaşımı ve bu amaçlı ürün tasarım işlemi karşılaştırmalı olarak açıklanacaktır. TM yaklaşımı ile normal mühendislik tasarım yaklaşımı arasındaki ilişki ve İmalat ve Montaj için Tasarım (İMT)'in önemi incelenecektir. Daha sonra işlem planlama ve Bilgisayar Destekli İşlem Planlama (BDİP) sistem prensip ve özellikleri ele alınacak ve bazı örnekler verilecektir. TM yaklaşımını geliştirmek için Bilgisayar Destekli Mühendislik (BDM), İMT ve BDİP araçlarını birlikte kullanma yöntemleri kurgulanmış ve bir ön model önerilmiştir. Böylece imalata uygun ürün tasarlama ve geliştirmede tasarımcıya kaliteli destek sağlayacak bilgisayar destekli bir sistemin kavramsal yapısı ve kaba çalışma mantığı formüle edilmiştir.

2. Tersine mühendislik

TM yaklaşımını uygulama gereksinimi; parçaya ait teknik resim veya modelin yokluğu, ilk üreticinin olmaması veya üretimi durdurması gibi hallerde ortaya çıkabilir [1]. Çoğaltılmak / değiştirilmek istenen parçalara ait Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) modelleri olmayabilir veya üretimi sorunlu olabilir. Bu durum genelde uzun yaşam döngülü parçalarda görülür. Bir ürünün üretimi durmuş, piyasadaki yedek stokları tükenmiş veya istenilen zaman ve maliyette üretimi mümkün olmayabilir. Bazı eski parça tasarımlarında BDT kullanılmamış olabilir veya ürün dokümanları eksik olabilir ya da hiç olmayabilir. Orijinal dokümanlar mevcut olsa bile son değişiklikleri içermeyebilir veya modern üretim yöntemlerini uygulamak için yetersiz kalabilir [2]. Ayrıca:

- Parçanın teknik resim olur ama zamanla parça değiştirilir ve teknik resim ile parça uyumu olmaz.
- Kalite kontrol amacıyla üretilen parça ve ilgili BDT modelin karşılaştırılması gerekebilir.
- TM; ürünün tekrar / üstün veya yeni / özgün tasarımını yapmak için de kullanılabilir.

TM genelde parça/nesnelerin 3B bilgisayar tasarım modellerini oluşturmayı içerir. Ama sadece geometri durumunda bu işlem bir TM basamağı olur. Çünkü TM, parçalar arası ilişkiler, çalışma koşullarına ait bilgiler ve ürün belgelerini içeren bir mühendislik sürecidir [1]. Önemli TM yaklaşım adımları; geometrik model özelliklerini belirleme, ilgili yüzeyleri tasvir etme, modeli parçalara ayırma, basit ve serbest geometriye sahip yüzeyler oluşturma ve hassas BDT modelleri elde etmektir [3]. Daha basit bir ifadeyle TM; ürünü tasarlama, işlevsel özelliklerini belirleme, ürünün detaylı ve işlevsel modelini yeniden oluşturma iş ve işlemlerini içerir [1].

TM; makine/yazılım mühendisliği, animasyon/eğlence sektörü, mikroçipler, kimyasal ürünler, elektronik, eczacılık, tıp, diş hekimliği, biyomedikal, giyim gibi alanlarda oldukça yaygın kullanılmaktadır. Mevcut parçaları daha hızlı sayısal hale getirmek için geliştirilen yöntemler TM'ye olan ilgiyi artırmıştır. TM uygulamada mevcut üründen elle ölçü alma gibi basit teknikler bile yeterli iken, parça geometrilerini sayısal hale getirme ve 3B modellemede kullanılan temassız yöntemler, bu çalışmada harcanan süreyi kısaltmış ve karmaşık parçaları hızlı bir şekilde 3B modellemeyi mümkün kılmıştır.

Herráez vd. görüntü tanımda fotoğraf ve mesafelerin kullanıldığı fotogrametri tekniğinin yerini, kolay kullanımı ve yoğun (sık) veri elde etme ile birlikte, artık tarayıcı lazerlerin aldığını belirtmektedirler. Çok fazla veri olması halinde ise bir veri filtre ve sadeleştirme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür olumsuz durumlar videogrametri ile giderilmiş, kısa aralıklarla birçok görüntü alınmış ve bu yöntemin malzeme cinsinden etkilendiği vurgulanmıştır. Videogrametri sonuçlarının yüksek çözünürlüklü 3B lazer tarayıcı benzeri olduğu ve mimari tarayıcıdan daha hassas işlem yaptığı da belirtilmiştir [4]. Kaufman vd., fotoğraflardan nasıl 3B nesne modelleri oluşturulacağı konusunu incelemişlerdir [5]. Benzer 3B model oluşturma işlemi, Smoothie-3B gibi yazılımlarla [6] oldukça kolaylaşmış ve bir fotoğraftan bile basılabilir 3B modeller oluşturma mümkün olabilmektedir. Fayolle vd. bir cismin yüzeyleri üstündeki birçok noktayı yapısal bir ağaçla temsil eden bir yöntem geliştirmişlerdir. Öncelikle noktaları alt kategorilerde toplamışlar ve temel öğeleri en iyi tanımlayan noktaları bu gruplara yerleştirmişlerdir. Daha sonra ayırıcı temel öğeleri tanımlamış ve uygun temel öğe listesine eklemişlerdir. Son olarak genetik algoritma ile modelin orijinal noktalarla uyumunu kontrol edilip uygun temel öğeleri yapraklara ve geometrik operatörleri ise alt grup başlıklarına yerleştirmişlerdir [7]. Jeon vd., benzer üretime sahip firmaların 3B tasarım modelleri ile tasarım dokümanları arasında ilişki kurarak kavramsal tasarım sürecinde geliştirilen tasarım dokümanlarına ait BDT modelleri tekrar çağırma kullanmışlardır. Böylece yeni ürün tasarım sürecini kısaltacak bir yaklaşım geliştirmişlerdir [8]. Hazır giyim sektöründeki manken tasarımlarında da TM etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla bir insan gövdesi önce koordinat ölçme cihazı ile taranıp ilişkili nokta bulutları oluşturulur, arkasından bu nokta bulutları bir program vasıtasıyla insan vücuduna (manken gövdesine) ait unsurlara dönüştürülür ve sonra da model oluşturulur. Bu

araştırmada geliştirilen unsur tanıma algoritması ile tatminkâr sonuçlar elde edildiği belirtilmektedir [9]. Tariq vd., diş hekimliği implant uygulamalarında TM kullanımını ele almışlardır. Yine bu kapsamlı kullanılan optik tarayıcılar, tarayıcı protokolleri, 3B tasarım yazılımları ile yapılan diş hekimliği uygulamaları, eklemeli/çıkarmalı imalatla üretilen parça ve kaplama tekniklerini incelemişlerdir [10]. Valerga vd., kesme takımı geliştirmede TM yaklaşımı kullanmışlardır. 3B tarama sonucu görsel model hızlı bir şekilde oluşturulmakta ve ardından 3B baskı ile de istenilen ölçüde parçalar elde edilebilmektedir. Böylece de işlevsel testler gerçekleştirilebilir [11]. Lin vd., karmaşık BDT modeller üretmek için ikiden çok parça içeren kalıp tasarlamaya çalışmışlardır. BDT modeli ile birlikte geliştirdikleri algoritma ile kalıp-parça yüzeyleri ve kalıp ayırma eğrilerini (çizgilerini veya mala yüzeyini) otomatik olarak belirlemişlerdir [12]. Chintala vd., gaz türbin kanat tasarımını iyileştirme amaçlı TM ve Sonlu Elemanlar Analizleri kullanmışlardır [13]. Biyomedikal uygulamalarda da TM oldukça fazla kullanılmaktadır. Örneğin, Majstorovic vd., anatomik özelliklere dayalı yeni bir yöntem kullanarak insan vücudundaki kemiklerin TM ile modellenmesi ve üretilmesi konusunda çalışmışlardır [14].

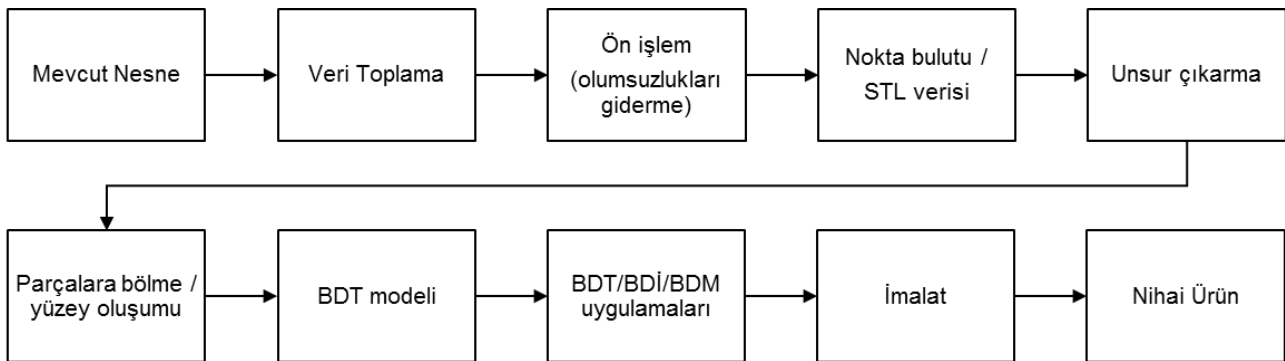
2.1. Tersine mühendislik yöntemleri

TM süreci öncesinde bir başlangıç aşaması gerektirir. Başlangıç aşamasında TM uygulanması istenilen ürün hakkında detaylı bilgiye ve belgelere ulaşılmalıdır.

TM başlangıç aşaması şu şekilde olur [15]:

1. Normal çizim, işlev/takım/aparat/işlem ve malzeme ihtiyacı gibi tüm mevcut bilgi ve belgeler toplanır.
2. Gerekli tüm yeni veri ve ayrıntıları tanımlanır.
3. Maliyet / fayda analizi yapılır.
4. Bu amaçla başmühendisle diyalog kurulur.
5. TM yönetim planı hazırlanır.
6. Kabul ölçütleri belirlenir.

Başlangıç aşamasının ardından TM süreci Şekil 1’de gösterildiği gibi ilerler. Önce, mevcut nesne üzerinden geometrik veriler toplanır, bu veriler ön işlemlerden geçirilerek olumsuzluklar giderilir. Ardından elde edilen nokta bulutuna; örnek oluşturma, keskin köşeleri giderme, topoloji/delik onarma vb. ön işlemler uygulanarak STL verisi elde edilir. STL verisi kullanılarak otomatik, unsur çıkarma ya da eğri tabanlı yöntemlerle geometrik unsurlar belirlenir. Ürün parçaları ve eksik yüzeyler oluşturularak BDT modeli elde edilir ve yeni unsurlar oluşturulup model tamamlanır. BDT modeli kullanılarak, BDI ve BDM çalışmaları yapılarak ürün imalata hazırlanır ve imal edilir.



Şekil 17. Tersine mühendislik sürecine ait genel akış şeması [3]

Ye vd. [16], Tersine Inovativ Tasarım (TIT) adlı yeni bir ürün tasarım yöntemi geliştirmiştir. Bu amaçla, SolidWorks BDT sistemi altında çalışan ScanTo3D isimli bir ek program (modül) hazırlamışlardır. TIT’yi 3B sayısal hale getirme, 3B BDT, Bilgisayar Destekli Endüstriyel Tasarım (BDET), TM, Bilgisayar Destekli Mühendislik analizi, hızlı prototip oluşturma işlemlerini içeren bütünsel bir sayısal tasarım yöntemi olarak tanımla-

mışlardır. Hemen tüm 3B BDT sistemleri unsur tabanlı tasarım yaklaşımı kullanır. Bu sistem unsur tabanlı ve parametrik bir yapıdadır, geçmişi kayıt eder, tasarım değişikliklerini ürün ağacı olarak saklar. 3B BDT sistemi ile karşılaştırılırsa BDET sistemi ile yüzey modelleme yapılabilir, şekillendirme esnekliğine sahiptir, malzeme tanımı ve seçimi yapılabilir, daha hassas/kaliteli grafik elde edilebilir.

TM ve TIT modelleme stratejilerini şöyle açıklamışlardır:

TM 3 farklı modelleme stratejisi içerir. Bunlar:

1. Serbest şekilli yüzeylerin otomatik oluşturulması
2. Unsur ve parametrik tabanlı katı model oluşturma
3. Eğri tabanlı yüzey modelleme

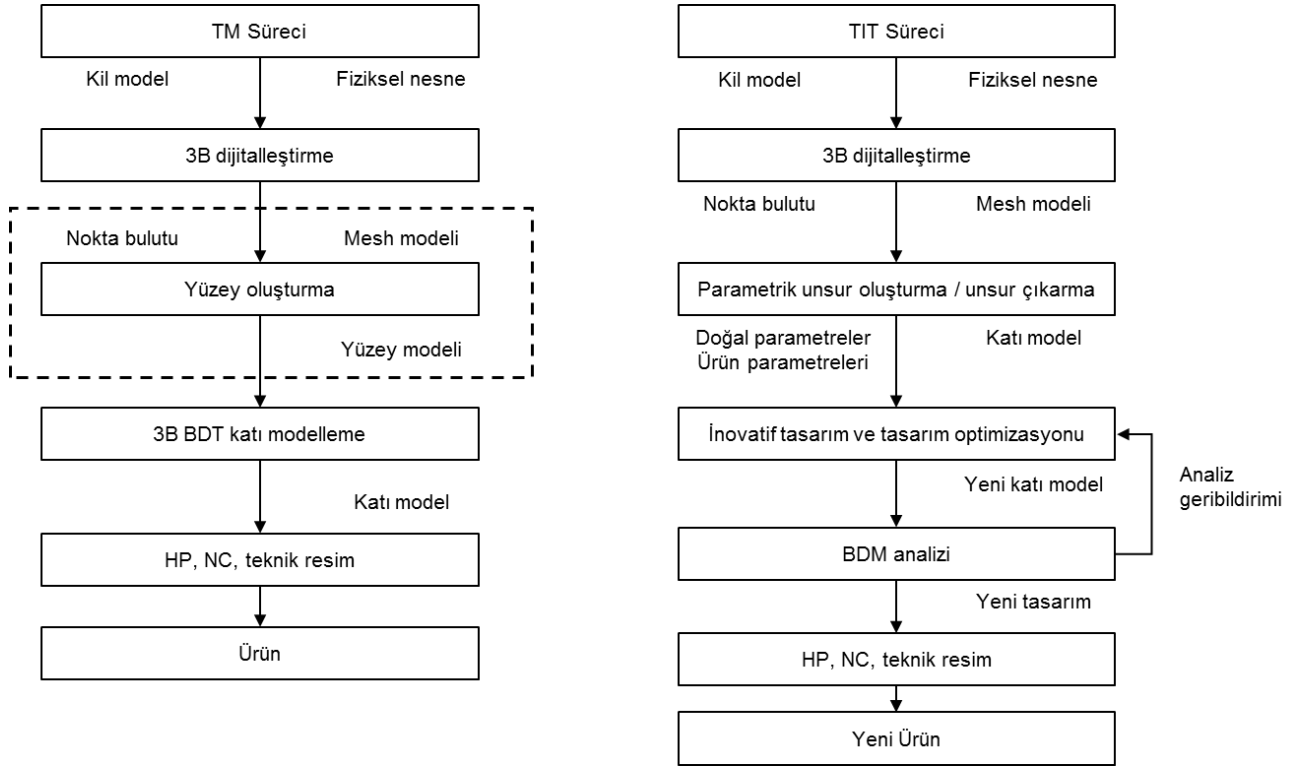
TIT, ürünün geometrik şekline göre TM'de farklı işlemler yürüterek modelleme işlemini daha etkin yapmaya çalışır. Burada TIT, 3 farklı modelleme stratejisi içerir:

1. Organik şekiller için C^1 veya C^2 katı modelleri ızgara modelden otomatik şekilde oluşturulur. Katı model, model referansları, veri aktarımı, hassas grafik sunumlar ve hızlı prototip oluşturma gibi uygulama senaryolarında kullanılabilir.
2. Analitik şekillerde ızgara model parçalara bölünerek alt ızgara adlı işlevsel kısımlara ayrılır. Unsur tanımlama, 3B BDT paketinde biçim unsurları oluşturmada kullanılır ve yüksek kalitede şekil özellikleri (silindir, küre, koni, sünen/dönel yüzey) ve doğal şekil parametreleri (yarıçap, uzunluk, yükseklik ve açı) elde edilir. Analitik olmayan alt ızgaralar B-spline yüzeyler olarak oluşturulur. Bu yüzeyler, uzatma, kırpma veya dikme ile 3B BDT yazılımı içinde katıya dönüştürülür.
3. Daha hassas bir model gerekirse, eğri tabanlı modelleme stratejisi kullanılır. ızgara modeldeki 2/3B taslaklar oluşturulduktan sonra bölüm / sınır eğrileri ve unsur çizgileri çıkarılır. Daha sonra bu eğriler kullanılarak arakesit geçiş yüzeyleri 3B BDT yazılımında doğrudan oluşturulur.

Ayrıca, TIT temel adımları detaylı olarak şu şekilde açıklanmıştır:

1. Fiziksel cisim veya kil modelden 3B veri aktarımı, nokta bulutu işleme, ızgara oluşturma ve işleme tabi tutma. Böylece net bir ızgara model elde edilir.
2. Kaliteli doğal şekil veya ürün tanım parametreleri çıkarılarak, serbest geometri cisimlerden bile, mevcut ızgara kullanılarak 3B katı model oluşturulur. Sonuçta, orijinal fiziksel cisim veya kil modele ait tasarım amaç ve işlevini içeren unsur tabanlı parametrik model oluşur.
3. Kaliteli şekiller ve ürün tanım parametreleri / ızgara / yüzeyler şekillendirilip düzeltilerek yeni bir ürün modeli oluşturulur. Şekillendirmeler bölgesel veya daha geniş çaplı olabilir. Bazı yüzeylerde şekillendirme işlemi çok, bir kısmında ise az olabilir. 3B BDT yazılımı içindeki yeni ürün modeline ek unsurlar eklenebilir. Sonuçta yeni bir tasarıma ait yeni bir sayısal ürün modeli oluşur.
4. BDM analizi uygulanır ve arkasından (sonuca göre) daha önce elde edilmiş modelde bazı tasarım değişiklikleri yapılabilir. Bu bir iterasyon sürecidir ve her adımda çok küçük değişiklikler yapılabilir. Böylece de yeni tasarıma ait hızlı prototip amaçlı kullanılacak en uygun sayısal model elde edilir.

Geleneksel TM ve TIT süreçleri Şekil 2'de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Her iki yöntem de fiziksel nesnenin ya da modelin sayısal hale getirilmesi işlemlerinde benzer yöntemler kullanabilir. Gerçek fark, parçaya ait sayısal verilerden model oluşturmada itibaren ortaya çıkar. TIT yukarıda bahsedildiği gibi farklı modelleme stratejileri kullanır ve parçanın geometrisi / karmaşıklığına göre farklı yöntemler uygular. Parça geometrisine göre farklı modelleme stratejilerine ihtiyaç duyulması, organik şekilli parçalarda iyi sonuç veren yöntemlerin düzgün geometrik parçalarda aynı hassasiyette sonuçlar vermemesine bağlıdır. TIT modelde, katı model oluşturma sonrası tasarımı iyileştirme ve bilgisayar destekli mühendislik analiz basamakları izlenerek, analiz sonuçlarına göre katı model yeniden değişime uğrar. Parametrelere dönüştürülmüş model, her bir parametrenin kontrolünü kolaylaştırır ve bu değişimi etkili yönetmeye yardımcı olur. Bu analiz ve katı model geliştirme en iyi çözüm bulana kadar tekrarlanan bir döngüdür. Bu döngü tamamlandığında yeni tasarım ortaya çıkar ve artık yeni ürünün imalatına başlanabilir.

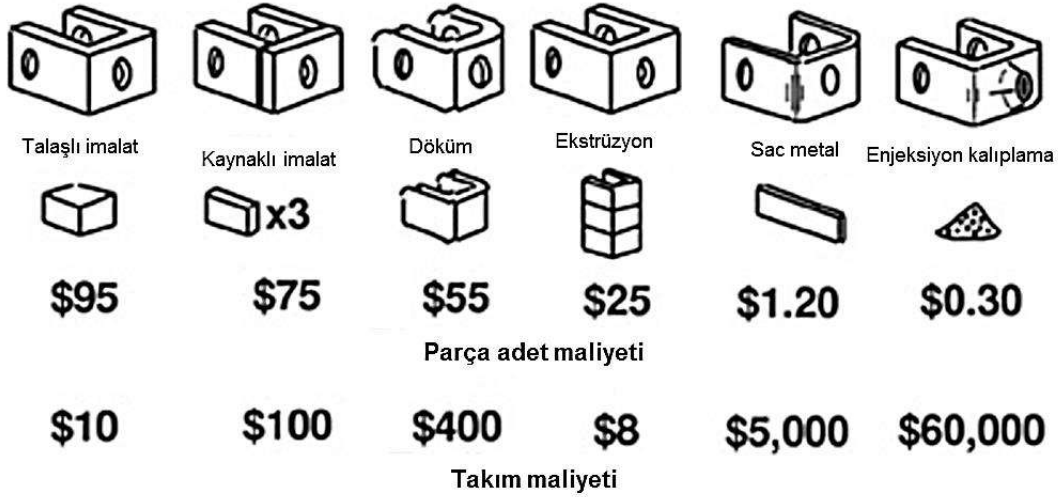


Şekil 18. TM ve TIT süreçlerinin karşılaştırılması [16]

Araştırmacılar, bu yaklaşımı Batni vd. tarafından tanıtilen TM işlemine benzetmektedir. Ye vd., TM'deki Tersine Geometrik Modelleme işlem etkisini artırma yanında, Germain'in açıkladığı TM başlangıç aşama bağımlılığını azaltarak TM işleminde tasarımcıya destek sunar. Bu süreçte tasarımcı, ürün işlevlerini belirler, malzemeyi seçer, maliyet/fayda analizi yapar, imalat yöntemi/takım ve aparat belirler. Ayrıca, analizlere ait ürün çalışma koşul ve işlevlerini belirler. TIT'ın yeteneklerini arttırmak, imalata yönelik tasarım kriterlerini TM işlemine uyarlama ile sağlanabilir. TM, mühendislik tasarımının bir bölümünü oluşturur ve bu bağlamda mühendislik işlemini etkileyen faktörler TM işlemini de etkiler. Mühendislik tasarımı esnasında dikkate alınacak bazı kriterleri Shigley şu şekilde sıralamaktadır [17]:

1 İşlev	8 Üretilbilir olma	15 Stil	22 Satılabilir olma
2 Dayanım/gerilim	9 Yararlılık	16 Şekil	23 Bakım
3 Deformasyon/sehim/katılık	10 Maliyet	17 Boyut	24 Hacim
4 Aşınma	11 Sürtünme	18 Kontrol	25 Sorumluluk
5 Korozyon	12 Ağırlık	19 Termal özellikler	26 Sürdürülebilirlik
6 Emniyet	13 Ömür	20 Yüzey	
7 Güvenilirlik	14 Gürültü	21 Yağlama	

Malzeme özellikleri, geometrik özellikler, çalışma koşulları ile ilgili özellikler imalat yöntemini kısıtlayan ve imalat yönteminden etkilenen kriterlerdir. Messler [18]'in belirttiği üzere, mühendislik tasarım esaslarına göre yeni ürün tasarımı/geliştirme sürecinde dört temel kriter vardır: işlev, üretilbilir olma, estetik ve maliyet. Eğer bir ürün yerine getirmesi gereken işlevi/görevi sağlayamıyorsa, bunun kolay üretimi, hoş görünmesi, imalat / işletme maliyetinin az olması önemli değildir. Bu nedenle tasarım açısından ürünün işlevi çok önemlidir. Ayrıca Şekil 3'te imalata uygun tasarıma ait bir örnek verilmiştir. Bu örnekte pnömomatik piston ucuna takılan basit bir çatal parçanın farklı imalat yöntemlerine göre parça tasarımı ve takım maliyetleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Burada tasarım sadece işlev ve amacı karşılamayıp aynı zamanda imalatı da kolaylaştırması gerekmektedir.



Şekil 19. Pnömatik piston çatal parçasına ait imalata uygun tasarım seçenekleri ve ilişkili maliyetleri [18].

Boothroyd vd. [19] imalat ve montaja uygun tasarım işlemini sade bir şekilde açıklamaktadır. İmalat bir ürün veya montaja ait bir parçanın imalatı; montaj ise parçaların uygun bir şekilde birleştirilip komple bir ürün oluşturması anlamındadır. Yani, montaj bir imalat yöntemi değildir. İmalat yöntemi; talaş kaldırma, kalıplama gibi bir dizi işlemi içerir. İmalata uygun tasarım, ürünü meydana getiren parçaların imalatını kolaylaştırmak demektir. Montaja uygun tasarım, ürünün kolay monte edecek şekilde tasarlanması demektir. Böylece imalat ve montaja uygun tasarım (İMİT), imalata uygun tasarım (İİT) ile montaja uygun tasarım (MİT) yöntemlerinin birleşimidir. TM'yi gerektiren bir husus da tasarım sırasında imalat ve montaj yöntemlerine dikkat etmek olduğu daha önce vurgulanmıştı. Bu durum parça imalatı esnasında imalat mühendisi tarafından alınan tedbir ve uygulanan çözümler ile parçada değişikliklere neden olabilir. İmalat mühendisince yapılan değişikliklerin tasarım bölümüne bildirilmemesi ile tasarım belgeleri güncelliğini kaybeder. Telea vd. [20], yaptıkları kaynak taramasında, mevcut araştırmaların çoğunun TM ile hızlı prototip oluşturmayı birleştirmek olduğunu ancak TM ile İMİT'i birleştiren araştırma olmadığını belirtmiştir. Kendileri bu konuda emsal teşkil edecek bir çalışma yapmışlardır.

3. İmalat işlem planları

İMİT'i TM sürecinde uygulayabilmek için imalat işlem planlarının tasarım sürecine dahil edilmesi gerekir. Kalpakjian vd. [21], işlem planlama ve imalat işlem seçim aşamalarını Şekil 4'deki gibi tanımlamıştır. Yazarlar, geleneksel işlem planlama sürecini ana hatlarıyla ele almış ve Bilgisayar Destekli İşlem Planlama (BDİP) sistemleri hakkında temel bilgiler vermiştir. İşlem planlama için takım, aparat, tezgah, işlem sırası ve montaj aşamaları belirlenmelidir. Bunun için işlem numarası, yapılacak işlem, tezgah numarası, standart işlem süreleri ve benzer bilgiler bir işlem pusulası üzerine maddeler halinde yazılır ve bu pusula parçanın imalat süresi boyunca parça ile birlikte fabrika içinde işlem görerek parçaya ait imalat sürecini takibi kolaylaştırır.

İMALAT İŞLEMİ SEÇİMİ	İŞLEM PLANLAMA
İş parçasının karakteristiği ve malzemesi	Takım seçimi
İş parçasının şekli, ölçüleri ve kalınlığı	Aparat seçimi
Boyut toleransları ve yüzey kalitesi	Tezgah seçimi
İşlevsel açıdan parçanın önemi	İşlem sırası
Üretim sayısı	Montaj sırası
İmalat için otomasyon gereği	
Tekil ve birleşik imalat işlem maliyetleri	

Şekil 20. İmalat işlem seçimi ve işlem planlama aşamaları [21].

İmalat işlem planlarının otomatik olarak oluşturulabilmesini sağlayan BDİP sistemleri, Bilgisayar Bütünleşik İmalat sistemlerinin veya daha geniş kapsamda Sayısal İmalat sistemlerinin merkezi araçlardan biridir. BDİP

sistemleri değişken sistem ve üretken sistem olarak ikiye ayrılır [21]. Değişken sistemlerde imalat işlem planlarının kaydedildiği bir veri tabanı bulunur. Bir parça ait işlem planı sistemde bulunmazsa bu parça üretimi için benzer işleme sahip başka bir parça planı değiştirilip yeni bir işlem planı oluşturulur. Eğer benzer bir işlem planı sistemde yoksa yeni bir plan oluşturulup kaydedilir. Üretken sistemde ise proje planlayıcısının kullandığı yöntem sistemce uygulanır ve parça için işlem planı otomatik oluşturulur. Bu sistem yeni parçalara ait işlem planları oluşturmada daha esnek ve tutarlı olur. Karar verme mekanizması ve güncel imalat bilgileri sisteme kayıtlı ise işlem planlama kalitesini artırır.

Geleneksel işlem planlama sürecindeki iş yükü ve işlem tasarım süresini kısaltmayı amaçlayan 150'den fazla BDİP sistemi geliştirilmiştir [22]. Geliştirilen bazı BDİP sistemlerinde karar verme mekanizması için uzman sistem veya yapay sinir ağları kullanılmıştır [23-28]. BDİP sistemini çalıştırma için imal edilecek parçaların BDT sisteminde unsur tabanlı modellenmiş olması gereklidir. Unsurlar imalat ile ilgili bilgilerin elde edilebileceği kaynaklardır [29]. Unsurların bu amaçla imalat unsurlarına çevrilmeleri gerekir. BDT sisteminde modellenen parçalar, BDT sisteminin yapısı gereği geometri-tabanlı, unsur-tabanlı ve ortam-tabanlı yapıya sahiptir. BDİP için gereken geometrik olmayan geometrik ve boyutsal toleranslar, yüzey kalitesi ve sertliği vb. teknik bilginin BDT sistemine dahil edilmesi zordur. Fakat BDİP için mühendislik bilgilerini içeren tasarım ve imalat unsurları gereklidir [30]. Xu vd. [27], ürün tasarım ve işlem planlama aşamalarını müşterek yapacak nesne tabanlı bir imalat modeli geliştirmişlerdir. Bu model ile imalat bilgisi tasarımcıya aktarılabilir ve böylece, ürün geliştirme süreci başında, tasarımcı imal edilebilirlik ve imalat maliyeti daha kolay değerlendirebilir. Araştırmacılar Java programlama dilini kullanarak bir Standart Query Language (SQL) veri tabanı oluşturmuşlardır. Tasarım ile ilgili işlem, kaynaklar, zaman ve maliyet bu veri tabanında saklanmıştır. Tasarım verileri bir tasarım veri tabanına eklenmiş ve bu veri tabanından çağrılan tasarım adı, ana şekil, şekil karmaşıklığı, simetri, ikincil pozitif ve negatif unsurlar, ağırlık, tolerans, yüzey şartları ve üretim miktarı verileri kullanılarak en optimum imalat işlemi oluşturulur. Daha sonra imalat süre ve maliyet de dikkate alınır ve alternatifler arasından en uygun imalat maliyetine sahip olan seçilir.

4. İmalat için tasarım işlem modeli

İmalat yöntemlerini tasnif etmek, işlem planlama ve imalat yöntemi seçimine kolaylık sağlar. Bu amaçla, tasarım sistemine uygun imalat yöntemleri tasnifi, matematiksel bağıntılarla yönetme ve geometrik / imalat unsurları arası ilişki kurmak gerekir. İmalat yöntemlerini tasnif amaçlı çalışmaları karşılaştıran Esmailian vd. [31], bu yöntemlerin yeni teknolojilere ait işlem tanımlarında yetersiz kaldığı ve alternatif en iyi tasnifi Nassehi vd. [32] yaptığını belirtmiştir. Bu araştırma tasnifi esas alınarak imalat yöntemleri beşe ayrılmıştır:

1. Birleştirmeli imalat: Birden fazla parça, kaynak, montaj vb. yöntemlerle birleştirilir.
2. Ayırtırmalı imalat: Bir parça kesilerek, demonte edilerek ayrıştırılır.
3. Çıkartmalı imalat: Bir parçadan talaş kaldırarak parça geometrisi değiştirilir.
4. Dönüştürmeli imalat: Bir parça, ağırlığı değiştirilmeden başka bir şekil veya yapıya dönüştürülür.
5. Eklemeli imalat: Parça, 3B yazdırma, döküm ya da enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle oluşturulur.

Bu son tasnif, tersine mühendislikle imal edilecek ürün imalat yöntemi belirlemede başlık sayısını azaltıldığı için süreci hızlandırır. Böylece parçaya uygun imalat işlemi daha hızlı olur. Daha sonra, imalat tasnifini ayrıntılı hale getirmek gerekir. Kalpakjian vd., imalat yöntemlerini 6 grupta incelenmiştir [21]. 3B modelden çıkartılan verileri değerlendirme, eşleştirme ve kıyaslama için (geometrik parametrelere göre) bir sistem oluşturulabilir. Anılan iki imalat yöntemine dayalı farklı bir tasnif Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. İmalat yöntemlerini tasnif etme

Birleştirmeli imalat	Ayrıştırırmalı imalat	Çıkartmalı imalat	Dönüştürmeli imalat	Eklemeli imalat
Montaj	Demontaj	Tornalama	Haddeleme	Döküm
Kaynak	Kesme	Frezeleme	Profil haddeleme	Kum
Elektron ışını	Testere	Delme	Sıcak ekstrüzyon	Alçı
MIG/MAG	Lazer	ECM	Soğuk ekstrüzyon	Seramik
Nokta	Su jeti	EDM	Darbeli ekstrüzyon	Hassas
Ultrasonik	Plazma	Taşlama	Tel çekme	Kokil
TIG	Tel erezyon	Sac metal işleme	Çubuk çekme	Basınçlı
Lazer	Torna	Lazer	Boru çekme	3D printing
Lehim	Freze	Su jeti	Sac metal şekillendirme	Toz metalurjisi
		Plazma	Kalıpta dövme	
		Planya	Sıcak dövme	
		Vargel	Soğuk dövme	
		Broslama	Sıvama	
		Honlama	Isıl işlem	
		Raybalama		
		Borlama		
		Diş açma		

TM, imalat sayısı az ve genelde bir/birkaç parça ile sınırlı uygulamaları içerir. Az sayıda parça imal edilmekle birlikte buradaki tasarımcılar farklı tür parçalar üzerinde çalışır. Parti boyutu küçük ve tasarım çeşidi fazla olduğunda tasarım ve tasarım doğrulama süresi de sınırlı olur. Belge eksikliği varsa, TM tasarımcısı, yeniden imal edilecek parça bilgilerine çabuk ulaşmayı sağlayacak araçlara ihtiyaç duyar.

Tasarımcı, her zaman aynı ürünü birebir imal etmek istemeyeceği için, çalışma şekli ve işlevi aynı veya daha iyi olabilecek farklı bir tasarım da geliştirebilir. Daha hafif, dayanıklı, farklı malzeme ve işlemlerle imal edilebilecek ekonomik bir ürün tasarlayabilir. Şekil 5’de sunulan imalat için tasarım işlem modeli, bu hedefe ulaşmada tasarımcının ihtiyacı olan araçları sağlar. Bu tasarım işlem modeli; bilgi toplama, veri işleme, tasarım, analiz ve çözüm şeklinde beş aşama içerir. Bunlar kısmen paralel veya geriye dönük süreçler de olabilir.

Bilgi toplama, mevcut ürün veya varsa ürün belgeleri kullanılarak başlar. Mevcut üründen çalışma şartları, ürünün işlevi gibi bazı bilgiler alınabilir ve ürün belgelerine aktarılır. Ürün belge bilgileri doğrudan veya değişiklik sonrası tasarımcı girdileri olarak kullanılabilir. Çalışma koşulları, parçanın işlevi, yüzey kalitesi, imalat miktarı, malzeme gibi bilgiler tasarımcı tarafından kaydedilir. Tasarımcı yeni bilgi girdiğinde ürün belgelerini de günceller. Ayrıca imalat işlem bilgileri de tüm çalışmalarda kullanılmak için sistem veri tabanında saklanır.

İkinci aşamada, TM uygulanacak ürüne ait 3B koordinat verileri bilgisayar ortamına aktarılır. Bunun için temassız veya temassız yöntemlere dayalı tarayıcılar kullanılır. Temassız çalışan tarayıcı teknolojisindeki gelişmelerle bunlar özellikle karmaşık geometriye sahip parçalarda vazgeçilmez olmuşlardır. 3B koordinat verisi oluşturma esnasında üründen elde edilen veriler filtre edilir ve birleştirilen nokta bulutları kullanılarak yüzey ve unsurları içeren 3B katı model elde edilir. Bu işlemler tersine geometrik modelleme sürecinde yapılır. 3B katı model verileri ve imalat verilerini içerir. 3B katı modele ait unsurlar, geometrik veriler olduğu ve doğrudan imalatla kullanılamayacağı için, imalat unsurlarına dönüştürülür. Parça karmaşıklığı analiz edilir ve en, boy, yükseklik ölçüleri ile hacim verileri ayrı parametrelere kaydedilir. Bu veriler kullanılarak parçanın işlenmemiş dolu hacmi hesaplanır.

Üçüncü aşamada, ikinci aşamada 3B katı modelden elde edilen veriler ve birinci aşamadaki tasarımcı girdileri tasarım kriterleri veri tabanına aktarılır ve parçanın 3B katı modeli oluşturulur. 3B katı modelde eksiklikler varsa bu aşamada tamamlanır.

Dördüncü aşamada, tasarım kriterleri ve 3B katı model kullanılarak işlev, dayanım, gerilim, deformasyon, sehim, katılık, ağırlık, sürtünme, termal, aşınma, korozyon gibi analiz ve hesaplar yapılır. Bu amaçla ürünün işlev ve çalışma koşulları iyi anlaşılmalıdır. Sadece bu şekilde parçaya ait malzeme, imalat toleransları ve yüzey kalitesi (pürüzlülük değerleri) gibi imalat unsurları belirlenebilir.

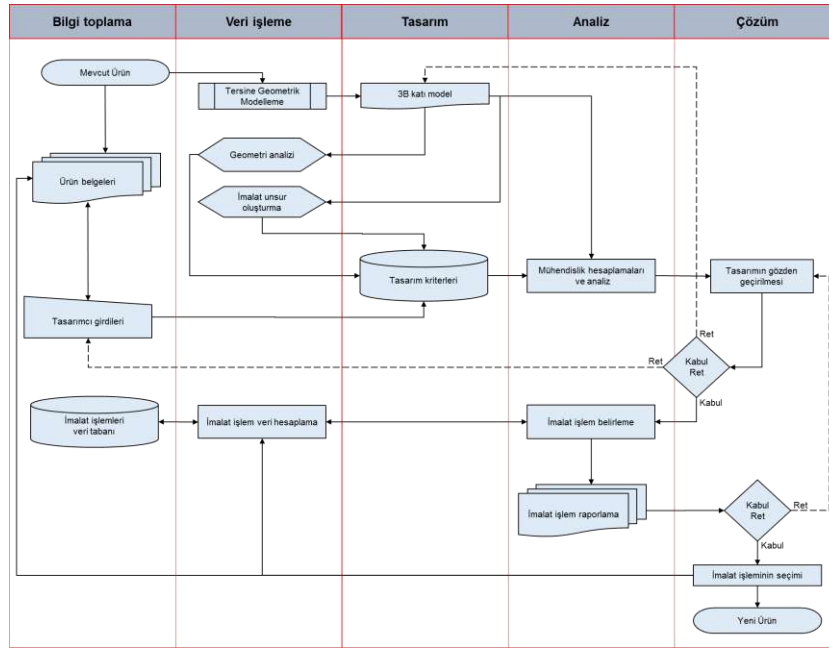
Beşinci ve son aşamada, hesap ve analizlerden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak tasarım gözden geçirilir ve çözümler üretilir. Malzemeyi belirlemek için mevcut ürün üzerinde test yapılabileceği gibi, parçanın çalışma koşulları ve işlevi incelenerek mühendislik hesapları ve analizlerden de yararlanılabilir. Yani başlangıçta atanan malzeme analizler sonucunda değiştirilebilir. Tüm tasarımcı girdileri ve geometriden gelen tasarım kriterleri de tasarım gözden geçirilirken değerlendirilip değiştirilebilir. Eğer çözüm yeterli ise imalat işlemleri belirlenir ama çözüm yeterli değilse 3B katı model veya tasarım kriterleri değiştirilebilir. Bu düzeltmeler işlemin başa dönmesi ve yeni bir tasarım oluşturulmasını gerektirir. En iyi sonuç elde edilene kadar tasarım kriterleri yeniden güncellenir, hesap ve analizler tekrarlanır. Tasarımın gözden geçirilmesi, tasarımcı girdileri ve 3B katı modelin eşzamanlı iyileştirilmesi ile tamamlanır.

En iyi tasarıma karar verildikten sonra imalat işlemleri belirlenir. Bu aşamada, imalat işlemleri veri tabanında kayıtlı hammadde şekil ve boyutları, işlem toleransları, işlem yüzey kaliteleri, takım maliyetleri, birim maliyetler ve birim süre verileri işlenir. Parçanın işlenmemiş dolu hacim ölçüleri, imalat payları da dikkate alınarak, parçanın hangi boyutlu ham maddelerden üretilebileceği araştırılır. Böylece, kütük, lama veya mevcut standart bir profile sahip hammadde kullanım durumu tespit edilir. Bu amaçla imalat işlemleri veri tabanı malzemelere göre standart ve güncel ham madde ölçülerini içermelidir.

Uygun imalat işlemleri, işlem maliyetleri, işlem süreleri ve fire oranları hesaplandıktan sonra tekil ve birleşik imalat işlemlerine ait karşılaştırmalı bir doküman hazırlanır. Elde edilen imalat işlemleri belirlendikten sonra bile tasarım gözden geçirilerek tasarımcı girdileri ve 3B katı modelde değişiklik yapılabilir. Bunun için tasarımı iyileştirici sorular gözden geçirilmelidir:

- Parçanın mekanik özellikleri azaltılabilir mi?
- Parça toleransları bu kadar hassas olmalı mıdır?
- Daha pürüzlü yüzeyler de aynı işlevi yerine getirebilir mi?
- Boyutlar küçültülebilir veya büyütülebilir mi?

Bu sorular ile birlikte tasarım tekrar gözden geçirilir, tasarım girdileri ve 3B katı modelde değişiklik yapılarak bu sefer imalat amaçlı tasarım optimizasyonu yapılır. Sonrasında karşılaştırmalı raporlar güncellenerek bir önceki durum ile arasındaki farklar da karşılaştırılmalı olarak görüntülenir. Tasarımcı güncellenen raporları inceleyerek ve elindeki imkanları da gözетerek en uygun imalat işlemini seçer. Böylece seçilen imalat işlemlerine yönelik imalat çıktıları oluşturulur ve ürün imal edilir. İmalat işleminin seçimi sonrasında ürün belgeleri güncellenir. İmalat işlem verileri işlenerek, gerekli ise, imalat işlemleri veri tabanı güncellenir. Böylece yapılan her çalışmada imalat işlemleri veri tabanı gelişir.



Şekil 21. İmalat için tasarım işlem modeli

5. Sonuç

Tersine mühendislik, mevcut bir ürünü referans alarak bunun yeniden tasarımı, geliştirilmesi ve imalini içerir. Bu yaklaşım; tek parça üretimi, mevcut bir ürüne yedek parça sağlama, kopya yapma, adapte/taklit tasarım vb. gibi hallerde avantaj sağlayabilir. Bu bildiri kapsamında tersine mühendislik yaklaşımını incelenmekte ve bu konudaki güncel araştırmalara ait detaylı bir kaynak araştırması yapılmaktadır. Ayrıca, tersine mühendislik uygulamalarında tasarımcılara kaliteli destek sağlayacak yeni bir imalat için tasarım işlem modeli de önerilmektedir.

Yaklaşık son çeyrek asırlık dönemde, daha önceki yöntem ve yaklaşımlardan farklı olarak, tersine mühendislik alanında da bilgisayar teknolojisi, BDT ve BDM sistemleri, 3B tarayıcılar, 3B yazıcılar vb. gibi modern araçlardan daha etkin yararlanılmaktadır. Bu tür araçlar tasarımcının işini kolaylaştırmakta ve çabuklaştırmaktadır. Başlangıç safhasında olan bu araştırmanın ileriki aşamalarında tersine mühendislik işleminde kullanılabilecek yeni ve etkin bir imalata uygun tasarım yazılım sistemi geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yazılım sistemi; 3B tarayıcılar ile tarama sonrası oluşturulan parçalara ait geometrik modellerin farklı imalat yöntemlerine göre analizin yapacak ve bunları karşılaştıracaktır. Böylece tasarımcı her özel durum için en uygun ve optimum parça tasarımını, farklı imalat şartlarını da dikkate alarak, yapabilecektir. Bundan sonraki araştırma istikametleri bu yönde gelişecektir.

Referanslar

- [1] S. Batni and M. L. J. A. Tiwari, "Reverse engineering : a brief review," *Int. J. Emerg. Tech.*, vol. 1, no. 2, pp. 73–76, 2010.
- [2] W. B. Thompson, J. C. Owen, H. J. De St. Germain, S. R. Stark, and T. C. Henderson, "Feature-based reverse engineering of mechanical parts," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 1, pp. 57–66, 1999.
- [3] P. M. KUMAR A.; JAIN, P. K. & PATHAK, "Reverse Engineering in Product Manufacturing: An overview," *Daaam Int. Sci. B.* 2013, pp. 665–678, 2013.
- [4] J. Herráez, J. C. Martínez, E. Coll, M. T. Martín, and J. Rodríguez, "3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering," *Measurement*, vol. 87, pp. 216–227, 2016.
- [5] J. Kaufman, A. E. W. Rennie, and M. Clement, "Single camera photogrammetry for reverse engineering and fabrication of ancient and modern artifacts," *Procedia CIRP*, v. 36, pp. 223–229, 2015.

- [6] "Photo to 3D: How to Turn a Single Photo into a 3D Model & 3D Print," 2016. [Online]. Available: <https://i.materialise.com/blog/how-to-turn-a-single-photo-into-a-3d-print-with-a-free-online-app/>. [Accessed: 12-Jun-2016].
- [7] P. Fayolle and A. Pasko, "An evolutionary approach to the extraction of object construction trees from 3D point clouds," *Comput. Des.*, vol. 74, pp. 1–17, 2016.
- [8] S. M. Jeon, J. H. Lee, G. J. Hahm, and H. W. Suh, "Automatic CAD model retrieval based on design documents using semantic processing and rule processing," *Com. Ind.*, v. 77, pp. 29–47, 2016.
- [9] C. K. Au and M. M. F. Yuen, "Feature-based reverse engineering of mannequin for garment design," *Comput. Des.*, vol. 31, no. 12, pp. 751–759, 1999.
- [10] T. F. Alghazzawi, "Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation," *J. Prosthodont. Res.*, vol. 60, no. 2, pp. 72–84, 2016.
- [11] A. P. Valerga, M. Batista, R. Bienvenido, S. R. Fernández-Vidal, C. Wendt, and M. Marcos, "Reverse Engineering Based Methodology for Modelling Cutting Tools," *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 1144–1151, 2015.
- [12] A. C. Lin and N. H. Quang, "Automatic generation of mold-piece regions and parting curves for complex CAD models in multi-piece mold design," *CAD*, vol. 57, pp. 15–28, 2014.
- [13] G. Chintala and P. Gudimetla, "Optimum material evaluation for gas turbine blade using Reverse Engineering (RE) and FEA," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1332–1340, 2014.
- [14] V. Majstorovic, M. Trajanovic, N. Vitkovic, and M. Stojkovic, "Reverse engineering of human bones by using method of anatomical features," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, v. 62, n. 1, pp. 167–170, 2013.
- [15] H. J. de St. Germain, "Reverse Engineering Utilizing Domain Specific Knowledge," The University of Utah, 2002.
- [16] X. Ye, H. Liu, L. Chen, Z. Chen, X. Pan, and S. Zhang, "Reverse innovative design — an integrated product design methodology," *Comput. Des.*, vol. 40, pp. 812–827, 2008.
- [17] J. E. Shigley, C. R. Mischke, and R. G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*, v. New York, . 2002.
- [18] R. Messler, *Reverse Engineering: Mechanisms, Structures, Systems & Materials*, 1st ed. Mc Graw Hill, 2014.
- [19] G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. A. Knight, *Product Design for Manufacture and Assembly*. 2002.
- [20] A. C. Telea, *Reverse Engineering – Recent Advances and Applications*. InTech, 2012.
- [21] Kalpakjian S, Schmid SR. *Manufacturing engineering and technology*. New York; Toronto: Prentice Hall; 2010. .
- [22] B. K. Choi and K. Ko, "C-space based CAPP algorithm for freeform die-cavity machining," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 35, no. 2, pp. 179–189, 2003.
- [23] M. a. Younis and M. a. Abdel Wahab, "A CAPP expert system for rotational components," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 33, no. 3–4, pp. 509–512, 1997.
- [24] L. Sabourin and F. Villeneuve, "OMEGA, an expert CAPP system," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 25, no. 1, pp. 51–59, 1996.
- [25] C. Grabowik, K. Kalinowski, and Z. Monica, "Integration of the CAD/CAPP/PPC systems," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 164–165, pp. 1358–1368, 2005.
- [26] J. P. Kruth, J. Detand, G. Van Zeir, J. Kempenaers, and J. Pinte, "Methods to improve the response time of a CAPP system that generates non-linear process plans," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 25, no. 1, pp. 9–17, 1996.
- [27] S. C. Feng and E. Y. Song, "A manufacturing process information model for design and process planning integration," *J. Manuf. Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–15, 2003.
- [28] I. Rojek, *Neural Networks as Classification Models in Intelligent CAPP Systems*, vol. 41, no. 3. IFAC, 2008.
- [29] H. C. Lee, W. C. Jhee, and H. S. Park, "Generative CAPP through projective feature recognition," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 53, no. 2, pp. 241–246, 2007.
- [30] X. Zhou, Y. Qiu, G. Hua, H. Wang, and X. Ruan, "A feasible approach to the integration of CAD and CAPP," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 39, no. 4, pp. 324–338, 2007.
- [31] B. Esmaeilian, S. Behdad, and B. Wang, "The evolution and future of manufacturing: A review," *J. Manuf. Syst.*, vol. 39, pp. 79–100, 2016.
- [32] "Nassehi A, Newman S, Dhokia V, Zhu Z, Asrai R. Using formal methods to model hybrid manufacturing processes. In: ElMaraghy HA, editor. Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability SE-8. Berlin Hei- delberg: Springer; 2012. p. 52–6."

Katmanlı İmalat Teknolojisinde Polimerik Malzeme İle Esnek Ürün Elde Edilmesi İçin Gerekli Parametrelerin Analizi

Ömer Elbaba^{1,2}, Samet Sezer², Haydar Şahin¹, Savaş Dilibal¹

¹*İstanbul Gedik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü 34876 İstanbul*

²*Printek Mekatronik Sistemleri Ltd., İstanbul*

Abstract

The development in additive manufacturing technology facilitates the production of the final product for varied applications; such as mechatronics, robotics, aerospace and biomedical devices. The soft mechanical property is one of the desired parameters for these applications. The final product can be easily manufactured through the additive manufacturing process compared to the conventional casting technique. In this study, the prerequisite for material selection and manufacturing parameters in additive manufacturing investigated for the soft products.

Keywords: Soft product, Additive manufacturing, Flexible filament

Özet

Katmanlı imalat teknolojisindeki gelişmeler mekatronik, robotik, havacılık ve biyomedikal ürünler gibi birçok farklı uygulamanın üretim yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu uygulamalardaki istenen parametrelerden biri de esnek mekanik özelliklere sahip olunmasıdır. Geleneksel döküm teknolojisi kullanılarak yapılan üretime karşılaştırıldığında katmanlı imalat tekniği birçok açıdan daha kolay son ürüne erişilebilen bir tekniktir. Bu çalışmada, esnek ürün elde edilmesi için katmanlı imalat teknolojisinde malzeme seçimi ve imalat parametreleri ile ilgili gerekli ön şartlar araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Esnek ürün, Katmanlı İmalat, Esnek filament

1. Giriş

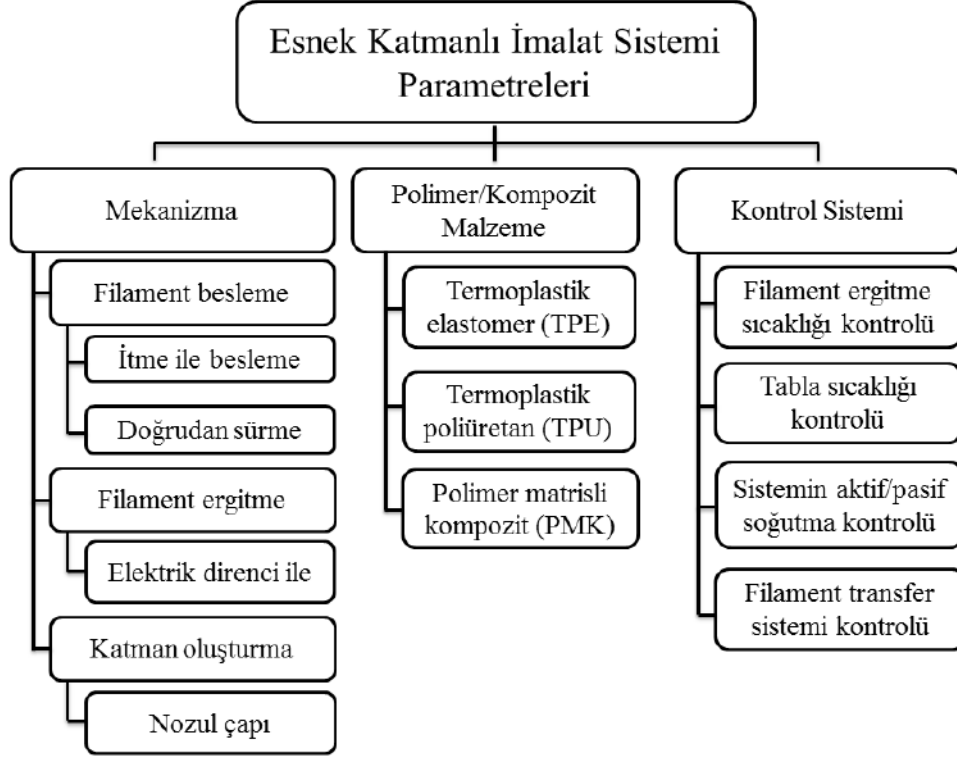
Endüstri 4.0 ile uyumlu üretim teknolojileri içerisinde yer alan katmanlı imalat teknolojisindeki yenilikler prototip veya ürün geliştirilmesinde hızlı ve yüksek kalitede alternatif çözümlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır [1]. Döküm ve talaşlı imalattan farklı olarak polimer, metal ve kompozit malzemelerin katman katman biriktirme yapılarak üretimi, başta mekatronik [2], robotik [3], havacılık [4] ve biyomedikal [5] alanlar olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında etkin olarak kullanılmasının yolunu açmıştır.

Özellikle polimer ve polimer matrisli kompozit malzemeler metallere göre daha düşük ergime sıcaklığına sahip olduğundan dolayı ergiyik yığma (FDM, fused deposition modeling) tekniği kullanılarak üretilmektedir. Esnek üretim için polimer ve polimer matrisli kompozit malzemeler içerisinden seçim yapılmalıdır. Malzeme (filament) seçimi esnek katmanlı imalatla en önemli parametrelerden birini oluşturur. Esnek katmanlı imalat için gerekli olan polimerik malzeme yüksek çekme dayanımı yanında sertlik değeri de ürün esnekliği açısından detaylı olarak tespit edilmelidir.

Termoplastik elastomer malzemeler, çekme dayanımı 10-21 MPa aralığında ve sertliği 5-95A Shore aralığında olmasından dolayı esnek katmanlı imalatla tercih edilen bir malzemedir [2]. Düşük sertlik değerine sahip olan TPE filamentler çekme ve itmede karşılaşılan zorluklardan dolayı filament besleme mekanizmasında kullanıma uygun değildir. Bu nedenle genellikle esnek katmanlı imalat sistemlerinde sertliği 85-95A Shore aralığında değişen ticari TPE filamentler kullanılır [4].

Esnek katmanlı imalat sistemini temel olarak mekanizma, esnek malzeme ve kontrol olmak üzere üç ayrı grupta incelemek mümkündür. Şekil 1.'de esnek katmanlı imalat sisteminin temel alt sistemleri detaylandırılmıştır. Kullanılan mekanizma sistemleri filament besleme, filament eritme ve katman oluşturma alt sistemlerinden meydana gelir. İkinci önemli parametre olan malzeme seçiminde termoplastik elastomer (TPE), ter-

moplastik poliüretan (TPU) ve polimer matrisli kompozit seçenekleri bulunmaktadır. Üründen istenen, çekme dayanımı, sertlik, elastisite modülü gibi mekanik özellikler kullanılacak esnek malzemenin seçiminde önemli rol oynar. Esnek katmanlı imalat için dört ana kontrol algoritmasının oluşması gerekir. Bunlar filament ertitme sıcaklığı kontrolü, tabla sıcaklığı kontrolü, sistemin aktif/pasif soğutma kontrolü ve filament transfer sistemi kontrolüdür.

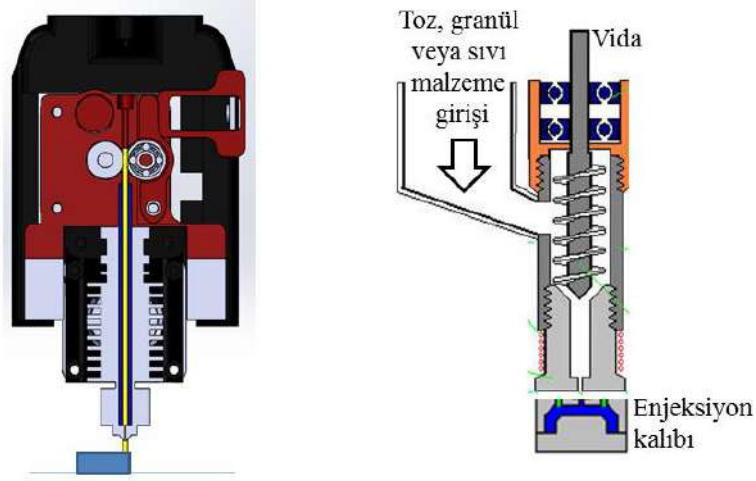


Şekil 1. Esnek katmanlı imalat sisteminin temel parametreleri

2. Katmanlı İmalatla Esnek Parçaların Üretim Yöntemleri

Katmanlı imalatla esnek parçaların üretimi ergiyik yığma (FDM, fused deposition modeling), seçici lazer sinterleme (SLS, selective laser sintering) veya stereolitografi (SLA, stereo lithography apparatus) yöntemleri ile yapılabilir. En yaygın olarak kullanılan ergiyik yığma yönteminde filament esnek olmasından dolayı filament besleme doğrudan sürme (direct drive) yöntemi tercih edilerek yapılır. Filament itme ile besleme (bowden) mekanizmasında esnek filament yeterince itilememesi sorunlarıyla karşılaşılır. Bu sorun ekstrüder içerisinde tıkanmalara neden olmaktadır. PLA veya ABS filamentlere göre esnek filament kullanımı için 3B yazıcının ertitme sıcaklığı ve baskı hızı gibi parametrelerin esnek filament özelliklerine göre düzenlenmesi gerekir.

FDM tekniği kullanılarak yapılan ekstrüzyonla esnek üç boyutlu imalat, plastik enjeksiyondan imalat tekniği açısından farklılıklar gösterir. Plastik enjeksiyon sisteminde 3 boyutlu ürün elde edilmesi için, öncelikle ürüne ait kalıp imalatı gerekir. Şekil 2.de gösterilen katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan FDM tekniğinde, esnek ürün elde edilmesinde kalıba gereksinim ortadan tamamen kalkmaktadır.

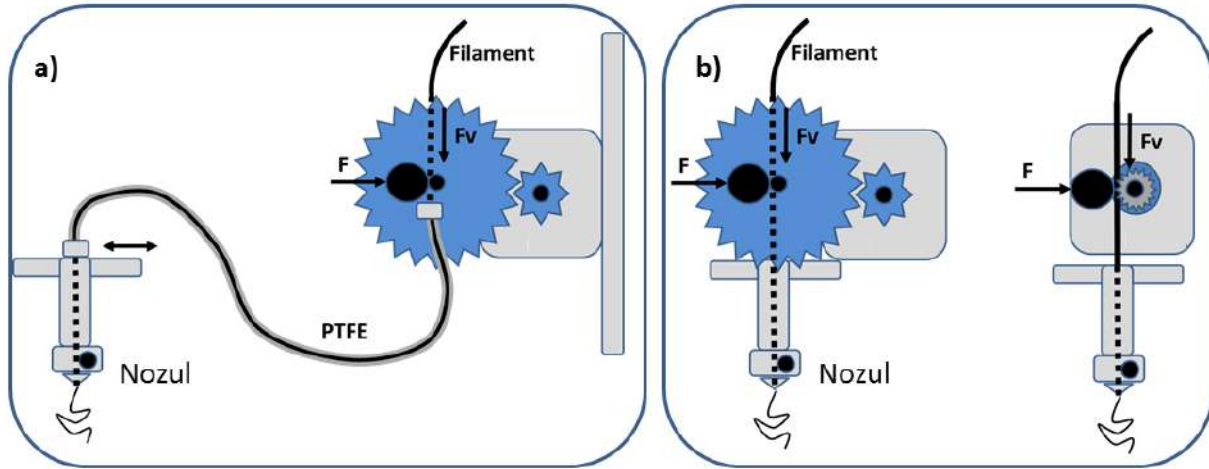


Şekil 2. Esnek ürün elde etmek için imalat usulleri a) Ekstrüzyonla esnek üç boyutlu imalat b) Enjeksiyon kalıplama

3. Esnek Katmanlı İmalat Fiziksel Parametreleri

Esnek katmanlı imalat fiziksel parametreleri; mekanizma, polimerik malzeme ve kontrol sisteminde uygulanan parametreler olmak üzere üç ayrı gruptan oluşur.

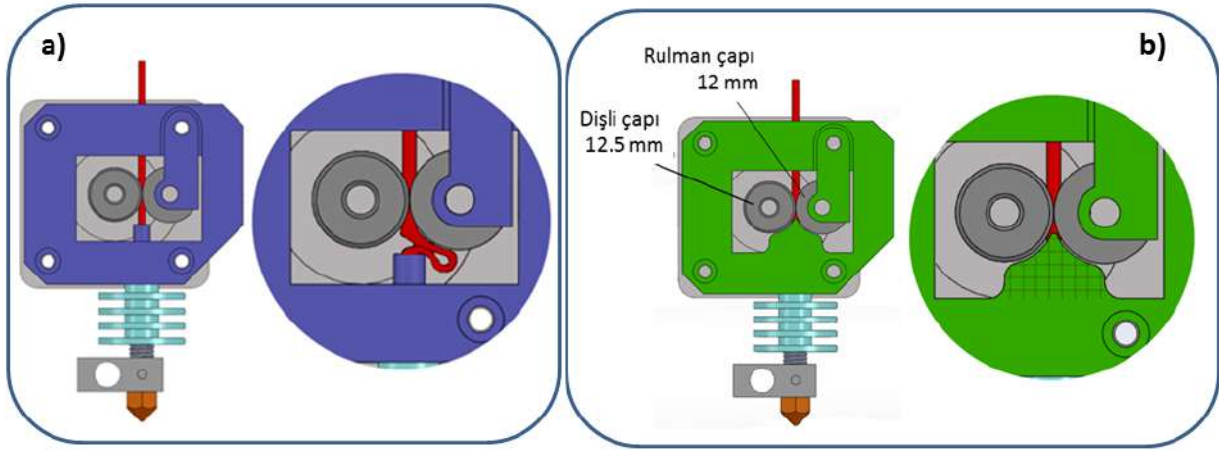
Mekanizma parametreleri altında yer alan filament besleme düzeneği itme ile besleme (bowden) ve doğrudan sürme (direct-drive) olmak üzere iki farklı şekilde olabilir.



Şekil 3. İtmeli ve doğrudan sürülen ekstrüder [6]

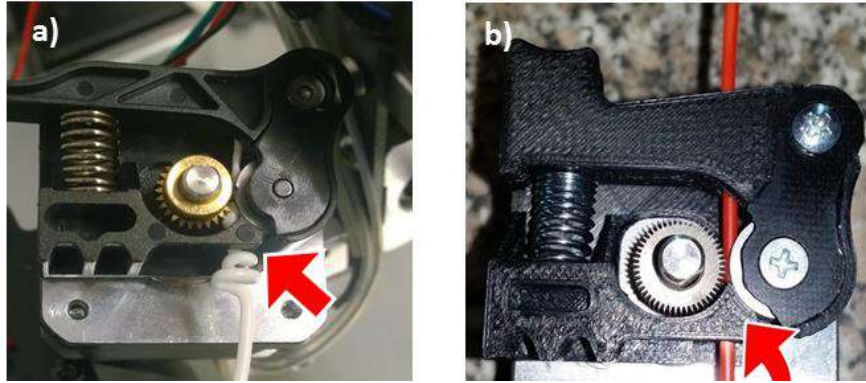
Esnek filament için itme ile besleme ve doğrudan sürme sistemleri karşılaştırıldığında, doğrudan sürme uygulanan ekstrüder sistemi ile daha sorunsuz sonuçlar elde edilir. İtmeli ile beslenen ekstrüder sisteminde filamentin iten adım motoru, filamentin ergitildiği sıcak uçtan çok uzakta bulunduğu için esnek filament ile baskılarda sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle, esnek filament ile imalat için doğrudan sürülen ekstrüder sistemleri tercih edilmelidir.

Doğrudan sürülen ekstrüder sistemleri esnek filament ile baskı için tercih edilen bir sistem olmasına rağmen, ek tasarım değişikliklerine de ihtiyaç gösterir. Esnek filament, ekstrüder motorunun ucundaki itici dişli ve gergi rulmanını geçtikten sonra z ekseninde yoluna devam edecek şekilde ekstrüder tasarımında gerekli değişiklik yapılmalıdır. Şekil 4.de soldaki tasarımda doğrudan sürülen ekstrüder sistemi ile esnek filament kullanabilmek mümkün değildir. Böyle bir tasarımda esnek filament, z ekseninde ilerlemeyip itici dişli veya gergi rulmanı tarafına doğru yönelerek akıştaki sürekliliği bozabilmektedir. Filament besleme ünitesinin tasarımında Şekil 4.de sağdaki tasarımdaki gibi rulman çapı ile dişli çapı arasındaki çap farkı esnek filamentin transferinde katlanmaları engellemektedir.



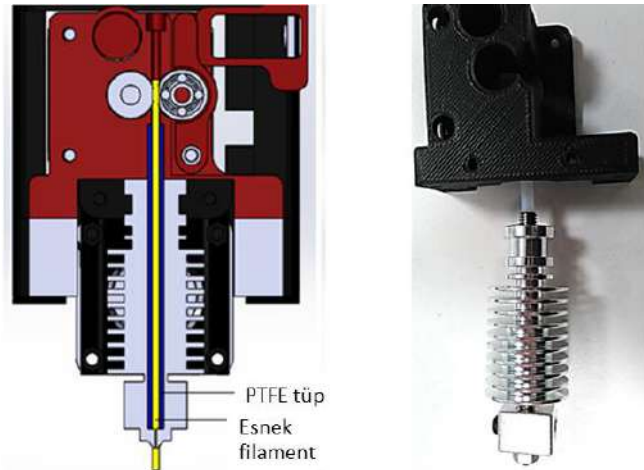
Şekil 4. Esnek katmanlı imalat için filament besleme ünitesinin tasarımında yapılan değişiklik [7]

Doğrudan sürülen ekstrüder mekanizmasının esnek filamentle beslemeye uygun hale getirilmediği sistem Şekil 5.de gösterilmiştir. Şekil 5a.da esnek filament katlanarak devam ederken Şekil 5b.de tasarımı değiştiren sistemde katlanmalar engellenmiştir.



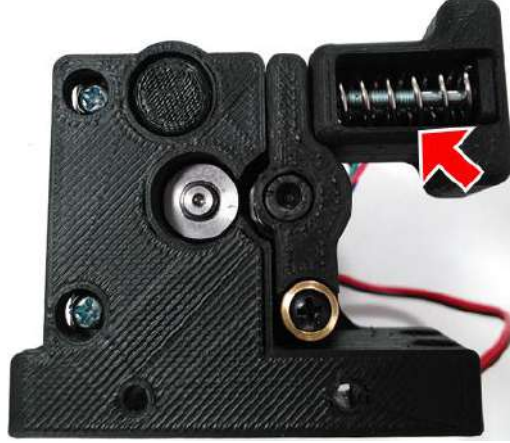
Şekil 5. Doğrudan sürülen ekstrüder mekanizmasının esnek filamentle beslemeye uygun hale getirilmesi [7]

Esnek filamentle üretim için tasarımda dikkat edilmesi gereken diğer önemli husus, filamentin itici dişli ile nozul arasında kontrollü bir şekilde ilerlemesinin sağlanmasıdır. Esnek filament ekstrüder içerisinde olabilecek bölgesel katılmalardan etkilenmemesi için Şekil 6.da görüldüğü gibi metal yüzey ile arasında yalıtım sağlanarak politetrafloroetilen (PTFE) tüp içerisinde nozula kadar ilerler. Böylece, esnek filament z ekseninde katlanmaya veya nozul öncesinde ergimeye uğramadan nozul içine transferi gerçekleşir.



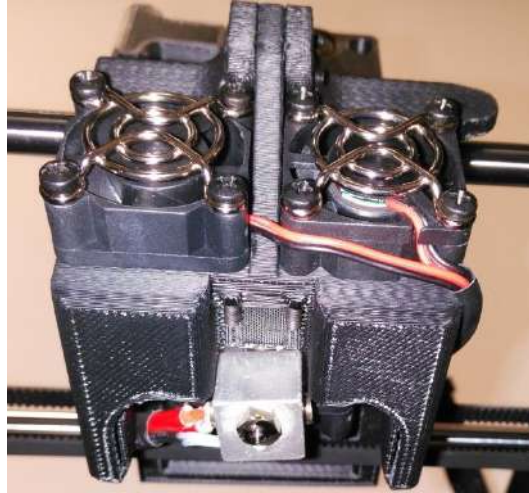
Şekil 6. Esnek filamentin PTFE tüp içinden geçerek ilerlemesi

Esnek filament ile baskı yapılacağı zaman, filamentte basma kuvveti uygulayan gergi yayının gerilerek daha fazla kuvvet uygulaması gerekmektedir. Esnek olmayan malzemelere aktif basma kuvveti uygulayan gergi yayı, esnek filament için aynı etkiyi gösteremez. Bu nedenle, gergi yayının biraz daha sıkılması ile gergi rulmanı filamentte daha yüksek basma kuvveti uygulayabilir. Bu değişiklik esnek filamentin düzenli olarak sürekli akışını sağlar. Ekstrüder üzerinde bulunan esnek filament gergi yayı Şekil 7.de gösterilmiştir.



Şekil 7. Ekstrüder üzerinde bulunan esnek filament gergi yayı

3B yazıcıda hem esnek hem de esnek olmayan malzemeler kullanılarak baskı alınıyor ise, malzeme geçişleri arasında mutlaka temizleme filamenti kullanılmalı ve bu temizleme filamenti uzun bir süre akıtılıp sıcak uç iyice temizlenmelidir. Aksi takdirde esnek malzeme ile baskı sırasında esnek olmayan malzeme parçacıkları sıcak ucu tıkararak baskı sırasında soruna neden olur. Ayrıca baskı kalitesini arttırmak için baskı soğutma fanı kullanılır. Böylece, malzemenin hızla soğuması sağlanarak katmanlar arası geçişlerde yüksek soğuma hızı elde edilir. Örnek bir baskı soğutma fanı uygulaması Şekil 8.de gösterilmiştir.



Şekil 8. Ekstrüder üzerinde aktif soğutma için kullanılan fan sistemi

FDM tekniğiyle geliştirilen üç boyutlu yazıcıların esnek üretim yapacak şekilde ayarlanması gerekir. Termoplastik elastomer (TPE) esnek filamentlerin baskı parametreleri PLA filamentle yapılan 3B baskıya göre farklılıklar göstermektedir. Baskı hızı 10-30 mm/sn arasında ayarlanmalıdır. Esnek malzeme ile baskı yaparken mümkünse geri çekme kullanılmamalıdır. Eğer kullanılacaksa geri çekme miktarı esnek olmayan malzemelere göre 1/3 oranında azaltılmalıdır. 1.75 mm kalınlığa ve 85A shore sertliğine sahip TPE filamentler, 210 °C - 230 °C arasındaki sıcaklıkta ekstrüder içinde eritilerek esnek imalat yapılır. Tablo 1.de esnek katmanlı imalatta kullanılan polimerik filament fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Esnek katmanlı imalatla kullanılan polimerik filament fiziksel özellikleri

Filament	Sertlik değeri (Shore A)	Yoğunluk	Baskı sıcaklığı	Aşınma dayanımı	Çekme oranı
TPE	85A	1.20g/cm ³	210-230 °C	Orta	% 1,2 - 3,0
TPU	94A	1.21g/cm ³	210-230 °C	Yüksek	% 0,8 - 1,8

4. Sonuç ve Gelecekteki Çalışmalar

Esnek katmanlı imalat sistemi, polimerik veya polimer matrisli kompozit malzeme kullanılarak birçok mühendislik uygulamasında tercih edilir hale gelmiştir. Daha hızlı ve kaliteli prototip ve ürün geliştirilmesine olanak sağlayan bu imalat sistemleri ile tasarımdan üretime geçiş süreci hızlandırılmıştır. Bu sistem ile imalat teknolojilerine alternatif çözümler sunulmaktadır. İleriki çalışmalarda esnek katmanlı imalatla üretilen esnek robotik sistemler ve uygulamaları ile ilgili çalışmalar aktarılacaktır.

Kaynaklar

- [1] Saari, M., Galla, M., Cox, B., Krueger, P., Cohen, A. and Richer, E., 2015. Additive Manufacturing of Soft and Composite Parts from Thermoplastic Elastomers. In *Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX: University of Texas at Austin* (pp. 949-958)
- [2] Mutlu, R., Yildiz, S.K., Alici, G., in het Panhuis, M. and Spinks, G.M., 2016, July. Mechanical stiffness augmentation of a 3D printed soft prosthetic finger. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 7-12). IEEE.
- [3] Mutlu, R., Alici, G., in het Panhuis, M. and Spinks, G., 2015, July. Effect of flexure hinge type on a 3D printed fully compliant prosthetic finger. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 790-795)
- [4] Moscato, S., Bahr, R., Le, T., Pasian, M., Bozzi, M., Perregrini, L. and Tentzeris, M.M., 2016. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, pp.1506-1509.
- [5] Przybytek, A., Kucińska-Lipka, J. and Janik, H., 2016. Thermoplastic elastomer filaments and their application in 3D printing. *Elastomery*, 20.
- [6] Gebhardt, A., 2007. Rapid Prototyping–Rapid Tooling–Rapid Manufacturing. *Carl Hanser, München*.
- [7] <http://www.gyrobot.co.uk/blog/how-to-3d-print-with-flexible-filaments>, erişim tarihi 06.03.2017

ÜÇ BOYUTLU YAZICILARIN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN KATALİTİK KONVERTÖRLERİN SERAMİK KISIMLARINDAKİ UYGULAMALARI

Edanur BALİ^a Berat Barış BULDUM^a, ,
barisbuldum@mersin.edu.tr

Mersin University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 33343 Ciftlikkoy,
Mersin / TURKEY

Özet

Artan dünya nüfusuyla beraber motorlu araçların kullanımına her geçen gün yenileri eklenmektedir. Araçların egzoz gazlarından kaynaklanan kirlilik ise önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu problemin giderilmesine yönelik birçok çalışma uygulanmıştır. Bununla beraber ilk adım Amerika ve Avrupa'da emisyon oranları için standartlar getirilmesiyle atılmıştır. Bu kısıtlamalara uyma şartı ile yapılan çalışmalar sonrasında katalitik konvertör ortaya çıkmıştır. Katalitik konvertörler en önemli kısımlarından biri katalizörlerdir. Katalizörler seramik malzeme üzerine emdirilerek temizleme işlemini yapmaktadır. Seramiğin kullanım alanlarındaki farklılığı 3 boyutlu baskı teknolojileri yöntemi kullanılarak, üretilmesi mümkün olmaktadır.

Anahtar kelimeler: Katalitik konvertör, Seramik, 3 Boyutlu Yazıcı

APPLICATIONS OF THREE-DIMENSIONAL PRINTERS BY THE CATALYTIC CONVERTERS USED IN CERAMIC PARTS THE AUTOMOTIVE SECTOR

Abstract

With the increasing world population, the use of motor vehicles is being added day to day. The pollution caused by the exhaust gases of vehicles is a serious problem. Many studies have been carried out to solve this problem. The first step, however, has been taken by introducing standards for emission rates in the US and Europe. Catalytic converters have emerged after the work carried out with the condition of compliance with these restrictions. One of the most important parts of catalytic converters is catalysts. The catalysts are impregnated on the ceramic material and cleaned. It is possible to produce the difference of usage areas of ceramics by using 3D printing technology method.

Key Words: Catalytic converter, ceramic, 3D printing

1.GİRİŞ

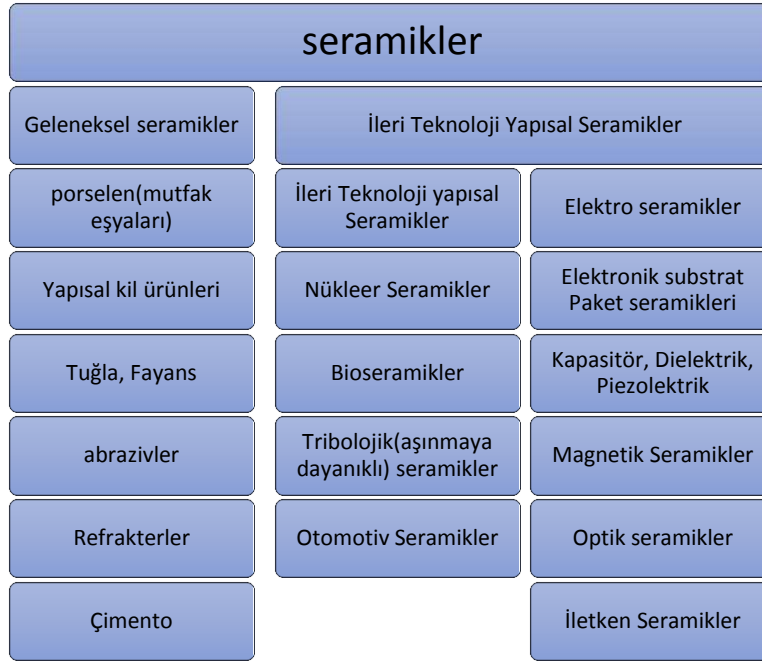
Motorlu binek araçların egzozlarından çıkan zararlı gazların zararsız hale dönüştürülmesinde katalitik konvertörler görev almaktadır. Katalitik konvertörler 1950'li yıllarda motorlu taşıt emisyonları üzerine çalışmalar yapan makine mühendisi Houdry i Eguene tarafından icat edilmiştir. 1973 yılında John J. Mooney ve Carl D. Keith tarafından geliştirilerek seri üretime geçilmiştir. ABD'de 1959 yıllarında ilk olarak yapılan egzoz emisyonlarını azaltmaya yönelik çalışmalarda HC ve CO emisyonu %40 kadar indirgenmiştir. Daha sonraları 1975 yılında geliştirilmiş olan katalitik konvertörlerde ise bu oran %90'lara ulaşmıştır. Bu emisyon kontrolünün en önemli sebebi kurşunsuz benzin kullanılmasıdır. 1980'lerde ise Üç yollu katalitik konvertörün kullanımı ile ortalama CO emisyonunda %94,8 yanmamış HC emisyonunda %85,4 ve NOx emisyonlarında %79,6 azalma sağlandığı gözlemlenmiştir [1].

Mevcut katalitik konvertörlerin içi yapısında kullanılan Rh (Rodyum) Pt (platin) ya da Pd (paladyum) yer almaktadır. Bu katalizörler redüksiyon ve oksidasyon kataliti olmak üzere iki tür görev yapmaktadır. Bu katalizörler seramik malzeme üzerine emdirilerek temizleme işlemini yapmaktadır. Seramik Bilyeli Tip Katalitik

Konvertörler her biri birbiri üzerinde duran küresel bilye tabakalarından oluşur. Bilyeler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı magnezyum alüminyum silikat seramiklerden yapılır[2].

Endüstriyel uygulamalarda seramiğin araçlarda filtre olarak kullanılması çevre ve insan sağlığı konusunda önemli bir yere sahiptir. Seramiğin kullanım alanları geleneksel seramikler ve ileri Teknoloji seramikleri olarak yer almaktadır(Şekil 1). Seramikler, son yıllarda üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin gelişimi ile birlikte de kullanılmaya başlanmıştır. Ürünlerin prototipleri yapılmadan üretimi gerçekleştirilmektedir.

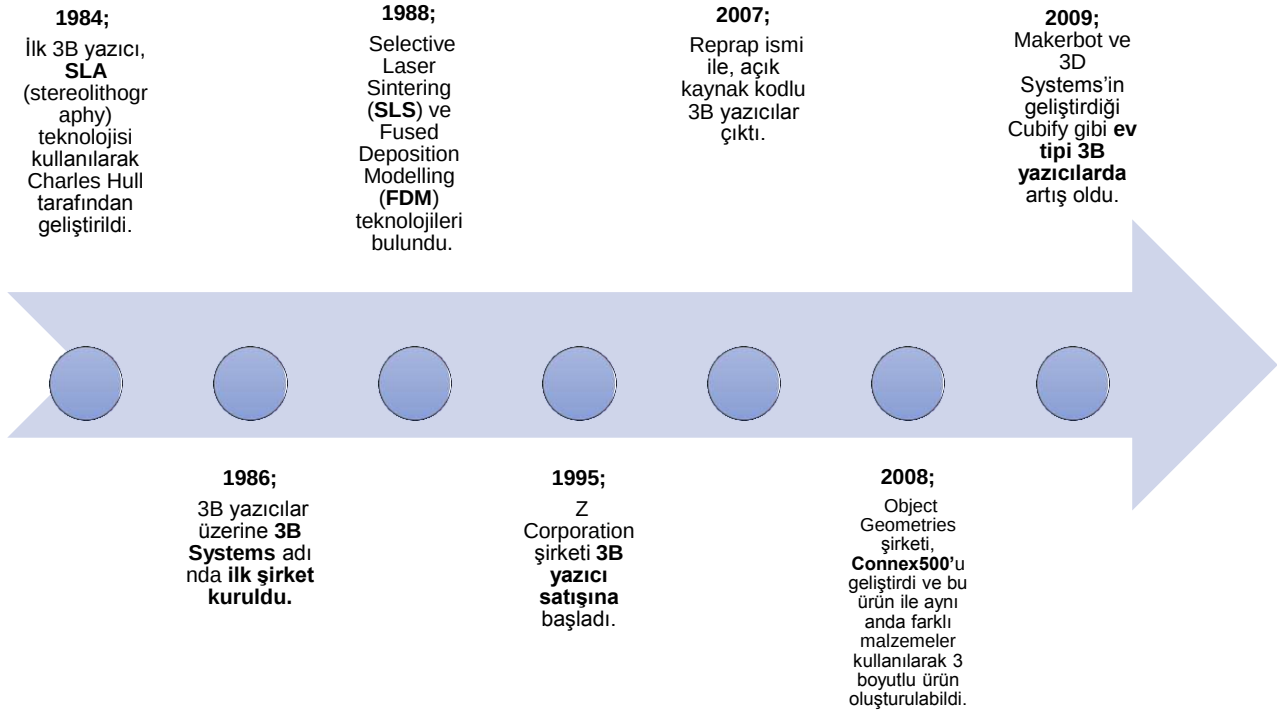
Geleceğin teknolojisi olarak görülen 3 boyutlu yazıcılar istenilen ürünü bilgisayar ortamında modelleyerek, kısa bir süre içinde elle tutulabilir somut nesnelere dönüştüren makinelerdir. Bu makineler tıp alanında, otomotiv sektöründe, günlük kullandığımız ev eşyalarında kısa sürede tasarım sağlanmasıyla yenilik yönü de hız kazanmaktadır.



Şekil 1. Seramiğin kullanım alanları[3]

2. ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR

Üç boyutlu yazıcılar için birçok farklı teknoloji kullanılmaktadır. Bunlar; SLA (Stereolithografi) Teknolojisi, SLS (Seçici lazer Sinterleme) Teknolojisi, Polyjet Teknolojisi, DMLS (Direct Metal Laser Sintering) Teknolojisi, FDM(Fused Deposition Modelin) teknolojisi olmak üzere en çok kullanılan 3D yazıcı teknolojileri arasındadır. Teknolojiler arasındaki farklılıklar genellikle katmanların nasıl oluşturulduğu ile alakalıdır [4].



FDM teknolojisinde kullanılan malzemeler ABS, PLA, PET, Nylon 3B filament, metal görünümlü 3B filament, Seramik 3B filament, Ahşap 3B filament Karanlıkta Parlayan 3B filament Karbon Fiber PLA, polikarbon ABS, UV duyarlı ABS'dir. SLS teknolojisinde kullanılan malzemeler ise; Poliamid, Cam katkılı Poliamid ve Metaldir. Son olarak Polyjet Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler; Dijital ABS, Fullcure 720, Vero clear, Tango, Endur'dur.



Şekil 2. SLA Teknolojisiile prototipleme [5]



Şekil 3. SLS Teknolojisi ile prototipleme[6]



Şekil 4. Polyjet Teknolojisi [7]



Şekil 5. DMLS Teknolojisi ile prototipleme[8]



Şekil 6. FDM teknolojisi [9]



Şekil 7. Üç boyutlu yazıcı [10]

3D yazıcıları birçok kullanım alanını bulunmasıyla beraber bunlar; Tıp alanı, kuyumculuk, havacılık, sanat, mimari, moda tasarımı, iç mimari ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarında etkin bir rol oynamakta olan üç boyutlu yazıcılar önemli ölçüde maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca kişiye ait ürünler üretilerek kişiselleştirmenin önemi artmaktadır. Bu sayede her geçen gün ürün inovasyonu hızlanarak artmaktadır.

2.1. ÜÇ BOYUTLU YAZICILARIN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANIMI

3 boyutlu yazıcıların otomotiv sektöründe test, tasarım, prototip ile yedek parçaların üretimi gibi çeşitli kullanım amaçları bulunmaktadır. Bunların yanında, özel bir proje kapsamında, Urbee isimli arabanın gövdesi tamamen 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir[11]. 3D yazıcılar ile otomobil parçaları üretilirken çoğunlukla "Stereo Lithography", "Fused Deposition Modelling" ve "Selective Laser Sintering" üretim teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklere ek olarak "Electron Beam Melting", "Inkjet" ve "Selective Laser Melting" gibi teknikler de tercih edilmektedir[12]. Bu parçaları yurtdışından temin etmek yerine ihtiyaç doğrultusunda yazdırma yöntemine gidilebilmektedir. Üç boyutlu yazıcılar ile elde edilmiş ürünün uygun maliyetleri sebebiyle tercih edilmekte ve kullanımı yaygınlaşmaktadır[13].

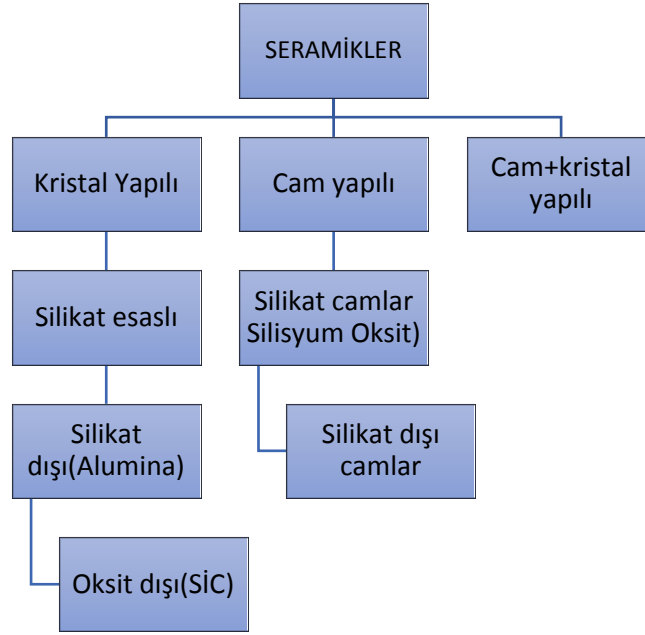


Şekil 8. Üç boyutlu yazıcıların otomotiv sektöründe kullanımı[14]

Sektörde süregelen rekabet ile ürün geliştirme süreçleri ivme kazanmaktadır. Firmaların ürün geliştirme departmanları maliyet açısından da önemli etmen olarak yer almakta olan 3D baskı hizmetinden faydalanmaktadır. Bu yöntem ile firmalar hem düşük maliyet avantajı hem de istenilen kalitede üretim yapıyor. 3 boyutlu prototipler sayesinde konsept tasarım beklentilerin üzerinde gerçekleştirilip ve pazara çıkma süreci hızlanmaktadır[15].

3. SERAMİK VE SERAMİĞİN KULLANIM ALANLARI

Seramik sözcüğü kil, toprak ya da pişirilmiş eşya anlamındaki latince "keramikos/keramos"tan gelmektedir. Seramikler, genellikle metal ve metal olmayan elementler ile birleşmesiyle ve sinterlenmesiyle oluşan inorganik bileşiklerdir. Seramiklerin en önemli özellikleri arasında yüksek sertlik, elektriksel ve ısı yalıtıcılık, Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık yer almaktadır. Gevrek ve kırılğan olmaları ise en büyük dezavantajıdır. Seramiklerin son yıllarda imalat teknolojilerinin ilerlemesi ile tasarım konusunda endüstride kullanımı oldukça artmaktadır. Ayrıca geliştirilen özel seramik ileri teknoloji seramikleri bilgisayar, otomotiv, elektronik, havacılık ve uzay endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadır[16]. Seramikler üç'e ayrılmaktadır[17].



Şekil 9. Seramiklerin Sınıflandırılması

3.1 SERAMİĞİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANIMI

Otomotiv sanayisinde yüksek mukavemetli, sünek, kolay biçimlendirilebilen, maliyeti düşük ve hafif malzemeler tercih edilmektedir. Bu sebepten kullanılan malzemeler; kompozit plastikler, , dökme demirler, seramikler, alüminyum ve alaşımlarıdır. Seramik malzemeler otomotiv motor parçalarında, su pompalarında, kaymalı yataklarda, türbinlerde ve ısı dönüştürücülerde kullanılmaktadır. Seramik malzemeden üretilen bu parçaların en önemli özelliği; yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi, korozyona karşı dirençli olmaları ve manyetik olmalarıdır[18].



Şekil10. Tam seramik rulmanlar [19]

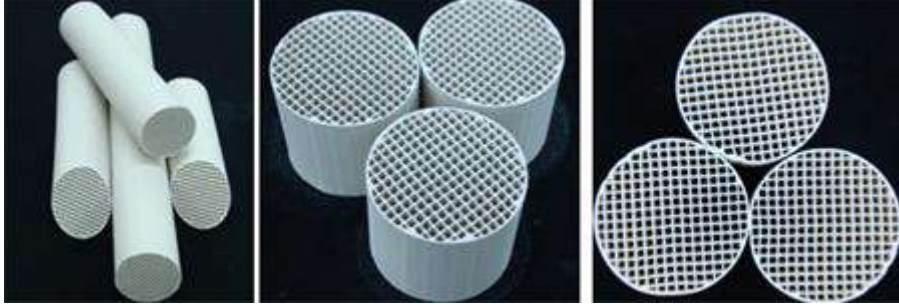


Şekil 11. Seramik malzemeden olan kaymalı yataklar[20]

Katalitik konvertörler, özel olarak tasarlanmış metal muhafaza içinde aktif katalitik malzeme içeren, susturucuya benzer şekilde tasarlanmış içinden egzoz gazı geçen parçalardır. görevi gereği manifold ile susturucu arasında konumlandırılmıştır. 1970'li yılların başında CO ve HC emisyonlarını kontrol etmek için kullanılan katalitik konvertörlere iki yollu katalitik konvertör denilmektedir daha sonra 1980'lerde NO_x emisyonlarını da kontrol edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarımlar sonucunda üç yollu konvertörler üretilmeye başlanmıştır. Böylelikle egzoz emisyonlarını en aza indirerek günümüzdeki en önemli toplumsal sorunlardan biri haline gelen çevre kirliliğinin azaltılmasında önemli bir yere sahiptir[21].

Katalitik konvertörlerde bal peteği şeklinde yer alan filtreler, yerli ve doğal oksit esaslı hammaddeler kullanılarak geliştirilmiş daha sonra ekstrüzyona şekillendirilip sinterlenmesiyle elde edilmiştir. Bu filtreler Yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılığını korumaktadır. Maksimum uygulama sıcaklığı ise 1200°C'dir[22]. Bal peteği filtreleri egzoz borusundan gelen zehirli emisyonları azaltan konvertörlerde kullanılır. Katalitik konvertör

seramik altlık ürününün; otomotiv egzoz katalist altlığı, dizel egzoz filtreleri ve enerji santrallerinde azot oksit giderme filtreleri olmak üzere 3 değişik alanda kullanımı mevcuttur. Bu kullanımların dışında döküm sanayinde sıvı metal filtrasyonunda da kullanılır. Bal peteği tasarımından kaynaklı düz kanalları sayesinde, erimiş metal ve seramik arasındaki yüzey alanını artırır, böylece az miktardaki safsızlıklar bile absorbe edilir[23].



Şekil12. Seramik filtreler[22]

4.SONUÇ

Gelişen teknolojiyle birlikte üç boyutlu yazıcıların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Mühendislik alanında kullanılarak, bilgisayar destekli tasarım ve hızlı prototipleme ile büyük avantajlar sağlanmaktadır. Yeni otomobil tasarımlarından yedek parçaya kadar pek çok alanda tasarım hızlanacaktır. Böylece inovasyonun ivmesi de hızlanacaktır[4]. Üç boyutlu yazıcılar ile üründe yapılabilecek olası bir hata, ürün henüz tasarım aşamasındayken fark edilip, düzeltilebilmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede ekonomik açıdan maliyet tasarrufu açısından kolaylık sağlayacaktır.

Cad/Cam programı ile üç boyutlu yazıcılar standart yazıcılardan üstün bir şekilde farklı malzemelerle üretilmektedir. Plastik, polikarbon, Seramik gibi malzemeler kullanılarak karmaşık ürünler elde edilebilmesi mümkündür. Böylelikle Dijital teknolojinin gelişimi ile birlikte ortaya çıkan yeni biçimlendirme teknikleri, sanatçılara ve tasarımcılara, kendilerini ifade etmede yeni olanaklar sağlamıştır. Seramik tozlarının Seçici Lazer Sinterleme tekniği ile üretilmeye başlaması, yüksek hassasiyet gerektiren endüstriyel malzemelerin yanında, sanatsal objelerin de üretilmesini sağlamıştır[24].

KAYNAKÇA

- [1] Özsezen A.N., Eyidoğan M., Türkcan A., Alptekin E., Şanlı A.,Çanakçı M., Kılıçaslan İ.,(2009) “Binek Tipi Bir Taşıtta Katalitik Konvertör Veriminin Deneysel Olarak İncelenmesi” Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi,1,1-7
- [2] Kelen F., (2014) “Motorlu Taşıt Emisyonlarının İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkileri” Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi/ Journal of The Institute of Natural & Applied Sciences 19 (1- 2),80-87
- [3] Dağışan Bulucu, E.(2016) “MBM Seramikler” Erciyes Üniversitesi Ders notları
- [4] Çetinkaya, K.,(2017) “Üç Boyutlu Yazıcı Dünyası”
- [5] Özel Sla 3D prototip. <https://turkish.alibaba.com/product-detail/custom-sla-3d-printing-artwork-prototype-oem-3d-printing-service-60496322628.html> 8Mart 2017 tarihinde erişildi.
- [6] Poligon Mühendislik. <http://www.poligonmuhendislik.com/bilgi-bankasi/3b-baski-teknolojileri/sls/> 8 Mart 2017tarihinde erişildi.
- [7] 3D Printing - PolyJet - Additive Technologies. <https://www.youtube.com/watch?v=D4Yq3glEyec> 8 Mart 2017tarihinde erişildi.
- [8] Poligon Mühendislik. <http://www.poligonmuhendislik.com/bilgi-bankasi/3b-baski-malzemeleri/dmls-malzemeler/> 8 Mart 2017 tarihinde erişildi.

- [9] What is FDM 3D printing?. <https://www.3dsupplyguys.com/3d-printing-education-center/what-is-fdm-3d-printing/8> Mart 2017 tarihinde erişildi.
- [10] ProX 100 Dental. <http://3dmast.com.tr/urunler/3d-yazici/prox-100-dental-3d-yazici/8> Mart 2017 tarihinde erişildi.
- [11] 3D Printing: What does it offer and for whom? . <http://minifab.com.tr/blog/3-boyutlu-yazicilarin-sanayide-kullanimi.html8> Mart 2017 tarihinde erişildi.
- [12] Boyacıoğlu, S., "Otomotiv Endüstrisi için 3D Yazıcılar": <http://www.kimyasalgelismeler.com/sektorler/muhendislik-tasarim-ve-dizayn/otomotiv-endustrisi-icin-3d-yazicilar.html8> Mart 2017 tarihinde erişildi.
- [13] Çetin, A., Üç boyutlu yazıcılar ve sanayideki kullanım alanları. <https://muhendishane.org/hakkinda/> 8 Mart 2017 tarihinde erişildi.
- [14] Gulac, C., 3B Yazıcıların Kullanıldığı Başlıca Sektörlerden Olan "Otomotiv"<https://forums.autodesk.com/t5/diger-urunler/3b-yazicilarin-kullanildigi-baslica-sektorlerden-olan-otomotiv/m-p/6021384#M341> 8 Mart 2017 tarihinde erişildi
- [15] 3d Yazıcı Ve Otomotiv Sektörü İlişkisi. <http://www.3dyazici3dbaski3dtarama.com/3d-baski-hizmeti-firmalar-ozel/3-boyutlu-yazici-ve-otomotiv-sektoru/8> Mart 2017 tarihinde erişildi
- [16] TOPLAN Ö. ,(2008) "Geleneksel Seramikler" Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Lisans Ders Notları
- [17] Alsaran, A. , Seramikler <http://akgunalsaran.com/doc/20-seramikler-1691.pdf> 8 Mart 2017 tarihinde erişildi
- [18] Rende, H., Hanyaloğlu, C. (2012). "Rulmanlarda ve Kaymalı Yataklarda Seramiklerin Kullanımı," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 633, s. 28-35
- [19] Cerobear Wälzlager-Firmenschrift der Firma CEROBear GmbH Kaiserstrasse 100, D-52134 Herzogenrath
- [20] Residur- das KSB Keramiklager KSB-Aktiengesellschaft, 67227 Frankenthal/Deutschland
- [21] Dinler N., Yücel N., (2003) "Karbüratörlü Bir Motora Üç Yollu Katalitik Konvertör Uygulanması" Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 18, No 1, 57-70,
- [22] Taşkın, A., "Kordiyerit esaslı bal peteği seramik filtre" <http://mam.tubitak.gov.tr/tr/icerik/kordiyerit-esasli-bal-petegi-seramik-filtre> 8 Mart 2017 tarihinde erişildi.
- [23] Kalemtaş, A., Topateş, G., Özey, N., Bilgiç, O., (2015) "Gözenekli Si₃N₄-SiC Kompozitler" <https://www.researchgate.net/publication/282120554>
- [24] Özgüven, S., (2015): "Seramik Sanatında Üç Boyutlu Yazıcıların Yeni Bir İfade Biçimi Olarak Kullanılması". idil 4.18 167-183.

ERGİYİK BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERİN EKLEMELİ İMALATI: İŞLEM PARAMETRELERİNİN ÇEKME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

H. Kürşad SEZER^a, Oğulcan EREN^b, H. Rıza BÖRKLÜ^a

a, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE, kursadsezer@gazi.edu.tr

b, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Müh.YL Öğrencisi, Ankara/TÜRKİYE, ogulcan.eren@gazi.edu.tr

ÖZET

Eklemeli İmalat ile geleneksel yöntemlere kıyasla kompleks formdaki 3B parçaların daha kolay, düşük maliyetli ve hızlı üretimi mümkündür. AM teknolojileri arasında en popüler ve ucuz yöntem Ergiyik Biriktirme Yöntemi'dir (Fused Deposition Modeling - FDM). Son yıllarda, bu teknoloji ile son kullanıma hazır parçaların doğrudan imalatına ilgi artmıştır. Ancak FDM baskılı parçaların düşük mekanik özellikleri, bu kapsamda yaygın biçimde uygulanmasını önleyen temel bir problemdir. Bu çalışmada, 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyeli akrilonitril-butadien-stiren (ABS) kompozit filamentlerin üretimi ve FDM 3B baskısının fizibilitesi ilk kez yayınlanmaktadır. Bu çalışma ile, 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyesi ile parça mukavemetinin önemli ölçüde iyileştirilebileceğine karşın; esneklik ve işlenebilirliğin artan takviye içeriği ile azaldığı bulguları not edilmiştir. Ayrıca yazdırma deseninin mekanik özelliklere etkisi de çalışma kapsamında incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hızlı prototipleme, 3B baskı, Kompozit filament, Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP)

ADDITIVE MANUFACTURING OF CARBON FİBER REİNFORCED PLASTİC COMPOSİTES BY FUSED DEPOSITİON MODELLİNG: EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON TENSİLE PROPERTİES

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) allows easy, cost effective and rapid manufacture of complex shaped 3D shapes as compared to conventional methods. Among the AM technologies, the most popular and inexpensive method is Fused Deposition Modelling (FDM). Recently there is growing interest in direct manufacturing of final ready for use parts using this technology. However mechanical properties of the FDM printed parts are the main constraint preventing the widespred application of FDM printed parts. This paper, for the first time, investigates feasibility of manufacturing and FDM 3D printing of 6 mm long carbon fibre reinforced acrylonitrile-butadiene-styrene composite filaments with enhanced mechanical properties. The part strength is shown to be significantly improved with 6 mm long carbon fibre reinforcement with the flexibility and processability of the fibres is diminishing with increasing reinforcement content. The effect of the raster pattern on the mechanical properties was also studied.

Keywords: Rapid prototyping, 3D printing, Composite filament, Carbon fiber reinforced polymer (CFRP)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat (Eİ) geleneksel imalat yöntemlerine göre daha kolay, hızlı ve ucuz bir şekilde gerçek parça ve/veya bunlara ait modelleri oluşturabilmektedir [1-3]. Basit bir küp ya da silindir aynı hacimdeki karmaşık anatomik yapıların üretimiyle aynı zaman ve zahmetle yapılabilir. Başlangıçta basit model yapma olarak başlayan bu teknoloji, malzeme, hassasiyet ve parça kalitesinde iyileştirmeler ile modellerin 3F (Form, Fit, Function) özellikleri bilgisini verebilir hale gelmiştir. Bu teknolojinin ürün geliştirme ve imalatla devrim olduğu ve hatta son kapasitesine ulaştığında bildiğimiz şekliyle imalatın artık ortadan kalkacağı öngörülmekte, yani endüstriyel devrim yaşandığı bazı çevrelerce kabul edilmektedir. Eklemeli İmalata son yıllarda verilen bu denli önemle birlikte başta uzay [4], otomotiv [5], medikal [6-7] olmak üzere mimari [8], eğitim [9] ve tekstil [10] vb. gibi birçok alanda kullanımı hızla artmaktadır.

Birçok farklı eklemeli imalat yöntemleri arasında; polimer filamentinin yarı eriyik halde biriktirildiği FDM (Fused deposition modelling) [11], foto-polimer reçinenin katılaştırıldığı SLA (Stereolithography Apparatus) [12], metal tozlarının sinterlendiği SLS (Selective Laser Sintering) [13] ve kağıt/plastik/metal tabakaların bağlandığı LOM (Laminated object manufacturing) [14] bulunmaktadır. Bunlardan mühendislik plastik malzemeleri

kullanan en düşük maliyetli, minimum atık ve çok malzeme çeşidi içeren FDM'dir [15-16]. Bu teknolojinin bilimsel temeli yüksek viskoziteli malzemelerin bir nozuldaki ekstrüzyonuna dayanır. Geleneksel polimer ekstrüzyonuna benzer şekilde (farkı ekstrüzyon kafası dikey ve hareketlidir) polimer filament ısıtılmış ekstrüzyon nozulundan kontrollü olarak geçirilip yarı katı hale getirilir ve ekstrüzyon kafasının sabit hızda hareketiyle üniform çizgisel yollar halinde aynı formunu koruyarak katılaşır. Bu çizgisel yollarının yüzeyleri arasında ekstrüzyon kafasında yüklenen artık ısı enerjisinin aktivasyonu ile yan yana ve üst üste yapışma gerçekleşir ve katmanlar halinde sürekli biriktirilerek 3D geometri elde edilir. Katman kalınlıkları, arzu edilen geometrik hassasiyet ve ekstrüzyon nozul çapına göre belirlenir (genelde nozul çapının %60-70'i kadar). Chakraborty vd., (ve diğerleri) kavisli yol izleyerek katmanlar arası iz ve katman sayısını azaltan, dayanımı yükselten yeni bir teknikten de bahsetmişlerdir [17]. FDM teknolojisinde en iyi netice veren polimer, viskoz macun formunda ekstrüde edilen polimerlerdir. Bu yüzden FDM teknolojisi ile çalışan 3B baskı makinelerinin kullandığı malzemeler genel olarak; amorf yapıdaki polimerlerdir. Amorf polimerlerin belirgin bir erime sıcaklığı yoktur, artan sıcaklıkla giderek yumuşaklık gösterir ve viskoziteleri düşer. Basınçla ekstrüde edilebildikleri sıcaklıkta viskoziteleri yüksektir ve ekstrüzyon sonrasında formlarını koruyarak hızlıca katılaşır. Ayrıca yollar yan yana eklendiğinde yada yeni bir katman olarak eklendiğinde birbirine kolayca yapışır.

Plastik enjeksiyon sektöründe çok kullanılan, petrol ürünü, ağırlıkça hafif ve sert bir malzeme olan ABS (Akrilonitril bütadien stiren) en çok kullanılan malzemedir. Bunun yanında nispeten daha düşük dayanımlı ancak nişasta esaslı olduğundan sağlık, güvenlik açısından daha uygun ve medikal uygulamalarda tercih edilebilecek PLA'da (Polilaktik asit) yaygın FDM malzemeleri arasındadır. Mekanik dayanımı oldukça iyi olan PC (Polikarbonat), ve thermo-mekanik özellikler iyileştirilmiş, PC mukavemeti ile ABS esnekliğini içeren karışımlarda FDM teknolojisinde kullanılabilmektedir [18-19]. Ayrıca yüksek mukavemeti ve hafifliği nedeniyle havacılıkta ve otomotivde tercih edilen ULTEM 9085 ve ısıl eğilmeye dayanıklı (189 dereceye kadar) PPSF (polifenilsülfon) özel uygulamalarda kullanılmaktadır.

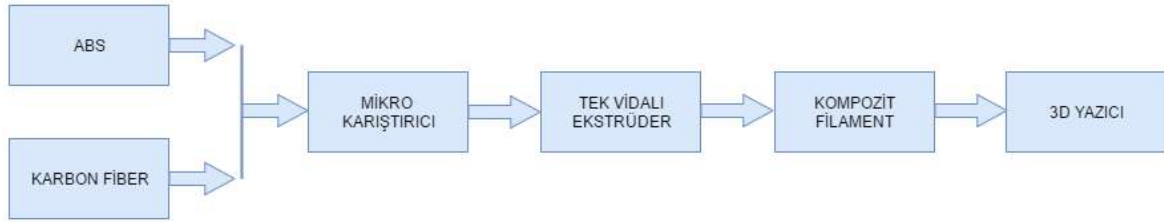
Standart ABS kullanılarak üretilen FDM baskılı parçaların düşük mekanik özellikleri, bu teknolojinin diğer avantajlarına rağmen son kullanıma hazır parçaların doğrudan imalatına yönelik yaygın biçimde uygulanmasını önleyen temel bir problemdir. FDM ile oluşturulan parça dayanımını arttırmak için polimer malzeme içine karbon fiber vb. malzemeler eklenerek polimer kompozitler oluşturulabildiği literatürdeki çalışmalardan anlaşılmaktadır [20-21]. Ancak bu alanda az sayıda açık literatür bilgisi mevcuttur. Zhong vd., FDM malzemesi olarak kullanılmak üzere kısa fiber-glass takviyeli ABS (GFABS) polimer kullanmıştır [31]. Bu birleşim, kırılma nedeniyle filament haline getirilememiştir. Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) katkısının daha iyi esneklik ve süneklik sağladığı görülmüştür. LLDPE ve ABS matris arasındaki faz ayrımından dolayı ABS ve LLDPE molekül zincirleri arasındaki bağlantıyı güçlendirecek dengeleyici madde eklenmiştir. Böylece ağırlık oranı %18 fiber-glass olan mekanik dayanımı ~48% güçlendirilmiş filament elde edilmiştir. Daha fazla fiber-glass eklenmesi ile doğrusal yükleme açısından yüksek gerilme direnci sağlanmıştır. Buna karşın fiber-glass eklemek, saf ABS ile karşılaştırılırsa, katmanlar arasındaki yapışma kuvvetini zayıflatmıştır. Bazı araştırmalar ise bitişik katmanlar arasındaki bağ düzenine fiber etkisini ele almıştır [31]. Tekinalp vd., kısa fiber (0.2-0.4 mm) ile takviye edilmiş ABS matrisi işlenebilirlik, mikroyapı ve mekanik performans açısından araştırmış ve geleneksel basınç kalıplama (CM) ile üretilmiş bir kompozit ile karşılaştırmışlardır. 3B yazıcı ile üretilen numunelerin çekme dayanımı %115 ve modülü ise %700 dolayında artmıştır. 3B yazıcı, baskı doğrultusunda yüksek fiber yönelimine (%91.5 civarı) sahip numune üretmiştir. Buna karşın basınç kalıplama ile üretilen numune çok düşük fiber yönelimine sahiptir. Mikroyapısal mekanik özellikler ilişkilendirildiğinde ise 3B yazıcı ile üretilen numune basınç kalıplama ile üretilene göre büyük gözenekli yapıya sahiptir. Her ikisi de benzer çekme mukavemeti ve modülü göstermektedir. Bu olgu fiber yönlendirilmesi, dağılımı ve gözenek biçimine göre açıklanabilir [20]. Ning vd., ABS matris içerisine farklı boyutlarda kısa karbon fiber takviye edilerek mekanik özelliklerini arttırdıkları filamentli FDM 3B baskı makinesinde kullanmışlardır [32].

Açık literatürdeki çalışmalarda kullanılan katkı malzemesi olarak toz formunda ya da kısa (> 3 mm) fiber güçlendirme malzemesi kullanılmış ve sınırlı derecede mekanik dayanım artışı sağlandığı görülmüştür. Bu çalışmada ilk kez 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyeli akrilonitril-butadien-stiren (ABS) kompozit filamentlerin üretimi ve FDM 3B baskısının fizibilitesi çalışılmıştır. Artan karbon fiber boyu ile mekanik dayanımda ve diğer çekme özelliklerinde daha fazla iyileştirme sağlanabileceği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada farklı karbon fiber takviye oranlarında (%5, %10, %15, %20, %30) kompozit filament üretilerek FDM 3B yazıcı ile kompozit numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan çekme testi numunelerinin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca yazdırma açısının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Yazdırma açısı, tablanın x eksenine göre yazdırma deseninin yönünü belirtir. Bu çalışmada [0, 90] ve [-45, 45] olmak üzere iki yazdırma açısı kullanılmıştır. Örneğin [-45, 45] açısı, Şekil 2 (b) 'da gösterildiği gibi, farklı katmanlar için yazdırma yönlerinin sırayla -45° ve 45° olduğu anlamına gelmektedir. Çalışmada ayrıca kısa karbon fiber takviyeli filamentin mikro yapısı incelenerek fiber miktarının poroziteye, karbon fiber uzunluğuna ve karbon fiber yönlendirilmesine etkisi incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METOD)

Çalışmada kompozit filament elde etmek için ABS granül (performance ABS, Oo-Kuma) matris malzeme, kısa karbon fiber (6 mm epoksi bazlı 1101, DowAksa) takviye malzeme olarak kullanılmıştır. Bir çift vidalı mikro karıştırıcı (DSM Xplore) malzemeleri homojen olarak karıştırmak için kullanılmıştır. Çift vidalı karıştırıcı, ABS matris malzemesini yarı eriyik hale getirip, karbon fiber takviye malzemesini matris içinde homojen karıştırarak ekstrüzyon sağlar. Ayrıca elde edilen homojen karışımı FDM 3B yazıcıda kullanılmak üzere uygun boyuttaki filament haline getirmek için tek vidalı masaüstü filament ekstrüder (Wellzoom C) kullanılmıştır. Kompozit filament, birçok farklı malzemeyi kullanarak üretim yapabilen bir FDM 3B yazıcıda (3Dison Pro) kullanarak kompozit ASTM 412 A standartlarına sahip çekme testi numuneleri üretilmiştir. Üretilen kompozit numuneler bakalit içerisine alınarak yüzey parlatma işleminden sonra optik mikroskop (Leica DMI5000M) yardımıyla incelenmiştir. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot Şekil 1’de gösterilmiştir.



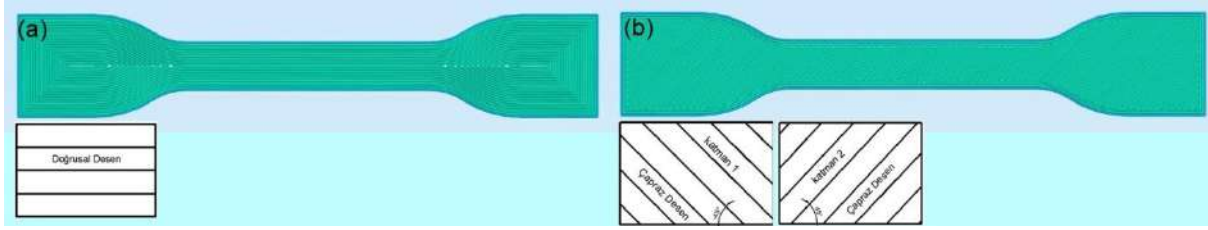
Şekil 1. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot (The method used in composite filament fabrication)

Granül halinde bulunan ABS, karbon fiber ile Çizelge 1’de gösterilen oranlarda 220 °C sıcaklıkta 100 rpm’de 5 dakika boyunca mikro karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Mikro karıştırıcı küçük karıştırma haznesine (15cc) sahip olduğundan Çizelge 1’de ki oranlara sahip karışımlar birkaç defa üretilmiştir. Malzemeler mikro karıştırıcı ile homojen karıştırılarak, granül halden filament haline gelen filamentler istenilen filament çapına sahip olmadıkları için masaüstü tek vidalı ekstrüder kullanılarak tekrar işleminden geçirilmiş ve 1.75 mm çaplı filamanet haline getirilmiştir. Filament ekstrüzyonunda ekstrüderin ön ısıtıcı ve çıkış sıcaklıkları ile ekstrüzyon hızı, filament kalitesi ve çapını önemli oranda etkilemektedir. Özellikle sıcaklık filamentin yüzey kalitesini ve filament içerisindeki gözenek oranını etkilemektedir. Çalışma kapsamında masaüstü ekstrüderin ön ısıtıcı ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 225 °C ve 235 °C olarak optimize edilmiştir. Ekstrüzyon hızı ise 2200-2400 mm/dk olarak optimize edilmiştir.

Çizelge 1. Üretilen filament numunelerinin malzeme içerikleri (The material contents of the sample filament)

Numune no	Karbon fiber (g)	ABS (g)	Karbon fiber oranı
1	0,75	14,25	%5
2	1,5	13,5	%10
3	2,25	12,75	%15
4	3	12	%20
5	4.5	10,5	%30

Elde edilen filament FDM 3B yazıcıda (3Dison Pro) kullanılarak her bir oran için 4 adet ASTM D412 A standartlarında çekme testi numunesi yazdırılmıştır. Yazdırma işlemi sırasında nozul sıcaklığı 245 °C ve platform sıcaklığı 110 °C olarak ayarlanmıştır. Yazdırma işleminde 0.60 mm çapa sahip nozul ile 0.30 mm kalınlığında %100 doluluk oranına sahip katmanlar oluşturulmuştur. Yazdırma yönü, çekme kuvvetinin uygulanacağı yöne paralel [0, 90] veya 45° açılı [-45, 45] olarak belirlenmiştir. Şekil 2’de ASTM D412 A standartlarında ki farklı yazdırma yönüne sahip çekme testi numunesinin .stl dosya formatındaki modeli görülmektedir.



Şekil 2. Çekme testi numunesinin yazdırma önizlemesi (a) doğrusal [0, 90] (b) çapraz [-45, 45] (Printing preview of [tensile test specimen](#) (a) linear raster [0, 90] (b) transverse raster [-45, 45])

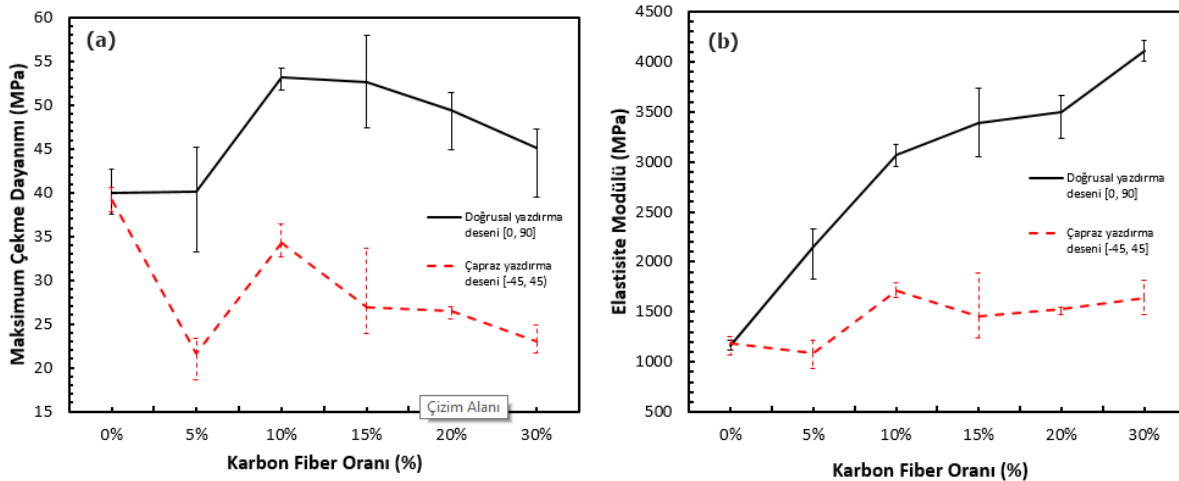
Kompozit filamentlerin 3B yazıcıda yazdırılmasıyla elde edilen çekme testi numuneleri çekme testi cihazı (Instron 5965) ile 2 mm/dk hızında çekilerek mekanik özellikleri saptanmıştır. Bakalit içerisine alınıp parlatılan filament ve numune kesitleri optik mikroskop yardımıyla incelenerek kompozit karışımında ki fiber yönlendirilmesi, fiber boyutu ve porozite oluşumu incelenmiştir.

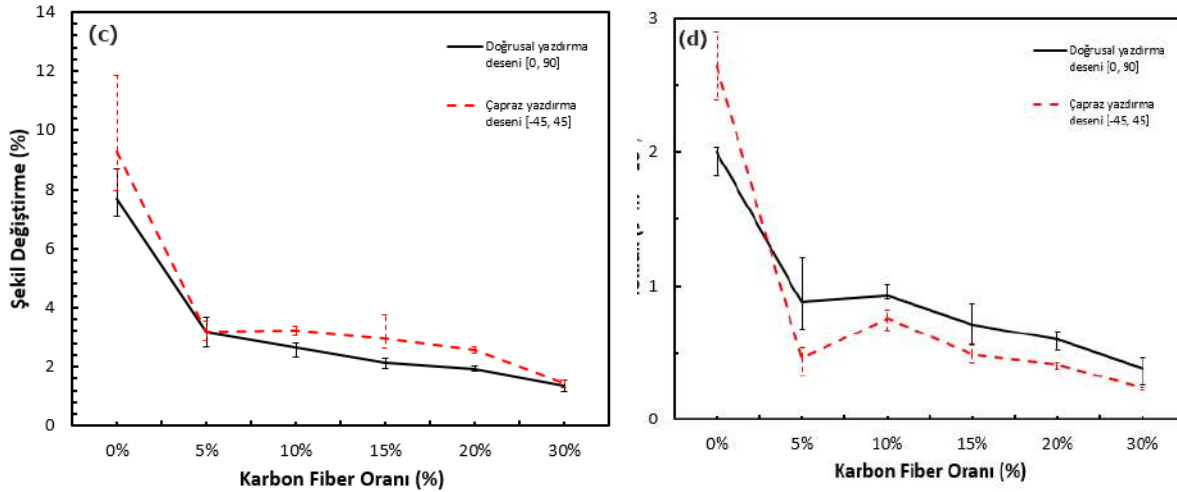
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Sonuçlar ekstrüzyon sıcaklık ve hızının filament kalitesinde önemli rol oynadığını göstermiştir. ABS, 250 °C'de derecede bozulmaya başlamaktadır. 200 °C altı sıcaklıklarda ise yarı eriyik özellikte olmadığı için ekstrüzyon zorlaşmaktadır. Bu durum pürüzlü yüzey oluşmasına yol açmaktadır. Diğer taraftan kompozit filament ekstrüzyon işlemi hassas bir biçimde yapılmalıdır. Aksi takdirde filament çapında dalgalanmalar görülmektedir. Bu dalgalanmalar parça içinde poroziteye neden olur ve mekanik özellikleri azaltır. Filament çekme hızı, ekstrüzyon hızına göre ayarlanabilen bir sarıcı makara yardımıyla belirlenebilir. Karbon fiber katkısı, malzemenin çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve süneklik gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Karbon fiber miktarının artması çekme dayanımını genel olarak artırmaktadır [20,22-27,30-33]. Fakat daha çok karbon fiber eklenmesi her zaman daha iyi sonuçlar verecek anlamına gelmemektedir. Farklı karbon fiber özelliklerine göre belirli miktarın üzerindeki karışımlarda çekme dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Çünkü artan fiber oranıyla fiber-ABS ara yüzeyleri arasında ki boşluklar sıklaşır. Bu çok gözenekli yapı dayanımın düşmesine neden olur. Ayrıca fiber-fiber etkileşiminden dolayı kırılmalar meydana gelmektedir. Karbon fiber boyu ise dayanımı etkileyen önemli parametrelerden biridir.

3.1. Karbon Fiber Takviyesinin Mekanik Özelliklere Etkisi (Effects of Carbon Fiber Content on Mechanical Properties)

6 mm uzunluğunda poliüretan bazlı kısa karbon fiberler, ticari ABS içerisine %5, %10, %15 %20 ve %30 oranlarında takviye edilmiştir. Kompozit filamentler ile ASTM D412 A standartlarında çekme testi numuneleri 3B yazıcıda üretilmiştir. Deneylerde her numuneden 4 adet üretilip çekme testleri yapılarak mekanik özellikleri saptanmıştır. Farklı karbon oranları malzeme mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve süneklik) önemli ölçüde etkilemektedir. Farklı oranlarda fiber takviyesi içeren kompozit numunelerin yazdırma yönlerine bağlı mekanik özellikleri Şekil 3'de verilmiştir.





Şekil 3. Farklı karbon fiber oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin mekanik özellikleri (a) Maksimum çekme dayanımı, (b) Elastisite modülü, (b) Şekil değiştirme, (d) Tokluk (Tensile stress strain curves for specimens with different carbon fiber contents)

3.1.1. Çekme dayanımına etkisi (Effects on tensile strength)

Şekil 3 (a)'da görüldüğü üzere, doğrusal yazdırmada [0, 90] %5 karbon takviyesi çekme dayanımı arttıracak kritik takviye oranına ulaşamamıştır. Bu durum karbon fiber takviyesinin matris içerisinde oluşturduğu gözenekli yapının parçanın dayanımını düşürdüğü ve karbon fiber miktarının bu düşen dayanımı arttırabilecek kritik değerin altında olması olarak açıklanabilir. %10 karbon fiber takviye oranında çekme dayanımında yaklaşık %33'lük bir artış meydana gelirken bu takviye oranının üzerindeki değerlerde dayanım yavaşça azalmaya başlamıştır. Bu duruma artan fiber oranının fiber-fiber etkileşimini yani fiber kırılmasını arttırması gösterilebilir. Fiber boyu mekanik özelliklerin sağlanmasında önemli faktörlerden biridir. Ayrıca artan fiber oranı matris-takviye malzeme fazı arasındaki boşlukları arttırarak çekme dayanımının bir miktar daha azalmasına neden olmaktadır. En yüksek dayanım ortalama 53,20 MPa ile %10 kısa karbon fiber içeren numunede gözlemlenirken; en düşük dayanım 40,02 MPa ile ticari ABS'de gözlemlenmiştir. Çapraz yazdırmada [-45, 45] ise çekme dayanımı ticari ABS için neredeyse aynı kalırken karbon fiber eklenmesi ile azalmaya başlamıştır (Şekil 3(a)). Ticari ABS katmanlar arası ve katmanlar içinde birbirlerine daha sıkı tutunurken karbon fiber takviyesi ile bu bağlar zayıflamaktadır. Matris içerisinde karbon fiberlerin yönlendirilmesi ise mekanik özellikleri önemli derecede etkilemektedir. Karbon fiberlerin çekme yönüne paralel (doğrusal [0, 90]) yönlendirilmesi ile 45° açı ile (çapraz [-45, 45]) yönlendirilmesi kıyaslandığında; doğrusal yönlendirilmiş numunelerin çekme dayanımlarının ortalama %81.75 daha fazla olduğu görülmektedir. Çapraz yazdırmada en yüksek dayanım ortalama 39,16 MPa ile ticari ABS'de görülürken en düşük dayanım 21,57 MPa ile %5 karbon fiber içeren numunede görülmüştür.

3.1.2. Elastisite modülüne etkisi (Effects on Young's modulus)

Elastisite (Young) modülü, özünde, bir miktar elastik gerinim yaratabilmek için malzemeye uygulanması gereken gerilim miktarını ifade eder. Dolayısıyla, bu sabit malzemenin elastik esnemeye karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Bir malzemenin yüksek bir elastisite modülüne sahip olması, elastik olarak esnemesinin zor olduğunu, düşük bir değere sahip olması da nispeten kolayca, elastik biçimde esneyebileceğini gösteriyor. Yani Young modülü malzemene katılığının bir ölçüsüdür. Malzeme katılığı malzemenin uygulanan kuvvet karşısında deformasyona gösterdiği dirençtir

Şekil 3 (b)'de görüldüğü üzere, elastisite modülü her iki yazdırma deseni için karbon fiber miktarı arttıkça önemli derecede artmaktadır. Doğrusal yazdırmada [0, 90] elastisite modülü ticari ABS için ortalama 1161,98 MPa iken %5 karbon fiber takviyesinde %85 oranında artarak 2149,98 MPa olarak görülmektedir. %30 karbon fiber takviye oranında ise elastisite modülü ticari ABS'ye göre %254 artarak 4113,22 MPa olmuştur. Elastisite modülündeki bu büyük artış karbon fiber takviyesi ile malzemenin katılığının önemli derecede arttığını göstermektedir.

Çapraz yazdırmada [-45, 45] ise elastisite modülü ticari ABS'ye göre kayda değer bir artış göstermemiştir. Ticari ABS için elastisite modülü ortalama 1183,92 MPa iken %30 karbon fiber içeren numunede elastisite modülü %35,5 artışla ortalama 1640,47 MPa olarak ölçülmüştür.

3.1.3. Sünekliğe etkisi (Effects on ductility)

Süneklik; malzemenin kopmadan önce ne kadar deforme olabileceğinin bir ölçüsüdür. Çekme testinde ki düşük süneklik kırılmaya karşı düşük direncin göstergesidir. Gevrek malzemeler uzama oranında kayda değer bir belirti olmaksızın kırılmanın ortaya çıkması ile karakterize edilirler. Bu yüzden gevrek malzemelerin kopma mukavemetleri ile akma mukavemetleri arasında ki fark oldukça küçüktür. Aynı zamanda kopma anında ki şekil değiştirme sünek malzemelere göre oldukça düşüktür.

Numunelerin şekil değiştirme grafiği (Şekil 3(c)) incelendiğinde doğrusal yazdırmada [0, 90] en fazla yüzde uzama ortalama %7,66 ile ticari ABS'de görülmektedir. Karbon fiber takviye oranı arttıkça malzemenin birim şekil değiştirmesi önemli derecede azalmaktadır. %30 karbon fiber katkılı numune için yüzde uzama ortalama %1,37 (ticari ABS'ye göre %460 oranında bir düşüş) olarak ölçülmüştür. Sünek ABS matris içerisine karbon fiber takviyesi kompozit malzemenin gevrek özellik göstermesine neden olmuştur. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde genel olarak boyun verme ve pekleşme görülmemektedir.

Çapraz yazdırmada [-45, 45] ise en fazla yüzde uzama ortalama %7,66 ile ticari ABS'de görülürken en düşük yüzde uzama ortalama %1,44 ile %30 karbon fiber katkılı numunede görülmektedir (Şekil 3(c)). Çapraz yazdırma doğrusal yazdırma ile kıyaslandığında şekil değiştirme oranlarının daha fazla (ortalama %20) olduğu görülmektedir. Bu durumda doğrusal yazdırma daha yüksek çekme dayanımına sahip kompozit malzemeler elde ederken çapraz yazdırmada daha sünek kompozit malzemeler elde edilmiştir.

3.1.4. Tokluğa etkisi (Effects on toughness)

Tokluk, bir malzemenin enerjiyi emme kabiliyeti ve kırılma olmaksızın plastik olarak deforme olabilme kabiliyetidir. Bir tokluğunun bir diğer tanımı ise malzemenin kopmadan önce emebileceği birim hacim başına enerji miktarıdır. Aynı zamanda malzemeye gerilim uygulandığında kırılmaya karşı gösterdiği dayanım olarak da tanımlanabilir.

Şekil 3 (d)'de görüldüğü üzere, tokluk her iki yazdırma deseni için karbon fiber takviye oranı arttıkça azalmaktadır. %5 karbon fiber takviyesinde dahi tokluk ortalama 3 kat azalmıştır. Doğrusal yazdırmada [0, 90] tokluk ABS için ortalama $2,00 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ iken %30 karbon fiber içeren numunede 6 kat azalarak $0,38 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ olmuştur. Çapraz yazdırmada [-45, 45] ise ticari ABS için $2,65 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ değerinde olan tokluk %30 karbon fiber içeren kompozit numune için 10 kat azalarak $0,23 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ 'dir.

Çapraz yazdırmada ki kompozit numunelerin tokluk değerleri doğrusal yazdırmadakine nazaran ortalama %9 daha düşüktür. Bunun sebebi tokluğun malzemenin çekme dayanımı ve sünekliğine bağlı bir fonksiyon olmasıdır. Yani malzemenin tok olabilmesi için hem yüksek dayanımlı hem de sünek olması gerekmektedir. Çapraz yazdırma ki kompozit numuneleri genel olarak daha sünek olmasına karşın dayanımları doğrusal yazdırmaya kıyasla oldukça düşüktür.

3.2. Karbon Fiber Takviyesinin Poroziteye Etkisi (Effects of Carbon Fiber Content on Porosity)

Kısa karbon fiber katlı ABS filamentlerde gözenekli yapı görülmektedir. Bu gözenekler genel olarak şu sebeplerden kaynaklanır.

- Filament üretimi ve yazdırma işleminde ki ekstrüzyon sırasında iç bölgelerde gaz sıkışması;
- Katmanlar arasında ki fiziksel boşluklar;
- Matris ile takviye edici yüzeyleri arasında ki faz ayrımından oluşan boşluklar

Numunelerinin gözenek miktarının tespit edilebilmesi için aşağıda ki formül kullanılabilir [32].

$$P = \frac{V_t - V_a}{V_t} \quad (1)$$

Denklem 1'de P toplam gözenek oranı, V_t numunenin teorik hacmi ve V_a numunenin gerçek hacimdir. CAD ortamında tasarlanan numunenin hacmi 2.55 cm^3 'dür. Fakat FDM yazdırma işleminde parça bir miktar büzülmeğe uğrayabilir.

Numunenin gerçek hacmi ise Denklem 2 ile belirlenebilir [32].

$$V_a = \frac{M \times \%ABS}{\rho_{ABS}} + \frac{M \times \%CF}{\rho_{CF}} \quad (2)$$

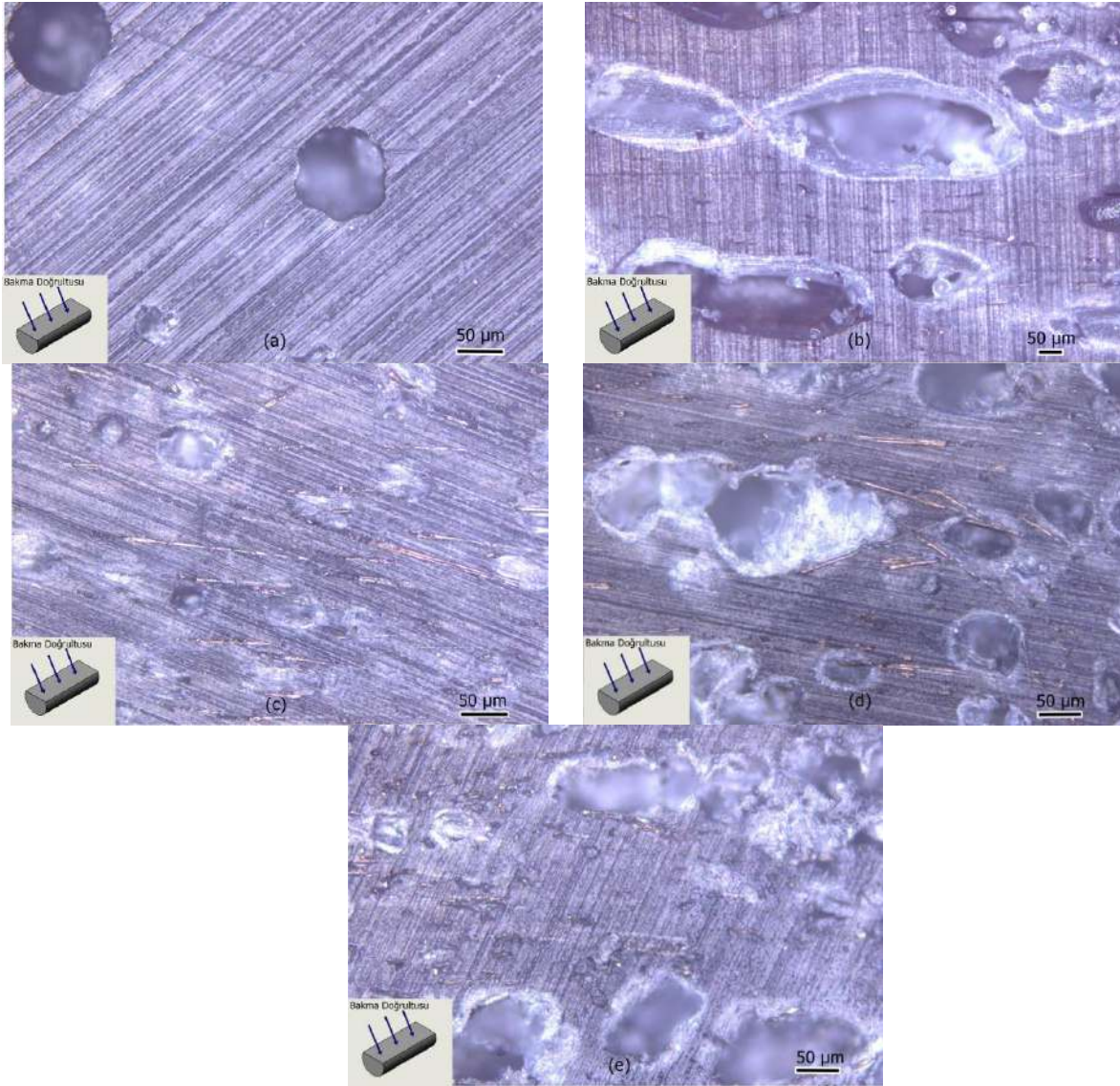
M: numunenin gerçek ağırlığı

ρ_{ABS} : ABS'nin öz kütlesi (1,05 g/cm³)

ρ_{CF} : Karbon fiberin öz kütlesi (1,76 g/cm³)

%20 karbon fiber içeren numune için teorik olarak %30 hesaplanan porozite oranı yazdırma işlemi sırasında katman arasında oluşan üçgensel bölgeler nedeniyle güvenilir değildir.

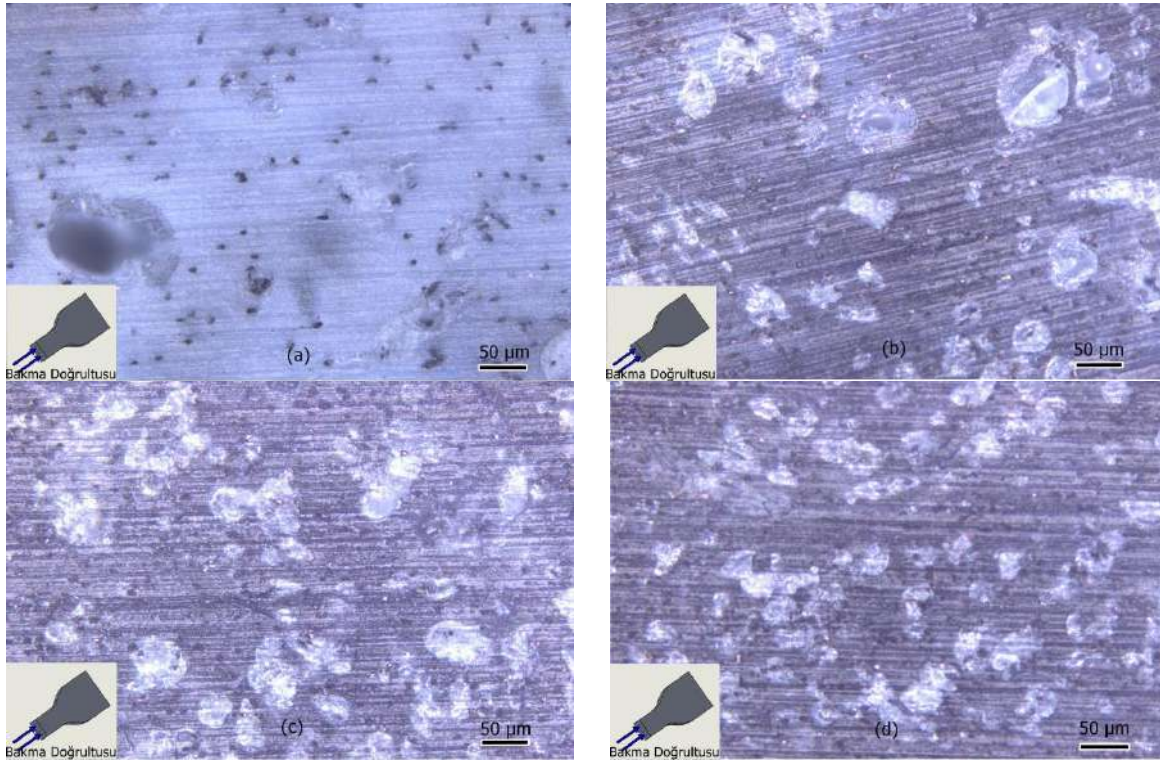
Çekme testi numunesi ve kompozit filament kesitinin bakalit içerisine alınarak parlatıldıktan sonra incelenilen optik mikroskop görüntüleri Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Farklı oranlarda kısa karbon fiber içeren kompozit filamentlerin mikro yapıları. (a) Ticari ABS, (b) %5 KF, (c) %10 KF, (d) %15 KF, (e) %20 KF (The microstructure of the composite filament containing short carbon fibers at different rates (a) Commercial ABS, (b) 5% CF, (c) 10% CF, (d) 15% CF, (e) 20% CF)

Şekillerde karbon liflerinin homojen olarak dağıldığı ve ekstrüzyon yönüne paralel biçimde konumlandığı görülmektedir. Bu durum ekstrüzyon yönündeki dayanımı önemli ölçüde arttırmaktadır. Fiber katkılı numunelerde homojenliği sağlamak adına yapılan karıştırma işlemi sırasında fiber kırılmaları meydana gelmektedir. Bu kırılmalar fiber oranının artması ile daha sık görülür. Artan karbon fiber miktarı daha çok fiber-fiber mekanik kırılmalarına sebebiyet vererek fiber boylarının küçülmesine neden olmuştur. Başlangıçta 6 mm uzunluğunda olan kısa karbon fiberler; %5 kısa karbon fiber içeren kompozit filament kesitinde 200-400 µm uzunlu-

ğunda iken (Şekil 4 (b)), %20 kısa karbon fiber içeren kompozit filament kesitinde 25 ile 150 μm arasında değişmektedir (Şekil 4 (e)). Fiber boyu ile mekanik özellikleri doğru orantılıdır. Fiber boyunun küçük ve oranının yüksek olması; küçük çaplı ve yoğun porozite oluşumuna neden olmaktadır. ABS ile üretilen çekme testi numunesi ve filament kesitine bakıldığında porozitenin büyük çapta ve az sayıda olduğu görülür (Şekil 4 (a)). Ticari ABS'de ortaya çıkan gözenekli yapıya yazdırma işlemi sırasında gazların oluşturduğu boşluklar sebep olmaktadır. Kısa karbon fiber eklentisi ile genel olarak porozite çapını azaltmakla birlikte porozite miktarı artmaktadır Şekil 4 (b-e). Ticari ABS'de ki porozite çapı ortalama 100 μm iken ağırlıkça %20 kısa karbon fiber içeren filamentte porozite çapı küçülerek 50 μm seviyelerine inmiştir. Sadece %5 karbon fiber içeren filamentte eliptik poroziteler yaklaşık 400 μm uzunluğunda ve 200 μm yüksekliğinde ölçülmüştür. Porozite özellikle fiber sınırlarında oluşmaktadır. Bu durum fiber takviyesi ile matris yüzeyleri arasındaki faz ayrımından kaynaklanır. Böylece kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin ticari ABS'ye göre artmasına rağmen daha yüksek seviyelere çıkamaması durumunu porozite oluşumu ve fiber boyları ile açıklanabilir. Çekme testine tabi tutulan numunelerin kesitlerine bakıldığında ise kompozit filament kesitlerinde söz edilen porozite özellikleri görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Farklı oranlarda kısa karbon fiber içeren çekme testi numunelerinin mikro yapıları. (a) %5 KF, (b) %10 KF, (c) %15 KF, (d) %20 KF (The microstructure of the [tensile test specimen](#) containing short carbon fibers at different rates (a) Commercial ABS, (b) 5% CF, (c) 10% CF, (d) 15% CF, (e) 20%

%5 kısa karbon fiber içeren çekme testi yapılan numune kesitine Şekil 5'de şematik gösterilen doğrultuda bakıldığında porozitenin daha az ve dağınık olduğu ve kısa karbon fiberlerin bakma yüzeyine dik olarak konumlandığı görülmektedir. Karbon fiber miktarı arttıkça porozite miktarı artmaktadır. %20 kısa karbon fiber içeren numunede gözenekler küçük çapta (25-40 μm) ve daha sık olarak görülmektedir.

Şekil 4 ve Şekil 5'de görüldüğü üzere porozite sıklıkla fiber çevresinde görülmektedir. Fiber çevresindeki bu poroziteler düşük fiber-matris yüzey tutunmasına sebebiyet vererek üretilen kompozit parçanın mekanik özelliklerinin düşmesine neden olur. Bu iç porozitelerin oluşmasının en önemli nedenlerinden biri iki farklı fazın (polimer ve fiber) yazdırma işlemi sırasında birbirlerine göre farklı akmasıdır [20]. Bu durumun önüne geçmek için fiberler yüzey işlemine tabi tutularak ve ya haşıl maddesi kullanılarak matrise daha iyi tutunmaları sağlanabilir [34]. Li ve Zhang ise çalışmalarında HNO_3 ile işlenmiş kısa karbon fiberi ABS matris içerisinde kullanarak tutunma yüzeylerini ve boşluk oluşumunu incelemiştir [35].

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 6mm uzunluğunda ki karbon fiberler takviyeli ABS kompozit filamentin üretim yöntemleri ve işlem parametreleri incelenmiştir. Kısa karbon fiber takviyesinin ABS'nin mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, elastisite modülü, süneklik, tokluk vb) önemli ölçüde etkilediği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca kompozit numune anizotropik özellik gösterdiğinden yazdırma deseninin kompozit malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Mekanik testlerden sonra kısa karbon fiber takviyeli filament ve çekme testinde kullanılan numunenin kesitlerine optik mikroskop yardımıyla bakılarak farklı oranda ki katkılar için porozite oluşumu, kısa karbon fiber yönlendirilmesi ve katmanlar incelenmiştir.

Sonuçlar aşağıda ki gibi özetlenmiştir.

- Ticari ABS ile kıyaslandığında karbon fiber etkisi doğrusal yazdırmada [0, 90] çekme dayanımını ve elastisite modülünü önemli derecede arttırmıştır. Tokluk ve süneklik ise azalmıştır. Çapraz yazdırmada [-45, 45] ise ticari ABS ile kıyaslandığında karbon fiber etkisi elastisite modülünü artırırken, çekme dayanımı tokluk ve sünekliği azaltmıştır.
- Ticari ABS için yazdırma deseni mekanik özellikleri kayda değer bir biçimde etkilememesine rağmen karbon fiber katkılı kompozit numunelerde mekanik özellikler yazdırma deseni ile önemli derecede değişmektedir. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropik özellik göstermektedirler.
- Karbon fiber takviye oranı arttıkça kompozit malzemelerin kırılma, gevrek davranışları artmaktadır.
- Karbon fiber oranı arttıkça gözenek oluşumu çapı küçülerek çoğalmaktadır. Porozite miktarı ve çapı mekanik özellikleri etkilemektedir.
- Karbon miktarı arttıkça homojen karıştırma işleminde fiberlerin fiziksel kırılması artmış ve kompozit filament içerisindeki ortalama fiber uzunluğu azalmıştır. Fiber boyu çekme dayanımını ve poroziteyi etkilemektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, 115C096 numaralı TÜBİTAK BİDEB 2232 Araştırma Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S., Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, Material Design 31, 287-295, 2010.
- [2] ASTM F2792e12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies, West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [3] Yakovlev A., Trunova E., Grevey D., Pilloz M., Smurov I., Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects, Surface Coatings Technology 190 (1), 15-24, 2005.
- [4] Williams J.V., Revington R.J., Novel use of an aerospace selective laser sintering machine for rapid prototyping of an orbital blowout fracture, International Journal of Oral Maxillofacial Surgery 39, 182-184, 2010.
- [5] Vilaro T., Abed S., Knapp W., Direct manufacturing of technical parts using selective laser melting: example of automotive application, Proceedings of 12th European Forum on Rapid Prototyping; 2008.
- [6] Webb P.A., A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector, Journal of Medical Engineering & Technology (J. Med. Eng. Technol.) 24 (4), 149-153, 2000.
- [7] Rengier F., Mehndiratta A., Tengg-Kobligh H., Zechmann CM., Unterhinninghofen R., Kauczor U., Giesel F.L., 3D printing based on imaging data: review of medical applications, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 5, 335-341, 2010.
- [8] Kolarevic B., Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age, Proceedings of Association for Computer Aided Design in Architecture, 268-277, 2001.
- [9] Flowers J. 3D laser scanning in technology education, Technology Teaching, 60 (3), 27-30, 2000.
- [10] Brandt J., Drechsler K., Arendts F.J., Mechanical performance of composite based on various three dimensional woven-fibre preforms, Composites Science and Technology (Compos. Sci. Technol.), 56, 381-386, 1996.
- [11] Dudek P., FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements, Archives of Metallurgy and Materials (Arch. Metall. Mater.), 58 (4), 1415-1418, 2013.

- [12] Cooke M.N., Fisher J.P., Dean D., Rimnac C., Mikos A.G., Use of stereolithography to manufacture critical sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth, *Journal of Biomedical Materials Research Part A (J. Biomed. Mater. Res. Part B)*, 64 (B), 65-69, 2002.
- [13] Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L., Lasers and materials in selective laser sintering, *Assembly Automation*, 23 (4), 357-371, 2003.
- [14] Park J, Tari MJ, Hahn HT. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process, *Rapid Prototyping Journal*, 6 (1), 36-50, 2000.
- [15] Kai C.C., Fai L.K., Chu-Sing L., *Rapid prototyping: principles and applications in manufacturing*, 2nd ed. Singapore: World Scientific Publishing; 2003.
- [16] Wong K.V., Hernandez A., A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Network*, Article ID: 208760, 2012.
- [17] Chakraborty D., Reddy A.B., Choudhury, R.A., Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling, *Computer Aided Design*, 40, 235-243, 2008
- [18] Comb, J.W., Priedeman W.R., Leavit P.J., Skubic R.L., Batchelder J.S., High-precision modeling filament, patent, 2005.
- [19] Marcincinova L.N., Marcincin J.N., Barna J., Torok J., Special materials used in FDM rapid prototyping technology application, *Proceedings of IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, Lisbon, 73-76, 2012.
- [20] Tekinalp H.L., Kunc V., Velez-Garcia G.M., Duty C.E., Love L.J., Naskar A.K., Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composite Science Technology*, 105 (10), 144-150, 2014.
- [21] Shofner M.L., Lozano K., Rodríguez-Macías F.J., Barrera E.V., Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling, *Journal of Applied Polymer Science (J. Appl. Polym. Sci.)*, 89 (11), 3081-3090, 2003.
- [22] Karsli N.G., Aytac A., Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composite, *Composites Part B*, 61, 270–5, 2013.
- [23] Bijsterbosch H., Gaymans R.J., Polyamide 6-long glass fiber injection moldings, *Polymer Composite*, 16, 363–369, 1995.
- [24] Denault J., Vu-Khanh T., Foster B., Tensile properties of injection molded long fiber thermoplastic composites, *Polymer Composite*, 10, 313–321, 1989.
- [25] Fu S.Y., Hu X., Yue C.Y., Effects of fiber length and orientation distributions on the mechanical properties of short fiber reinforced polymers- a review, *Materials Science Research International (Mater. Sci. Res. Int.)*, 5, 74–83, 1999.
- [26] Ramsteiner F., Theysohn R., Tensile and impact strengths of unidirectional, short fiber-reinforced thermoplastics, *Composites*, 10, 111–119, 1979.
- [27] Botelho E.C., Figiel L., Rezende M.C., Lauke B., Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites, *Composites Science Technology*, 63, 1843–1855, 2003.
- [28] Li J., Zhang Y.F., The tensile properties of HNO₃-treated carbon fiber reinforced ABS/PA6 composites, *Surface and Interface Analysis (Surf. Interface Anal.)*, 41, 610–614, 2009.
- [29] Li J., Cai CL., The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites, *Current Applied Physics (Curr. Appl Phys.)*, 11, 50–54, 2011.
- [30] Fu S.Y., Lauke B., Mader E., Yue C.Y., Hu X., Tensile properties of short glass fiber and short carbon fiber reinforced polypropylene composites, *Composites Part A*, 31, 1117–1125, 2000.
- [31] Zhong W., Li F., Zhang Z., Song L., Li Z., Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling, *Materials Science Engineering*, 301, 25–30, 2001.
- [32] Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B* 80, 369-378, 2015.
- [33] Tezcan J., Ozcan S., Gurung B., Filip P., Measurement and analytical validation of interfacial bond strength of PAN fiber reinforced carbon matrix composites, *Journal of Material Science*, 43(5), 1612–1628, 2008.
- [34] Tang L.G., Kardos J.L., A review of methods for improving the interfacial adhesion between carbon fiber and polymer matrix, *Polymer Composites*, 18(1), 100-113, 1997.
- [35] Li J., Zhang Y.F., The tensile properties of short carbon fiber reinforced ABS and ABS/PA6 composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites (J. Reinf. Plast. Compos.)*, 29 (11), 1727–33, 2010.

EKLEMELİ İMALATTAKİ GELİŞMELERE GENEL BİR BAKIŞ

Ferhat BOZBUĞA^a, H. Rıza BÖRKLÜ^b

a, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara/TÜRKİYE, frht.bzbg@gazi.edu.tr

b, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE, rborklu@gazi.edu.tr

Özet

Eklemler İmalat, Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) verisinden ince tabakalar şeklinde model veya gerçek parçalar imalini içerir. Bu yöntemle oluşturulan model/parçalar çeşitli iş ve işlemlerde kullanılabilir (testler, boyut kontrolü, döküm model, müşteriye teklif, prototip veya gerçek parça gibi). Son yıllarda bu alanda birçok yöntem ve teknoloji geliştirilmiştir. Bunlar: Ergiyik birikimli modelleme, Seçici lazer sinterleme, Elektron ışını ile işleme, Stereolitografi, 3B baskı, Çok püskürtmeli modelleme, Katmanlı nesne imalatı, Lazerle yapılan net biçimlendirme vb. gibi yöntemlerdir. Bu yöntemler ile kolay, hızlı, ucuz ve otomatik modeller geliştirilebilir. Bu bildiride eklemeli imalat yöntem ve teknolojilerinin genel durumu, konu hakkında yapılan araştırmalar, geleceği ve çeşitli sorunları ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Hızlı prototip oluşturma, Tersine mühendislik

AN OVERVIEW OF THE DEVELOPMENTS OF ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract

Additive Manufacturing is intended to produce models or physical parts as thin layers from Computer Aided Design (CAD) data. Real models/parts produced this way can be used in a variety of business and operations (tests, dimensional control, casting models, customer offers, prototypes and even real parts and so on.). Many technologies and methods have been developed in this area in recent years. These include: Fused Deposition Modelling, Selective Laser Sintering, Electron Beam Machining, Stereolithography, 3D printing, Multi-jet Modelling, Laminated Object Manufacturing, Laser Net Shaping and so on. With this technology and methods, easy, fast, inexpensive and automatic models can be developed. In this paper, the general situation of additive manufacturing methods and technologies, researches about the subject, the future and various problems are discussed.

Keywords: Additive manufacturing, Rapid prototyping, Reverse engineering

1. Giriş

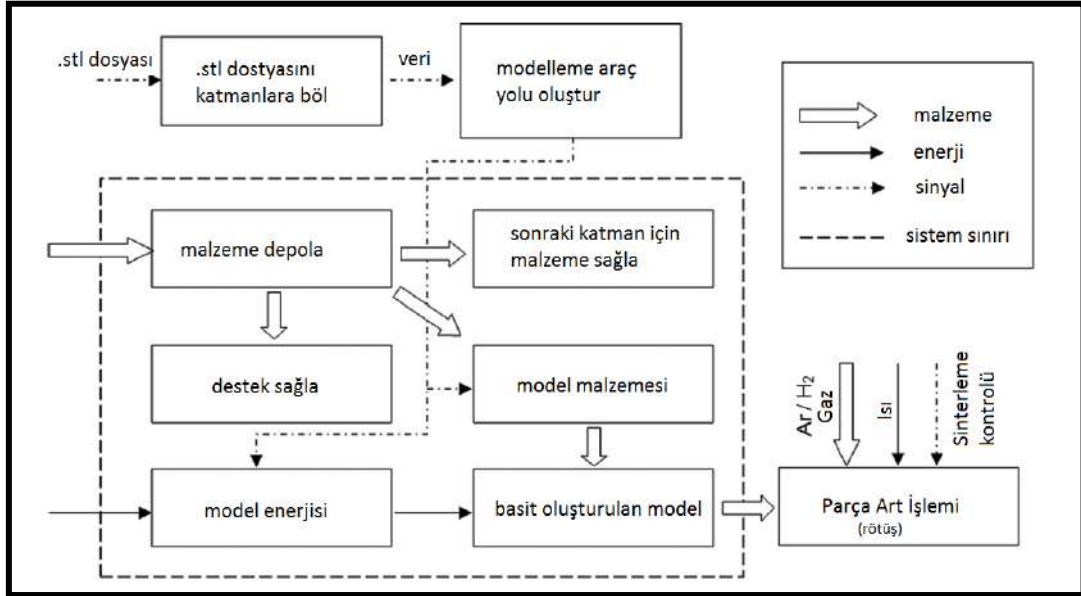
Seri üretim yapan tesis ve fabrikaların gelişmekte olan ülkelere taşınması sonrası Avrupa ve Amerika'da faaliyet gösteren şirketler düşük hacimli, inovatif, esnek ve sürdürülebilir nitelikte ürünler ortaya koymaya başladılar. Bu durum; yeni, esnek, ekonomik ve küçük hacimli üretim yöntemleri geliştirmeyi gerekli kıldı. Bu yöntemlerden biri de 'Eklemeli İmalat' (EI) olarak anılmaktadır [1]. Son yıllarda eklemeli imalat ve hızlı prototip oluşturma konusu hem akademik hem de endüstriyel çevrelerde çok popüler olmuştur [2]. Ayrıca bu teknoloji, kullanıcılar için de çok önem kazanmıştır. Bu kapsamda kullanıcılar; adapte veya yeni ürün, sürdürülebilir veya gelişmiş ürün tercih edenler olarak tasnif edilebilirler. Bir ürünü geliştirme veya yeni ürün tasarımı, daha iyi işlevsellik ve sürdürülebilirlik sağlama açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda kullanıcılar: Mevcut ürünler için parça üretimi veya tamir parçaları üretimi yapanlar ile ürünlere farklı özellikler ekleyip, geliştirilenler olarak alt gruplara ayrılır. Yeni ürünler açısından ise bunların işlevlerini dikkate almadan biçime dayalı model geliştirenler ile yeni bir ürün ve işlev oluşturan mucitler şeklinde tasnif yapılabilir [3].

Eklemeli imalat tekniğinde malzemeler, boşaltmalı (talaş kaldırmalı) imalatın tersine, önce üst üste ince tabakalar şeklinde eklenir ve arkasından birleştirilir [1, 2]. Eklemeli işlemler, eklemme teknikleri, tabaka eklemeli üretim, tabaka şeklinde üretim ve serbest biçimli imalat olarak da anılır. Son çeyrek asırlık bir geçmişe dayanan eklemeli imalat önce kavramsal ve işlevsel prototipler oluşturmada kullanılmıştır. Genelde bu prototipler, ürün geliştirme sürecinde, 3B BDT modeli hızlı şekilde gösterme ve bir iletişim aracı olarak kullanılmıştır [1, 4].

Eklemeli imalat aşamaları şu adımlardan oluşur [1]:

- Tasarıma ait BDT model oluşturma
- Bu BDT modeli STL dosyaya dönüştürme
- STL dosyasını eklemeli imalat sistemine aktarma
- Sistemi ayarlama
- Hızlı model oluşturma
- Parçayı kaldırma ve temizleme
- Art işlemler uygulama.

Eklemeli imalat işleminde hammadde basit katmanlar şeklinde birbirine birleştirilir ve parça oluşturulur. Genel bir eklemeli imalat sistemine ait örnek fonksiyon şeması Şekil 1'de verilmiştir. Burada görünen bu işlem genelde altı aşamada olur [4].



Şekil 1. Eklemeli imalat sistemine ait örnek bir fonksiyon şeması [4].

i. Malzemenin depolanması

Son parça oluşturmada bütün eklemeli imalat yöntemleri bir başlangıç malzemesi kullanır (örneğin; toz, filament, reçine, süspansiyon gibi).

ii. Model malzemesi ve model enerjisi

Hemen her eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan ve tabakaların kaynamasını sağlayan alt fonksiyonları içerir. Doğrudan malzeme yığılır, ham madde seçilerek enerji verilir veya malzeme ve enerji birlikte kullanılarak model inşa edilir.

iii. Basit parça oluşturma

Polimerizasyon, sinterleme, eritme ve dondurma gibi işlem içeren eklemeli imalat yönteminde uygun bir teknoloji hammaddeye uygulanır. Bu işlem sonrası hammadde katılır ve istenilen şekil tabakalar halinde oluşturulur.

iv. Bir sonraki katman için malzeme sağlanması

Yeni tabakalar eklenerek iş parçasının gerçek şeklini alması için malzeme ikmali yapılmalıdır. Bazı teknolojiler doğrudan malzeme yığmaya dayanır ama büyük çoğunluğu yeni tabaka oluşturmak için malzeme ekleme işlemini kullanır.

v. Daha önce oluşturulan tabakanın desteklenmesi

Birçok eklemeli imalat teknolojisinde karmaşık geometrili (boşaltma, kesme, askıda kalan unsurlar) parçaların dengede kalabilmesi için destek malzemesi kullanılır.

Holmstrom ve diğerleri (vd.) eklemeli imalatın şu tür avantajlara sahip olduğunu belirtmektedir [1]:

- Takımla işlemeye gerek olmadığı için üretim süre ve maliyeti azalır.
- Hızlı tasarım özelleştirme sağlar.
- Az sayıda ve ekonomik üretim yapılabilir.
- Ürüne ait bir işlevi geliştirme mümkün olur.
- Ekonomik özel ürünler üretmeyi sağlar.
- Atık oluşumu azaltılabilir ve
- Basit tedarik zinciri, kısa teslim süresi, daha az stok olur.
-

2. Eklemeli İmalat Teknikleri

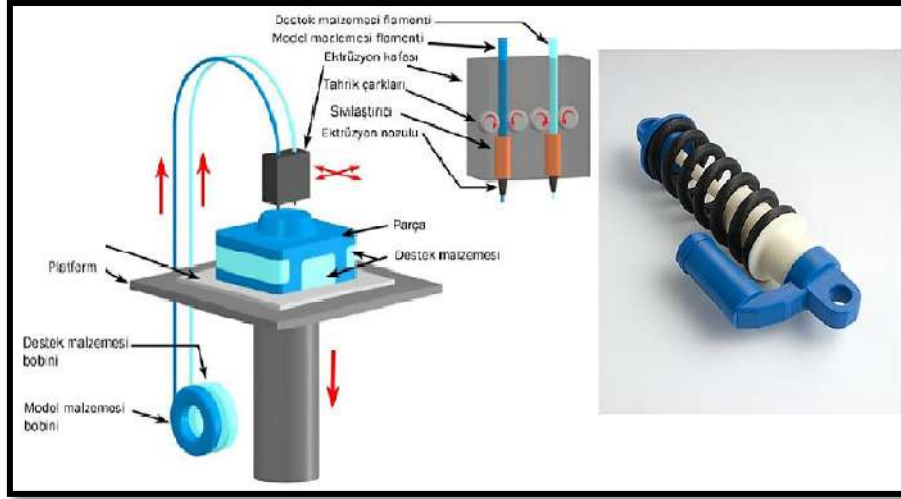
Günümüzde çok kullanılan eklemeli imalat teknikleri: Stereolitografi (SL), Ergiyik biriktirmeli modelleme (FDM), Seçici lazer sinterleme (SLS) ve 3B baskı (3 DP) şeklindedir. Bu yeni teknolojilerin benzer ve farklı birçok yanları vardır [1]. Eklemeli imalat kapsamlı prototip / model oluşturma; (1) sayısal prototip oluşturma, (2) fiziksel prototip oluşturma ve (3) hızlı işleme ve işlevsel parça oluşturma şeklinde üç çeşide ayrılabilir [5].

3B modelleme yazılımları yardımıyla ürün ve parçaları doğrudan tasarlanabilir. Eğer parça mevcut ise Tersine Mühendislik (TM) yöntemleri ile bu parça önce sayısal bir modele dönüştürülür ve sonra da üretilir. Tersine Mühendislik; (1) sayısal hale getirme, (2) unsur çıkarma ve (3) 3B BDT model oluşturma şeklinde üç temel adımda uygulanır [5].

Sayısal hale getirme işlemi (yani, parçaya ait yüzey / ayrıt koordinatlarını oluşturma), parçaya temaslı veya temassız şekilde olabilir. Bunlardan temassız yöntemler; Lazer Üçgen Tarayıcı (LTS), Manyetik Rezonans Görüntü (MRI) ve Bilgisayar Tomografi (CT) vb. şeklindedir. Temaslı olanlar ise Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM) ve Kesit Alan Görüntü Ölçümü (CIM) olarak belirtilebilir. Unsur çıkarma işlemi sayısal veriyi parçalara ayırma ve yüzey özelliklerini belirlemeyi içerir. Elde edilen veri işlenip optimize edildikten sonra kullanılabilir. Tersine mühendislik; üretim süresini azaltır, kaliteyi artırır ve maliyeti düşürür. Eklemeli imalat işlemi malzeme açısından; (1) sıvı bazlı, (2) toz bazlı ve (3) katı bazlı sistemler olarak üç kategoriye ayrılmıştır. Malzemenin şekil kazanması ise doğrudan 3B ve 2B katman tekniği ile sağlanır. Alman Üretim İşlemi Standartları (DIN8580) ve (DIN8581) bu sınıflandırmayı yapmıştır. İşlevsellik açısından sınıflandırma şeması Christopher B. Williams tarafından sunulmuştur. En son ASTM Uluslararası kuruluşu Eklemeli imalatı yedi farklı gruba ayırmıştır. Bunlar; (1) malzeme ekstrüzyon, (2) toz yatak füzyonu, (3) vat polimerizasyon, (4) malzeme püskürtme, (5) bağlayıcı püskürtme, (6) katmanlı nesne imalatı ve (7) doğrudan enerji yığma olarak adlandırılır [1, 2, 5]. Bu yöntemleri şimdi daha ayrıntılı inceleyelim.

1. Malzeme Ekstrüzyon

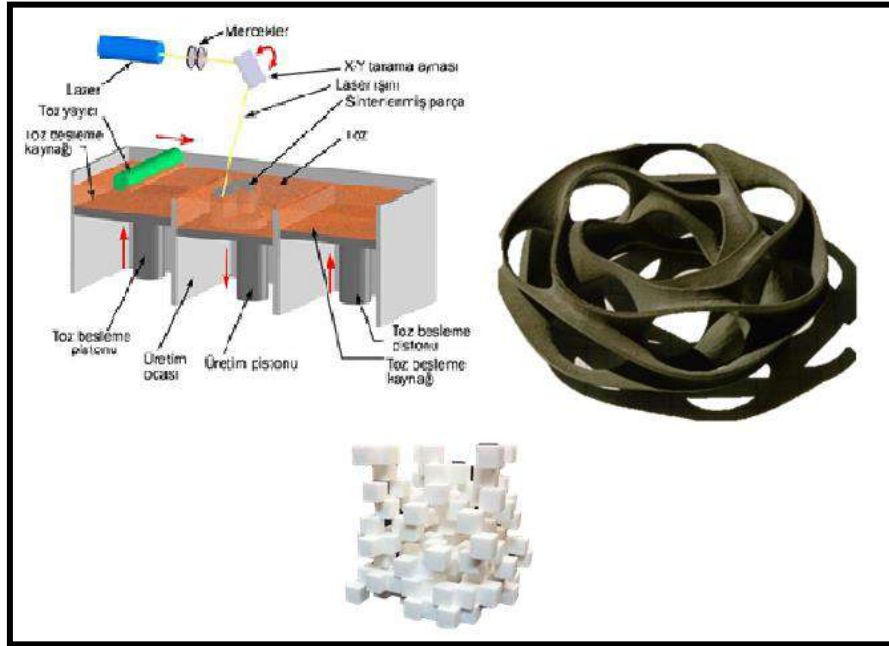
1988'de erimiş termoplastiklerden (ABS veya PLA) mekanik olarak katmanlar oluşturan eklemeli imalat sistemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin çalışma sistemi ve üretilen bazı örnek parçalar, Şekil 2'de verilmiştir. Eriyik yığarak modelleme (FDM) olarak adlandırılan bu yöntem yüksek sıcaklık gerektirir ve bu yöntemle üretilen parçalarda gözenekli yapılar oluşur. Uygun fiyatı ve esnek çözüm sunması son zamanlarda ilgi çekmesini sağlamıştır. Seramik ve metal macunlarla üretim yapılabilmesi için çalışmalar yapılmıştır.



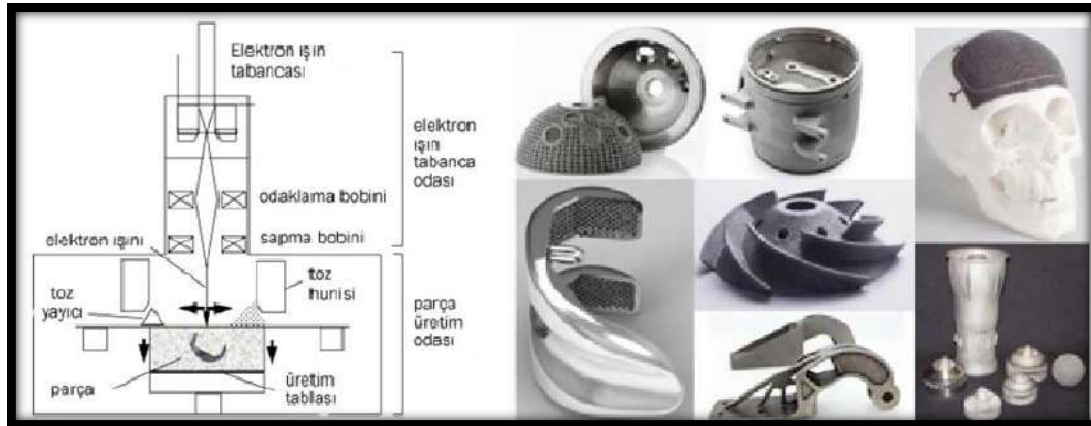
Şekil 2. Malzeme Ekstrüzyonu üretim yöntemi ve örnek bazı parçalar [6, 7].

2. Toz Yatak Füzyonu

Toz yatak füzyonu tekniği bir enerji ışını (lazer, elektron) kullanarak, toz yatağında seçici bir kaynaştırma yapma işlemidir. Bir katman taranıp kaynaştıktan sonra bunun üzerine başka bir toz katmanı merdaneler ile serilir. Aynı birleştirme tekniği bir önceki katmana kaynaştırmak üzere tatbik edilir. Bu teknik ile seramik ve metal tozlar da polimerlerle karıştırılarak dolaylı biçimde kullanılabilir. Ortaya çıkan parçaların tamamıyla sinterlenmesi için yüksek sıcaklıklarda bir art işlem gerekir. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Seçici Lazer Eritme (SLM) ve Elektron Işını ile İşleme (EBM) çok kullanılan toz yatak füzyonu teknikleridir. Şekil 3'de SLM yönteminin çalışma sistemi ve üretilen örnek parçalar gösterilmiştir. EBM yönteminin çalışma sistemi ve bu yöntemle oluşturulan bazı parçalar Şekil 4'de gösterilmiştir. Kullanılan metal tozların oksitlenmesini engellemek için vakum içinde veya hareketsiz ortamda işlemek gerekir. DMLS ve EBM teknikleri ile üretilen parçalar, yoğun ve dayanımı yüksek parçalardır.



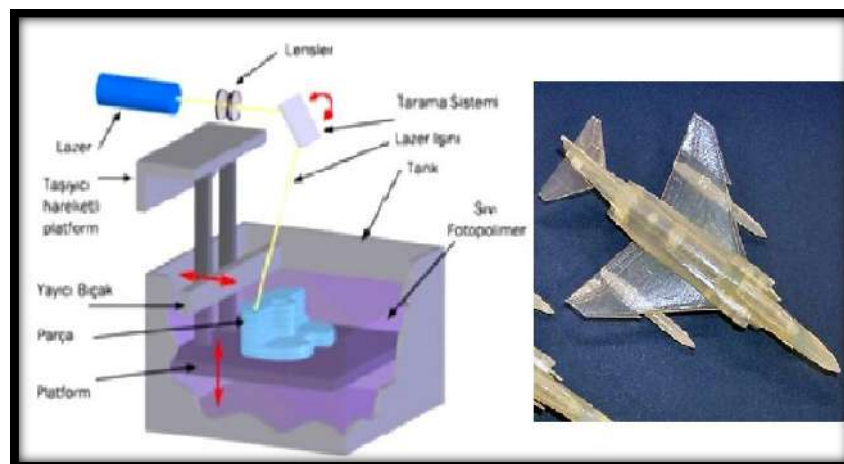
Şekil 3. Seçici Lazer Eritme üretim yöntemi ve üretilen örnek parçalar [6, 9].



Şekil 4. Elektron Işını ile İşleme üretim yöntemi ve bazı üretilen parçalar [6].

Vat Fotopolimerizasyon

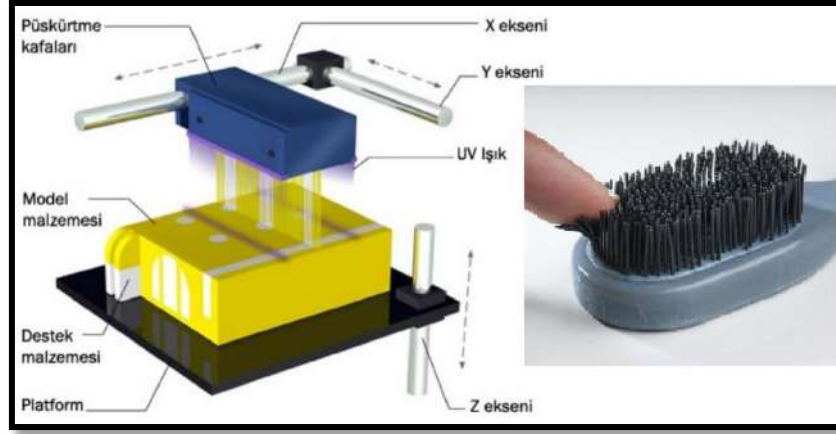
İlk ticari Stereolitografi (SLA) eklemeli imalat yöntemi, kızıl ötesi (UV) lazer ışını kullanarak UV ile ergitilebilir bir polimer reçineyi işler ve malzemeyi sertleştirir. Parça tam oluşana kadar sırayla tüm katmanlar bu şekilde işlenir. Şekil 5'te SLA yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilen bazı örnek parçalar gösterilmiştir. Katman kalınlığı, ergitme derinliğine bağlıdır. Yöntemin dezavantajı olarak katmanların fazla ergitilmesine bağlı işlem hataları ile gerekli parça malzemesi ve destek malzemesinin yüksek fiyatla satılması gösterilebilir. Bu teknolojiyi doğal olarak fotopolimerler sınırlar. Bazı araştırmalar reçinelere nano partiküller eklenerek seramik bileşenler (alümina, zirkonya vd.) elde etmeyi başarmışlardır.



Şekil 5. Stereolitografi (SLA) yöntemi ile üretim ve bazı üretilen parçalar [6, 10].

3. Malzeme Püskürtme

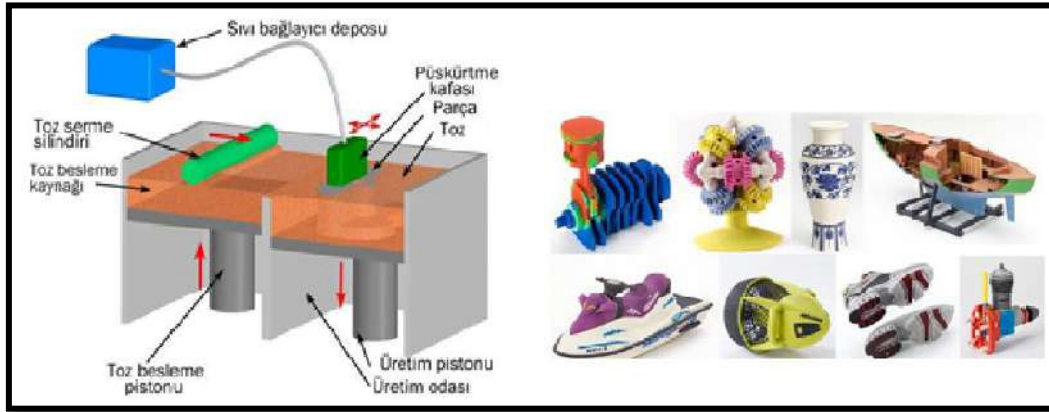
Tıpkı mürekkep püskürtmeli yazıcıların çalışma ilkesi gibi, malzeme püskürtmeli eklemeli imalat tekniği, doğrudan balmumu ve/veya fotopolimer damlacıkları alt tabakaya yığarak malzemeyi işler. Bu yöntemin çalışma prensibi ve üretilen bazı örnek parçalar Şekil 6'da gösterilmiştir. Isıtma veya ışıkla ergiterek malzeme hal değişimi gerçekleşir. Araştırmacılar istenilen işleve göre seramik, metal ve yarı iletken süspansiyonlar şeklinde malzemeyi işleyecek çalışmalar yapmışlardır. İşlem sıvısına ait viskozite sınırlarına bağlı olarak, katı parçalara göre, süspansiyonun düşük yoğunlukta olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Malzeme Püskürtmeli üretim (Polijet) yöntemi ve bazı üretilen parçalar [6, 8].

4. Bağlayıcı Püskürtme

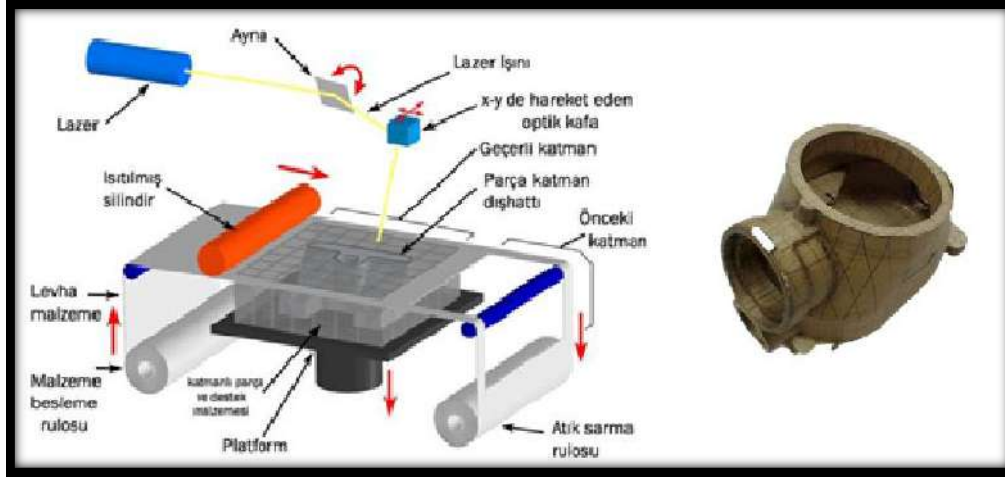
Bağlayıcı püskürtme tekniğinde, toz yatağında sıvı polimer tozlar birbirine bağlanıp parçayı oluşturacak şekilde püskürtülür. Önce ilkel bir biçim oluşturulur. Bu biçime tekrar toz kaplama yapılarak parça şekli oluşturulur. Şekil 7’de bu yöntemin çalışma prensibi ve üretilen örnek parçalar gösterilmiştir. Parça bağlayıcı ve toz karışımından oluştuğu için dayanımını artırmak amacıyla bir art işlem gerekir. Bu yöntemde herhangi bir toz malzeme bağlayıcı püskürtülerek işlenebilir. Araştırmacılar birçok metal, seramik, döküm kumu ve polimer malzemeleri işlemeyi başarmışlardır.



Şekil 7. Bağlayıcı püskürtmeli baskı yöntemi ile üretim ve bazı üretilen parçalar [6].

5. Katmanlı Nesne İmalatı

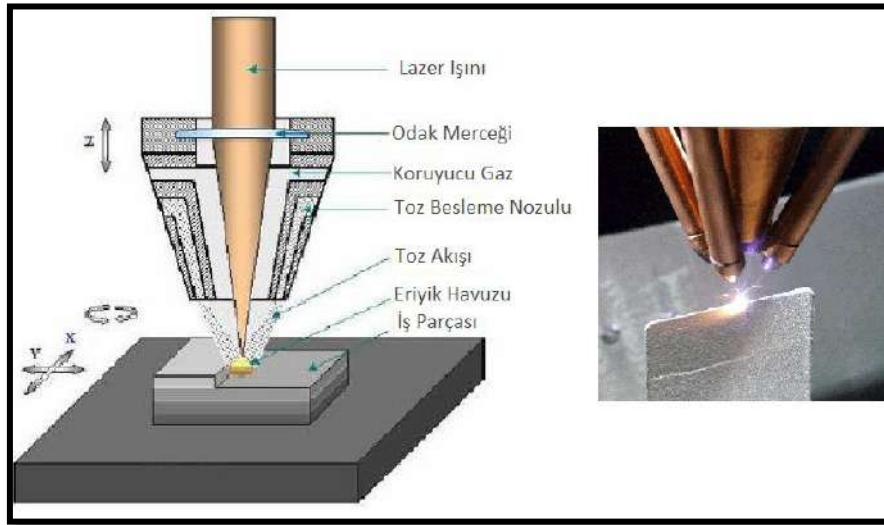
Katmanlı nesne imalatı (LOM) 1986’da geliştirilen bir tekniktir. Düşük iç gerilimler ile kırılabilirlik, yüksek yüzey bitirme detaylarına sahip parçalar üretmek mümkündür. Malzeme, makine ve işleme maliyeti de oldukça düşüktür. Araştırmacılar, katmanları birleştirme, sökme ve atık kaldırma üzerine çalışmışlardır. Katmanlı nesne imalatı ile metal parçalar üretmek de mümkündür. Merdiven etkisini azaltma ve katman yapıştırma konuları ile ilgili yoğun çaba gerektiren araştırmalar yapılmıştır. İşlevsel olarak geçişli metal parçaların imalatı için metal levhalara ultrasonik kaynak işlemi de uygulanmaktadır. Şekil 8’de bu yöntemin çalışma sistemi ve üretilen örnek bir parça gösterilmiştir.



Şekil 8. Katmanlı nesne imalatı ile üretim ve üretilen bazı örnek parçalar [6, 11].

6. Yönlendirilmiş Enerji Yığma

Yönlendirilmiş enerji yığma (DED) yönteminde metalik malzeme (toz veya tel) ile beslenen bir nokta üzerine enerji ışını düşürülür. Böylece bir eriyik havuzu oluşur. Lazer ile tasarlanmış net şekillendirme (LENS) geçişli çoklu metal parçaların imalatı ve karmaşık mikro içyapılar oluşturmaya izin verir. Enerji kaynağı olarak genelde lazer ve elektron ışınları kullanılır. Teorik olarak % 99.9 malzeme yoğunluğuna ulaşabilen bu yöntemle dökümden %30 daha fazla dayanıma sahip parçalar üretebilir. Kaplama yapma ve hasar görmüş parçanın hasarlı kısmını onarma gibi avantajları vardır. Ayrıca, uygulandığında parçanın tribolojik performansını arttıran özelliği de vardır. Şekil 9'da LENS yönteminin çalışma sistemi ve parça üretimi gösteren gerçek bir fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 9. Lazer ile tasarlanmış net şekillendirme ile üretim ve parça üretimi [12, 13].

Eklemeli imalat yöntemlerinin bazı özellikler açısından genel bir karşılaştırması Çizelge 1'de yer almaktadır. Hızlı İşleme ve Hızlı Prototip Oluşturma ise modelleri işlevsel (genelde metal) parçalara dönüştüren tekniktir. Ayrıca bunların ürün geliştirmeye dâhil edilmesi, eş zamanlı mühendislik uygulamalarını da desteklemektedir [5].

Çizelge 1. Eklemeli imalat yöntemlerinin genel karşılaştırılması - [2]

Kategori	Teknoloji	Baskı malzemesi	Güç kaynağı	Özellikleri
Malzeme Eksrtrüz- yon	Ergiyik Birikimli Model- leme (FDM)	Termoplastikler, Seramik bulamaçlar, Metal ma- cunları	Isıl enerji	Ekonomik ekst- rüzyon Çoklu baskı Parça çözünür- lüğü az Zayıf yüzey bitirme
	Kontur İşçiliği			
Toz Yatak Birleş-tir- me	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Poliamidler / Polimerler	Güçlü lazer ışını	Yüksek hassa- siyet Yoğun parça Yüksek dayanım Toz tutma ve geri dönüşüm desteği
	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)	Atomize metal tozları (Paslanmaz çelik, Kobalt Kromiyum, Titanyum), Seramik tozları		
	Seçici Lazer Ergitme (SLM)		Elektron ışını	
	Elektron Işın ile İşleme (EBM)			
Vat Fotopolimeri- zasyon	Stereyolitografi (SLS)	Fotopolimer, Seramikler (Alumina, zirkon, PZT)	Ultraviyole lazer	Yüksek baskı hızı İyi parça çözü- nülüğü Aşırı sertleştir- me Pahalı malzeme
Malzeme Püskürtme	Polijet / Inkjet Baskı	Fotopolimer, Balmumu	Isıl enerjisi / Foto ergitme	Çoklu baskı İyi yüzey son işlemi Düşük dayanım
Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Inkjet Baskı	Polimer tozu (plaster, reçine), Seramik tozu, Metal tozu	Isıl Enerji	Tam renkli baskı Art işleme nüfuz gereği Çok malzeme seçimi Çok gözenekli ürün
Levha Birleştirme	Katmanlı Nesne İmali (LOM)	Plastik film, Metalik lev- ha, Seramik	Lazer Işını	İyi yüzey bitirme Düşük Maliyet Yatay konum- lama
Yönlendirilmiş Enerji Yığıma	Lazerle Yapılan Net Biçimlendirme (LENS), Elektronik ışın kaynağı (EBW)	Ergiyen metal tozu	Lazer Işını	Hasarlı parça onarımı Kademeli ürün imali Art işlem ge- rekmesi

3. Eklemeli İmalatın Üretimdeki Yeri ve Önemi

Eklemeli imalat, daha önceden de bahsedildiği gibi, üst üste getirilen ve birleştirilen tabakalar ile parça oluşturma işlemidir. Bu tabaka kalınlıkları azaltıldıkça çözünürlük iyileşir ve parça yüzey kalitesi artar. Ancak bu durum üretim süresinin uzamasına neden olur. Her modele ait üretim süresini etkileyen başka bazı faktörler de vardır. Örneğin bunlar; yazıcı hızı, parça boyutu ve baskı yönü vb. gibi olabilir. Ayrıca küçük baskı yüksekliği de süreyi artırır [2]. Parça yüzey kalitesini etkileyen diğer faktörler, uygun teknoloji seçimi ve parçaya ait üretim aşamalarıdır. FDM teknolojisine sahip makinelerde ergimiş polimerin verimli kullanılabilmesi için nozul çapı nispeten büyük olmalıdır (~0,4 mm). Bu da parçadaki unsur boyutunu etkiler. Fotopolimerizasyon

ve toz yatak füzyon işlemlerinde daha temiz sonuçlar alınabilir. Ancak çözünürlük yazıcı başlığındaki DPI (inç başına düşen nokta sayısı) ile sınırlıdır. Günümüz cihazları 600 DPI XY çözünürlüğe sahiptir [2]

Her tabakada baskı tarafından belirlenen yüzey kalitesi, katman kalınlığı artıkça eğri yüzeye sahip parçalarda azalır. Buna yüzeyde oluşan şekil sebebiyle “merdiven etkisi” denebilir. Malzeme yığılma teknolojisine göre bu durum, FDM’de nozul çapının büyük olmasından dolayı daha belirgin olur. FDM ile yazılan katman kalınlığı ~0,2 mm iken, foto polimerizasyon ve toz yatak füzyonu gibi teknolojilerde ~0,1 mm, çok püskürtmeli modellemede (MJM) ~0,02 mm ye kadar düşer. Bu da daha temiz yüzeye sahip daha küçük parça unsur baskısı sağlar. Toz yatak füzyonu, diğerlerine göre, parça yüzeyinde büyük ve erimiş toz zerrecikler alması sebebiyle en düşük yüzey kalitesine sahiptir [2].

Tüketici ürünleri, çok çeşit ve özellikte malzemelerden oluşurken, eklemeli imalat ile üretilen ürünlerde malzeme seçimi oldukça kısıtlıdır. Çoğu zaman polimerler kullanan eklemeli imalat sistemleri genel mühendislik malzemelerine ait mekanik özellikleri karşılamaz. Katmanlar arası yapışma iyi olmadığı için parçaların mekanik özellikleri zayıf olabilir. Bu sistemlerde genelde her seferde sadece bir tabaka oluşur ama nadir de olsa çoklu malzeme sağlama olabilir. Metal veya polimer bazlı bu sistemlerin malzeme ara yüzünde belirsiz davranışlar olduğu için kullanımı sınırlıdır [2]. Karmaşık geometrilili parçaları üretirken, bütün eklemeli imalat teknolojileri, askıda kalan, altı boşaltılmış kısım veya hareketli çıkıntılı olan parçalar için bir sonraki katmanı destekleyen bazı araçlara gerek duyar. Bunlara destek yapıları denir. Tipik olarak iskele yapıları şeklinde veya ikincil bir çözülebilen malzemeden oluşturulurlar. Destek yapıları normal parçalardan ayırmak için, destek malzemesi suda çözünecek şekilde yıkanır ya da (suda çözülüyorsa) kırılarak veya soyularak ayrılabilir. Genelde büyük ölçekli sistemler, üretim süresi açısından büyük katman kalınlığı gerekirse, yüzey kalitesi bir işlem planlama ile sağlanır. Karma eklemeli imalat işlemi, bir art işlem (eksiltmeli parça işleme veya kumlama) gerektirir. Daha temiz bir yüzey için art işlem gerekir [2, 14].

Ticari firmalar açısından eklemeli imalat, bir ürün çeşitlerini kısa sürede tasarlayıp, üretip, test imkânı sunar. Aynı zamanda ürün tasarımı yaratıcılık açısından oldukça avantaj sağlar. Bu durum ürün geliştirme sürecinde üretim işlemine olumlu katkı sağlar. Bir şekilde ıskartaya çıkan parçalar ise alışılmış işleme yöntemlerine kıyasla oldukça az maliyet oluşturur. Gelecekte oluşabilecek ihtiyacı karşılamak adına firmalar, talep üzerine parça üretirken, ürün stoku oluşturmazlar. Eklemeli imalat yöntemi yer maliyeti açısından ticari firmalara tasarruf sağlayabilir [3]. Endüstride eklemeli imalat uygulamak, örneğin havacılık endüstrisinde, üretim için tasarım sınırlamalarından uzaklaşıp optimum tasarımlar ile performans artış ve parça ağırlığında iyileştirme sağlar. Çok büyük düzenlemeler gerektirmesine karşın, Eİ havacılıkta düşük hacimli üretimler için kullanılır [15]. [1] nolu kaynakta hava taşıt iniş takımları üretim maliyetini iki farklı üretim yöntemi için (Yüksek basınçlı döküm ve SLS) gösterilmiştir. Düşük hacimde bu parça üretimi için maliyet avantajı açıkça görülmektedir. Hidrolik bileşen imalatında eklemeli imalat kullanılırsa akış verimi %250 artmaktadır [1].

Tedarik zinciri açısından eklemeli imalat, parça değişimi, iyileştirme ve tamiri için kolaylık sağlar. Ancak bu durum parça tedarikçileri açısından ilerde sıkıntı oluşturur. Kullanıcıların tersine mühendislik uygulaması ile şirketlerin ürünler üzerindeki kontrolleri kaybolabilir [3]. Eklemeli imalat ürünlerin nakli sırasında oluşan zehirli gaz salınımı ve karbon oluşumunu azaltarak ekolojik çevreye de fayda sağlar. Ayrıca geri dönüşebilir malzemelerin filament olarak kullanılması da atık üretimini azaltır [3]. Eklemeli imalat küçük ölçekli ekonomiye sahip pazarlara daha kolay uyarlanabilir. Bu imalat için pazarlar dört farklı çeşitte değerlendirilebilir [14]:

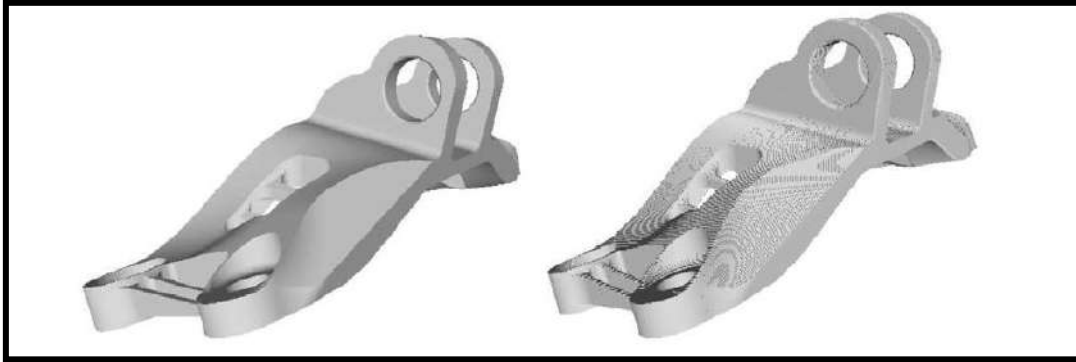
1. Küçük parti ürünleri, genelde prototip oluşturma ve mevcut ürün yedek parçaları.
2. Karmaşık ürünler, özellikle hafif ve normal yöntemlerle üretilebilen içyapıya sahip.
3. Özel müşteri ürünleri, genelde sağlık, süs (ziynet) ve spor ürünleri gibi.
4. Uzaktan ürün talepleri, maden ocakları veya petrol platformlarında kullanma gibi.

Eklemeli imalat sistemleri geleneksel yöntemlere ait takım masraflarını içermez. Bunu büyük ölçekli üretimde kullanmak geleneksel yöntemlere dayalı merkezi ve geniş tesislerin değerini azaltır. Böylece imalat tüketim noktalarına kolay dağılabilir [16]. Yüksek esnekliğine sahip eklemeli imalat pazarda ürün çeşitliliği sağlar. Yeni bir üretim öncesi yatırım maliyetini düşürme ve pazar engellerini azaltma daha rekabetçi bir pazar oluşturur. Eklemeli imalat teknolojisine sahip üretici, pazara girme sonrası tüm pazara hizmet verebilir. Böylece tüketiciye birçok alternatif sunulabilir [14].

4. Eklemeli İmalatın Bugünkü Durumu ve Geleceği

Eklemeli imalat, alışılmış imalat yöntem kaynaklı sınırlamaların aksine tasarımda esneklik sağlar. Bilinen tasarım yöntemleri alışılmış imalat yöntem ve sınırlamalarına göre hazırlanmıştır. Üniversitelerde de bu konuda dersler yer almaktadır. Eklemeli imalat, alışılmış imalat yöntemleri alanındaki konu ve kuralları aşan çok farklı ve esnek tasarım çalışmalarına müsaade eder [2]. Genelde karmaşık geometriye sahip ve düşük hacimli üretime uygun olan eklemeli imalatın başlıca kullanım alanları otomotiv, havacılık, tıp ve biyolojik sistemler ile mühendisliktir. Ayrıca bazı elektronik, tıp ürünleri ile protez üreten şirketler de bu yöntemi kullanarak maliyeti azaltmışlardır. Bilim ve teknolojiye gelişmelere paralel olarak uygulama alanları da sürekli artmaktadır [1, 2].

Eİ ile aynı parçanın geleneksel yöntemlere göre 1/3-1/2 arası daha az enerji kullanılarak üretimi mümkün kılabilir. Ayrıca bazı özel havacılık uygulamalarında Eİ kullanılması ile yıllık 4050 ton alüminyum, 7600 ton titanyum ve 8110 ton nikel tasarrufu sağlanabilir. Bu durum metal kullanımını ciddi şekilde azaltarak gelecekte geri dönüşümlü malzeme kullanımı ve metal besleme işlemi için alternatif teknolojiler geliştirmeyi mümkün kılabilir [17]. Amaçlanan ve eklemeli imalatla üretilen parçalarda oluşan geometrik ve topolojik farklar, Şekil 10'da da görüldüğü gibi, katman kalınlığı ve parça çözünürlüğüne bağlıdır [2, 14]. Böylece bu fark parça özelliklerine yansır. Bu etkilere ait analiz ve simülasyonunu gösterme ve üretim planlamaya destek amaçlı çalışmalar yapılmıştır. Bunlar dilimler halinde parça modeli hesaplayacak direk sorguya dayalı, simülasyon alt program girdileri kullanılır. Sorgu temelli yaklaşım ızgara (model) oluşturma yerine geçer. Aynı zamanda anizotropik malzeme özellikleri ile de işlem basitleşir. Böylece imal edilen model gösterimi, bir imalat planlama işleminde kullanılarak asıl ve eklemeli imalat modeller arası yapısal farkları göstererek analiz ve simülasyona destek olur [14]. Geometrik tekrarlı parçalar, artık gerilmeler ve kaba yüzeyler gibi Eİ problemleri boyut hassasiyeti, yüzey kalitesi ve yorulma dayanımı gibi özelliklerin gelişmesi ile çözülebilir. Endüstri ve akademik çalışmalar ile bu gibi sorunlar 5-20 yıl içinde çözülebilir [17].



Şekil 10. Eklemeli imalat için tasarlanana bir BDT modeli ve bunun üretilmiş hali [14].

Bilimsel ve teknolojik alandaki gelişmeler eklemeli imalata da olumlu yönde yansımaktadır. Benzer husus tasarım ve diğer üretim yöntemlerini de etkilenmiştir. Bulut tabanlı sistemler bu duruma bir örnektir. Bu yeni yaklaşımla; ölçek değişimi, hız, maliyet hesabı, farklı ortamlarda ve müşterek çalışma, tasarım arşivi kullanma vb. hususlar mümkündür [18]. Alt yapı, platform, donanım ve yazılım olarak hizmet gibi destek modelleri bulut tabanlı tasarım ve üretimdeki tasarım ihtiyaçlarını; yük, mesafe, hız, teslim süresi ve maliyet, tasarım ömrü, otomasyon derecesi ve yönlendirme gibi açılarından daha etkin yerine getirilir. Hızlı prototip oluşturma avantajları da eklenince bulut tabanlı tasarım ve üretimde verim ve üretkenlik ciddi bir şekilde artar [18].

Parça kalitesi, süreklilik ve parça ile makineler arası uyum için malzeme, süreç, kalibrasyon, test ve dosya formatına ait bir standartta ihtiyaç vardır. Uluslararası ASTM tarafından onaylanan ilk eklemeli imalat standardı, F2924-12 Eklemeli İmalat için Standart Şartnamesi Ti-6Al7-4V'dir. Eklemeli imalat teknolojisi, gelişme sürecine olan malzeme, makine ve sürece ait farklılıklar bir standart geliştirmeyi zorlaştırır. Bu konudaki bir başka zorluk şirketlerce sağlanan sarf malzemesi ve yedek parçalara ait şirketlerin çıkarlarıdır. Endüstri ve araştırma kurumları bu alanda müşterek bir standart oluşturabilir. 3B baskı pazar ve açık kaynaklı projeler, mülkiyet açısından yasal ve sosyal düzenlemeler gerektirir. Bu teknoloji ayrıca tasarım patentleri alma ve korumada da önemli değişiklik isteyebilir [2].

Yapılan araştırmalar, 3B baskı teknolojisinin gelecekte önemli bir iş kolu ve büyük bir pazar olacağı şeklinde-
dir. 2019 yılına kadar ürün satışı ve dünya çapında hizmetlerin 6 milyar dolar değerinde olması bekleniyor.
Bu öngörüye göre gelecekte donanım fiyatlarının düşmesi, yazıcı özelliklerinin artması ve çok yönlü olması
bekleniyor. Uygulama alanları basit nesne üretiminden ziyade gıda, sağlık gibi karmaşık alanlara kayabilir
[15]. Bu gelişmeler henüz uzak gibi görünse de 2020-25 arası her evde bir 3B biyo yazıcı, 3B tarayıcı ve
yazıcı olması beklenmektedir. Bu husus uzun bir süre şeklinde değerlendirilse de ticari şirket stratejik planları
açısından normaldir [3].

Mevcut pazarlarda bu esneklik önemli ölçüde çıktı değişmesine yol açar. Buna göre yapılacak market araş-
tırma ve iyileştirmeleri Eİ de dikkate alınmalıdır. Bu araştırmalara montaj, kalite ve iş hacmi de dâhil edilmelidir.
Burada kullanılacak malzemeler yanında sınırlayıcılar da hesaba katılmalıdır [15]. Bu alandaki yeni gelişme-
ler verim ve fiyatlara olumlu yansıyacaktır. Yeni teknolojilerin ekonomiye olumlu katkısı açıktır. Bu teknolojile-
rin ekonomik etkilerini belirlemek için işlem, tasarım ve malzemelerin ortak fayda ve yeni ürünlerin yaşam
döngüleri incelenmelidir. Mevcut teknolojik belirsizlik, AR-GE gereği, pazar durumu ve yeni buluşlar için mar-
ket araştırmaları, Eİ kapsamlı yeni araştırmaların süreceği, zamanla olgunlaşacağı ve endüstrinin çok önemli
bir parçası olacağı yönündedir [15, 16].

5. Sonuç

Bu çalışma Eklemeli İmalat konusunda genel ve temel düzeyli bir kaynak araştırmasını içermektedir. Bu
kapsamda Eklemeli İmalatın genel durumu, tanıtımı ve çeşitli yöntemleri ile mukayeseleri ele alınmıştır. Ayırı-
ca, bu yeni teknolojinin üretim alanındaki yer ve önemi, sınırları, muhtemel problemleri de incelenmiştir. Son
olarak mevcut teknolojinin bugünkü durumu, gelecekteki beklenti ve umulan gelişmeleri de gözden geçiril-
miştir. Bu çalışmanın Eklemeli İmalat konusunda araştırma yapmak isteyenlere temel ve basit düzeyli bir
referans olacağı umulmaktadır.

Kaynaklar

- [1] S. Mellor, L. Hao, D. Zhang, Additive Manufacturing: A Framework for Implementation, Int. J. Production Economics, 149 194–201, 2014.
- [2] W. Gao, Y. Zhang, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, Computer-Aided Design, 69 65–89, 2015.
- [3] J. Kietzmann, L. Pitt, Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing, Business Horizons, 58 209-215, 2015.
- [4] David Bak, Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter, Assembly Automation, Vol. 23 Iss 4 pp. 340 – 345, 2003.
- [5] H. Lan, Y. Ding, A web-based manufacturing service system for rapid product development, Computers in Industry, 54 51–67, 2004.
- [6] İ. Çelik ve F. Karakoç, HIZLI PROTOTİPLEME TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMA ALANLARI, Dumlupınar Ün. Fen Bil. Ens. Dergisi, S. 31, 1302–3055, 2013.
- [7] http://usglobalimages.stratasys.com/Image%20Gallery/absplus_shock.jpg?v=635532100429118372#_ga=1.249705024.799130089.1489424458
- [8] http://usglobalimages.stratasys.com/Image%20Gallery/3d_printed_hairbrush_prototype.jpg?v=635460327849450417#_ga=1.146455223.227911709.1489952834
- [9] <https://people.eecs.berkeley.edu/~sequin/SFF/SLStexas.HeptoroidFl.jpg>
- [10] <http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/facilities/RP/SLA/viper.html>
- [11] <http://mtc.engr.mun.ca/prod.html>

- [12] P. Popoola, G. Farotade, Laser Engineering Net Shaping Method in the Area of Development of Functionally Graded Materials for Aero Engine Applications A Review, Fiber Laser, ISBN 978-953-51-2257-9, 2016.
- [13] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9907/Hofmeister/Hofmeister-9907.fig.1.lg.gif>
- [14] S. Nelaturi, V. Shapiro, Representation and analysis of additively manufactured parts, Computer-Aided Design, 67–68 13–23, 2015.
- [15] C. Weller, R. Kleer, Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, Int. J. Production Economics, 164 43–56, 2015.
- [16] M. Baumers, P. Dickens et al., The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push, Tec. Forecasting & Soc. Ch., 102 193–201, 2016.
- [17] R. Huang, M. Riddle et al., Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components, J. of Cleaner Production, 135, 1559-1570, 2016.
- [18] D. Wu, D. W. Rosen et al., Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation, Com.-Aided Design, 59 1–14, 2015.



OTOMASYONCU

MAKİNA OTOMASYON VE HAREKET SİSTEMLERİ ELEKTRO - MEKANİK MARKET .net

ÜRÜNLER

3D PRINTER MALZEMELERİ
STEP MOTOR & SÜRÜCÜ
SERVO MOTOR & SÜRÜCÜ
SPINDLE MOTOR & INVERTER
SIGMA PROFİL
AD-DC MOTOR
DOĞRUSAL HAREKETLER
KABLO KANALI
KABLolar
KONVEYÖR MARKET
GÜÇ KAYNAĞI TRAFO SMPS
LINEER KIZAK RAY-ARABA
LINEER KROM MİL- ARABA
VİDALI MİL VE SOMUNLARI
BK BF FK FF UFL RULMAN
MİL TUTUCU SK-SHF
CNC EL ÇARKI
KREMAYER DİŞLİ & PİNYON
TRİGER KASNAK – KAYIŞ
KAPLİN- MOTOR FLANŞI
AYAK- TEKER
PLANET REDÜKTÖR
SWITCH- SENSOR
ELEKTRİK ÜRÜNLERİ
DELTA PLC- DOP EKRAN HMI
ENCODER AUTONICS
LINEER MODUL
CNC ROUTER
DİJİTAL KOORDİNAT EKRANI
YAĞLAMA SİSTEMLERİ



3D PRINTER MALZEME



EXTRUDER



GT2 KASNAK



ÇETİNKAYA MAKİNA OTOMASYON

Adres: 2254 Cad. No:15

Tel: 0312 394 42 07

Web: otomasyoncu.net

E-mail: info@otomasyoncu.net



OTOMASYONCU

MAKİNA OTOMASYON VE HAREKET SİSTEMLERİ ELEKTRO - MEKANİK MARKET *.net*



3B CAD bulutta yeniden icat edildi

İzinizi bırakın

Ürünleri üretme ve tüketme alışkanlıklarımız değişiyor. Öğrencilerin, mezun olduklarında ürünleri piyasaya farklı yollarla sunmaya hazır olmaları gerekiyor. Bu nedenle Autodesk, 3B CAD/CAM'i en baştan tekrar tasarladı. Autodesk® Fusion 360™ bu türdeki ilk 3B CAD, CAM ve CAE aracıdır. Öğrenciler Fusion 360'a ücretsiz erişebilir.

Ne yapacaksınız?

Fusion 360 öğrenciler için ücretsiz*
autodesk.com/fusion360-students

*Ücretsiz Autodesk yazılımları ve/veya bulut tabanlı hizmetler, ilgili yazılım ve bulut tabanlı hizmetler için geçerli olan yazılım lisans sözleşmelerinin hüküm ve koşulları ile hizmet şartlarının kabul edilmesini gerektirir ve bu şartlara tabidir. Eğitim lisansına tabi yazılım ve bulut tabanlı hizmetler yalnızca Eğitime Yönelik Amaçlar doğrultusunda kullanılabilir; ticari, mesleki veya diğer kâr amacı güden faaliyetler için kullanılamaz. <http://usa.autodesk.com/legal-notices-trademarks/>

Autodesk, Autodesk logosu ve Fusion 360 ABD ve/veya diğer ülkelerdeki Autodesk, Inc. şirketinin ve/veya alt kuruluşlarının ve/veya bağlı şirketlerinin tescilli ticari markaları veya ticari markalarıdır. Diğer marka adları, ürün adları veya ticari markalar, ilgili sahiplerine aittir. Autodesk, haber vermeksizin herhangi bir zamanda ürün ve hizmet tekliflerini ve özelliklerini değiştirme hakkını saklı tutar ve bu belgede ortaya çıkabilecek baskı veya grafik hatalarından sorumlu değildir. © 2016 Autodesk, Inc. Tüm hakları saklıdır.

Autodesk, Fusion 360, and the Autodesk logo are registered trademarks or trademarks of Autodesk, Inc., and/or its subsidiaries and/or affiliates in the USA and/or other countries. All other brand names, product names, or trademarks belong to their respective holders. Autodesk reserves the right to alter product and services offerings, and specifications and pricing at any time without notice, and is not responsible for typographical or graphical errors that may appear in this document. © 2016 Autodesk, Inc. All rights reserved.

3B CAD bulutta yeniden icat edildi

İzinizi bırakın

Ürünleri üretme ve tüketme alışkanlıklarımız değişiyor. Öğrencilerin, mezun olduklarında ürünleri piyasaya farklı yollarla sunmaya hazır olmaları gerekiyor. Bu nedenle Autodesk, 3B CAD/CAM'i en baştan tekrar tasarladı. Autodesk® Fusion 360™ bu türdeki ilk 3B CAD, CAM ve CAE aracıdır. Öğrenciler Fusion 360'a ücretsiz erişebilir.

Ne yapacaksınız?

Fusion 360 öğrenciler için ücretsiz*
autodesk.com/fusion360-students

*Ücretsiz Autodesk yazılımını ve/veya bulut tabanlı hizmetler, ilgili yazılım ve bulut tabanlı hizmetler için geçerli olan yazılım lisans sözleşmelerinin hüküm ve koşulları ile hizmet şartlarının kabul edilmesini gerektirir ve bu şartlara tabidir. Eğitim lisansına tabi yazılım ve bulut tabanlı hizmetler yalnızca Eğitime Yönelik Amaçlar doğrultusunda kullanılabilir, ticari, mesleki veya diğer kar amacı güden faaliyetler için kullanılamaz. <http://usa.autodesk.com/legal-notices-trademarks/>

Autodesk, Autodesk logosu ve Fusion 360 ABD ve/veya diğer ülkelerdeki Autodesk, Inc. şirketinin ve/veya alt kuruluşlarının ve/veya bağlı şirketlerinin tescilli ticari markalarıdır. Diğer marka adları, ürün adları veya ticari markalar, ilgili sahiplerine aittir. Autodesk, haber vermeksizin herhangi bir zamanda ürün ve hizmet tekliflerini ve özelliklerini değiştirme hakkını saklı tutar ve bu belgede ortaya çıkabilecek baskı veya grafik hatalarından sorumlu değildir. © 2016 Autodesk, Inc. Tüm hakları saklıdır.

Autodesk, Fusion 360, and the Autodesk logo are registered trademarks or trademarks of Autodesk, Inc., and/or its subsidiaries and/or affiliates in the USA and/or other countries. All other brand names, product names, or trademarks belong to their respective holders. Autodesk reserves the right to alter product offerings and specifications and pricing at any time without notice, and is not responsible for typographical or graphical errors that may appear in this document. © 2016 Autodesk, Inc. All rights reserved.