

MULTİDİSİPLİNER MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARI VE UYGULAMALARI

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR

YAZARLAR

Dr. Öğr. Üyesi Berna GÜR

Dr. Öğr. Üyesi Beyda TAŞAR

Dr. Öğr. Üyesi Cengiz TEPE

Dr. Öğr. Üyesi Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR

Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR

Öğr. Gör Serkan GÖK

Levent YAVAN



IKSAD
Publishing House

MULTİDİSİPLİNER MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARI VE UYGULAMALARI

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR

YAZARLAR

Dr. Öğr. Üyesi Berna GÜR

Dr. Öğr. Üyesi Beyda TAŞAR

Dr. Öğr. Üyesi Cengiz TEPE

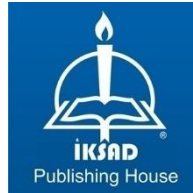
Dr. Öğr. Üyesi Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR

Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR

Öğr. Gör Serkan GÖK

Levent YAVAN



Copyright © 2020 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced,
distributed or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other
noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic
Development and Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TURKEY TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2020©

ISBN: 978-625-7897-56-3
Cover Design: İbrahim KAYA
June / 2020
Ankara / Turkey
Size = 16 x 24 cm

İÇİNDEKİLER

EDİTÖRDEN

ÖNSÖZ

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR 1

BÖLÜM 1

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLECEK PA 2200 BRAKET PARÇANIN TASARIMI VE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Dr. Öğr. Üyesi Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK, Öğr. Gör Serkan GÖK 3

1. MATERYAL VE METOT 9

2. BULGULAR 12

3. SONUÇLAR 17

KAYNAKÇA 19

BÖLÜM 2

BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ KİMYASAL BİLEŞİMLERİ İLE ÜST ISI DEĞERLERİ ARASINDA YENİ BİR MODEL EŞİTLİK GELİŞTİRİLMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR, Dr. Öğr. Üyesi Beyda TAŞAR 21

GİRİŞ 23

BİYOKÜTLE ENERJİSİ 24

MATERYAL VE METOT 28

BULGULAR VE TARTIŞMA 31

SONUÇ 40

KAYNAKÇA 41

BÖLÜM 3

S7 1200 PLC İLE STEP MOTOR HAREKET KONTROL DÜZENEGİ TASARIMI

Levent YAVAN, Dr. Öğr. Üyesi Cengiz TEPE.....	45
GİRİŞ	47
1. DENEY DÜZENEGİ TASARIMI	49
2. DONANIMSAL ALT YAPI	52
3. YAZILIMSAL ALT YAPI	55
TARTIŞMA VE SONUÇ	56
KAYNAKÇA	59

BÖLÜM 4

ÇALIŞMA ORTAMININ ERGONOMİK AÇIDAN ANALİZİ: HİTİT ÜNİVERSİTESİ ÖRNEĞİ

Dr. Öğr. Üyesi Berna GÜR	61
1. GİRİŞ	63
2. ARAŞTIRMANIN AMACI	66
3. EVREN VE ÖRNEKLEM.....	66
4. VERİ TOPLAMA ARACI.....	67
5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	67
SONUÇ	78
KAYNAKLAR	83

BÖLÜM 5

MİKRO ELEKTROMEKANİK SİSTEMLERİN ÜRETİMİ İÇİN KULLANILAN EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR.....	85
GİRİŞ	87
1. EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ	90
2. TARTIŞMA	113
3. SONUÇ	114
KAYNAKÇA	116

ÖNSÖZ

Kökünü Arapçaya dayanan “Mühendis” kelimesi, hendese yani geometri ile meşgul olan kişileri nitelemekle birlikte, modern anlamda mühendis, bilim insanları tarafından ortaya konulan teorik bilgileri, teknik personelin uygulayabileceği pratik forma dönüştüren kişi olarak tanımlanmaktadır. Mühendis ve mühendislik biliminin temel amacı toplumun gerçek problemlerine en ekonomik ve en elverişli çözümleri üretmektir. Mühendis, toplumun problemlerine çözüm üretirken ekonomi, zaman, malzeme, sürdürülebilirlik vb. parametreleri birlikte göz önünde bulundurabilmeli, çeşitli alternatifleri aynı anda değerlendirebilmeli ve en uygun çözüme karar verebilmelidir. Bu da probleme sistematik olarak bakmayı, parçaları birleştirip bütünü görebilmeyi, neden sonuç ilişkileri kurabilmeyi, güncel bilgileri takip etmeyi uygulayabilmeyi ve multidisipliner çalışma sistematiğini benimsemeyi gerektirmektedir. Mühendislik biliminde bilim insanı olmak ise tüm bunlara ek olarak, AR-GE çalışmaları yapmayı ve bu çalışmaların çıktılarını şeffaf bir şekilde, uygun platformlarda sunmayı, literatüre katkıda bulunmayı gerektirmektedir. Bu bakış açısı ve amaçla, incelediğiniz bu kitapta mühendislik alanında çalışmalar yürüten bilim insanlarının, yaptıkları multidisipliner araştırmalar ve derlemeler bölümler halinde bir araya getirilmiş ve siz değerli araştırmacıların dikkatine sunulmuştur.

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR

BÖLÜM 1
EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLECEK PA 2200
BRAKET PARÇANIN TASARIMI VE TOPOLOJİ
OPTİMİZASYONU

Dr. Öğr. Üyesi Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK¹, Öğr. Gör Serkan GÖK²

¹ İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. dilsadakgumus@gmail.com

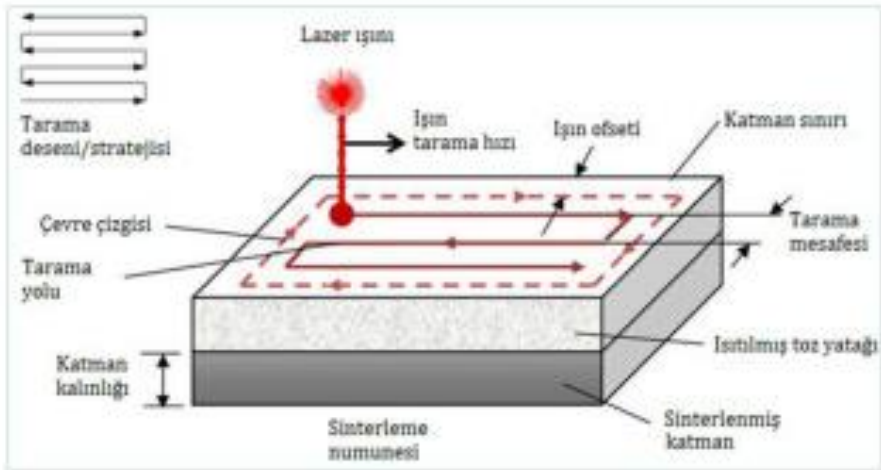
² İstanbul Aydın Üniversitesi, Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye. srkngokk@gmail.com

GİRİŞ

Günümüzde sık rastladığımız üretim yöntemlerinden olan talaşlı imalat yöntemi yaratmış olduğu talaşlar nedeni ile malzeme israfına ve kullanılan kimyasallar nedeni ile de çevre kirliliğine sebep olmasından ötürü yerini eklemeli imalat yöntemlerine bırakmaya başlamıştır. Yeni bir teknoloji olan eklemeli imalat teknolojileri ise malzemenin üzerinden talaş kaldırıp malzeme israfı yaratmak yerine, malzemeye bir kuvvet uygulamadan ve talaş çıkarmadan parça üretebilmektedir. Böylece malzemedan ciddi oranlarda tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçaların geleneksel talaşlı imalat yöntemi ile üretilen parçalardan çok daha iyi mekanik özellikler gösterdiği günümüz literatür bilgilerinde yer almaktadır (Tong ve ark., 2020; Duman ve Kayacan, 2017).

Eklemeli imalat teknolojileri ürünleri 3 boyutlu (3B) modelleri üzerinden katmanlı şekilde birleştirme ve oluşturma yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere tüm malzeme grubuna hitap etmektedir. Hızlı üretim aşamaları, kaliteli ürün eldesi ve maliyeti azaltma amacı ile eklemeli imalat teknolojilerine olan yönelim gün geçtikçe artmaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerinden olan ve çalışma kapsamında yer verilen Seçici Lazer Sinterleme (SLS) tekniği ile tozlar katmanlar şeklinde serme mekanizması üzerine uniform olarak yatırılırlar ve bu tozlar lazer ışını yardımı ile birleştirilerek parça üretimi gerçekleştirilir. Bu yöntem ile mekanik özelliklerin geleneksel üretim yöntemlerine göre çok daha üstün olduğu ürünler elde edilmektedir. Mekanik

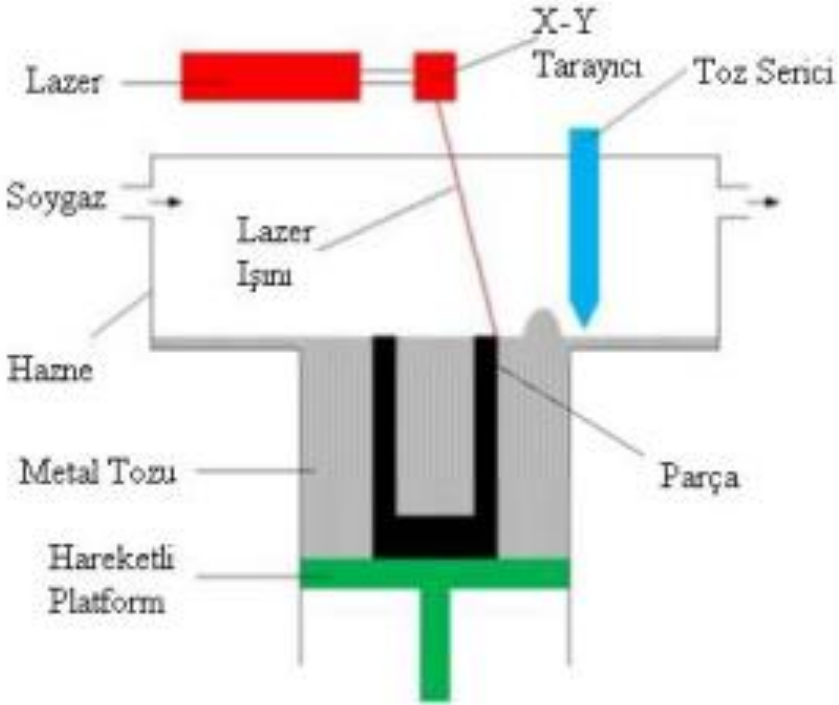
özelliklerde meydana gelen iyileşmeler katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesi gibi farklı işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. SLS teknolojisi ile karmaşık geometrilere sahip olan parçalar tam otomatik sistem sayesinde talaş kaldırma ihtiyacı duyulmadan hızlı bir şekilde üretilmektedirler. Bu sebeple yöntem, hızlı döküm ve kalıp için gerekli parçaların imalatı için tercih edilmektedir (Hussain ve ark., 2019; Yan ve ark., 2016). Şekil 1’de SLS tekniğinin işlem parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 1: Seçici Lazer Sinterleme (SLS) Tekniği İşlem Parametrelerinin Şematik Gösterimi (Duman ve Kayacan, 2017)

Seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminde, ısıtıldığında veya eridiğinde birleşebilen toz haldeki hammaddeler kullanılır. İlk aşamada belirlenen katman kalınlığına uygun olarak hareketli bir mekanizmaya tozlar serilir ve malzemenin belirlenen yüzeyleri lazer ışını yardımı ile taranır. Sinterleme işlemi 50-300 Watt gücündeki lazerler ile gerçekleştirilir. Sonrasında lazer ışını etkisi ile sinterlenen veya eriyen tozlar

birbirlerine yapışarak birleşir. Bu aşamaların tamamlanmasından sonra belirlenen katman kalınlığı (sayısı) kadar işlem tekrarlanır. Bu süreç çoğu zaman azot veya argon gazı bulunan ortamda gerçekleştirilir (Dadbakhsh ve ark., 2017; Tong ve ark., 2020). İstenen katman kalınlığı elde edildikten sonra üç boyutlu parça elde edilmiş olur. Son aşama olarak elde edilen parça manuel olarak veya vakumlu bir sistem tarafından temizlenir. Şekil 2’de SLS tekniğinin şematik gösterimine yer verilmiştir.

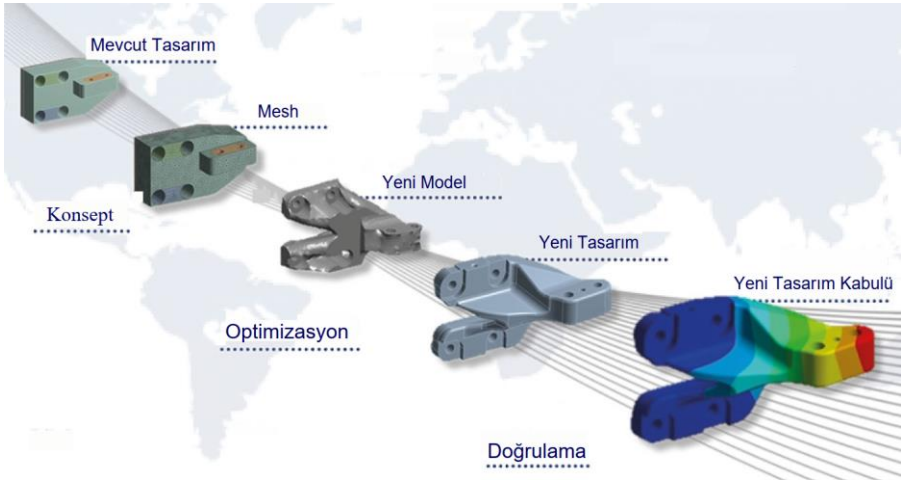


Şekil 2: Seçici Lazer Sinterleme Teknolojisi Şematik Resmi

Teknolojinin hızla ilerlemesi ile birlikte, hafif ve dayanımı yüksek olan parçaların tasarımı ve tasarlanan bu parçaların üretilebilmeleri oldukça

önemli hale gelmiştir. İdeal parça formuna ulaşabilmek için parça üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Optimizasyon işlemleri ile parça boyutlarında değişiklikler yapılarak ideal parça geometrileri elde edilmektedir. Topoloji optimizasyonu ile tasarımı yapılan parçanın malzeme dağılımı optimize edilir ve parçanın dayanımın en az etkileyen alanlar belirlenerek parça formundan eksiltilir (Dong ve ark., 2020; Tang ve ark., 2015).

Topoloji optimizasyonunun ilk aşamasında mevcut parçanın katı modeli üzerinde optimizasyon yapılacak bölge tanımlanır. Sonrasında parçada belirli kısıtlamalara gidilerek yük uygulaması yapılır. Analiz aşamasından sonra oluşan parça tamamlanmasından sonra elde edilen parça gözlemlenir. Uygun form yapısının ve değerlerin oluşmaması halinde optimizasyon ve analiz aşamaları tekrar edilir. Şekil 3'te örnek bir topoloji optimizasyon aşamalarına yer verilmiştir.



Şekil 3: Örnek Bir Topoloji Optimizasyon Aşamaları

Çalışma kapsamında PA 2200 malzemesi kullanılarak eklemeli imalat teknolojilerinden seçici lazer sinterleme yöntemi ile üretilecek olduğu belirlenmiş ve mevcut tasarımı belli olan braket tutucu parçanın Solidworks programı ile modellemesi yapılmıştır. Modellemesi tamamlanan parçanın Solidworks Simulation ile sonlu elemanlar analizi ve optimizasyon aşaması gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak ideal forma ve malzeme dağılımının düzenlemesiyle hafiflemesi sağlanan braket parçanın üretilebilir olduğu belirlenmiştir.

1. MATERYAL VE METOT

Çalışmada eklemeli imalat yöntemlerine uygun olan PA 2200 (Polyamide 12 white) polimer toz malzemesi seçilmiştir. Yüksek mekanik ve ısıl dirence sahip olan malzeme yüksek kalitede fonksiyonel parça üretimi ve çeşitli prototipleme uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. PA 2200 ile üretilen prototip ve nihai ürünler formlarını uzun süre koruyabilir. Sıkı bağ ve düşük yoğunluğa sahip PA 2200 tozları ile üretilen prototip ve son kullanıcı ürünlerinin bir başka özelliği de hafif olmalarıdır. Şekil 4'te toz formunda kullanılan malzeme görülmektedir.



Şekil 4: SLS Yöntemi için Hazırlanana PA 2200 Malzemesi

PA 2200 malzemesi yüksek mekanik ve termal yüklere kolayca dayanmaktadır. Seçilen PA 2200 malzemesi için katman kalınlığı üretici firma tarafından 0.15 mm olarak belirlenmiştir. PA 2200 malzemesinin mekanik ve termal özelliklerine Tablo 1’de yer verilmiştir.

Tablo 1: PA 2200 Malzemesinin Mekanik ve Termal Özellikleri

Ortalama tane boyutu	60 μm
SLS yöntemi parça yoğunluğu	0.9 – 0.95 g/cm^3
Çekme dayanımı	45 MPa
Akma dayanımı	20 MPa
Kopma uzaması	%20
Elastik modül	1240 MPa
Charpy darbe dayanımı	53 kJ/m^2
Izod darbe dayanımı	32.8 kJ/m^2
Çentikli darbe dayanımı	4.4 kJ/m^2
Sertlik	77.6 HRc
Erime noktası	172-180 $^{\circ}\text{C}$
Yumuşama sıcaklığı	163 $^{\circ}\text{C}$

Bu çalışma kapsamında otomotiv sanayisinde kullanılmakta olan ve şasi bağlantılarında tutucu olarak görev yapan braket tasarımı ve tasarımı yapılan parçanın optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işlemi tamamlanan braket parça üretimi seçici lazer sinterleme tekniği ile SHINING 3D marka cihazının EP-P380 modelinde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Şekil 5’te SLS tekniğinin kullanıldığı cihaz görülmektedir.



Şekil 5: SLS Teknolojisi Kullanılan 3D Yazıcı

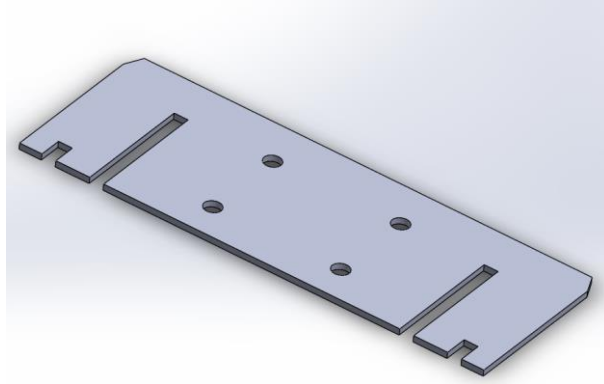
PA 2200 toz halinde cihaza belirlenen giriş parametrelerinde iki taraflı toz yayma mekanizması ile otomatik olarak yüklenmektedir. Toz malzemenin üzeri lazer ışını yardımı ile taranarak ve 55 watt gücündeki lazerler ile sinterleme işleminin gerçekleştirilebileceği belirlenmiştir. Sinterleme işleminin ardından tozlar birbirlerine yapışarak optimizasyona uygun olarak parça üretimi gerçekleştirilebilmektedir. PA 2200 braket parçanın seçici lazer sinterleme tekniği ile üretilmesi sırasındaki cihaza ait giriş parametrelerine Tablo 2’de yer verilmiştir. Giriş parametreleri doğrudan mekanik özellikleri etkileyeceğinden ötürü üretim sırasında uygun değerlerde seçilmesi önem arz etmektedir.

Tablo 2: SLS Tekniğine Ait Cihazın Giriş Parametreleri

Lazer gücü	55 W (CO ₂ lazer)
Tarama hızı	7.8 m/s
Katman kalınlığı	0.08 mm–0.3 mm
Tarama sistemi	Yüksek çözünürlüklü tarama galvanometresi

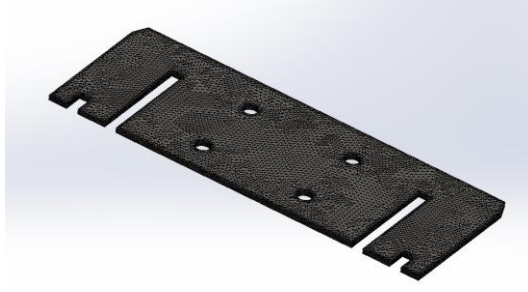
2. BULGULAR

Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojilerinden olan seçici lazer sinterleme yöntemi, üç boyutlu modeli bulunan parçanın katmanlar şeklinde oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle direksiyon iskeletini şasiye sabitlenmesine yarayan ve güç aktarımı görevi gören braket parçanın Solidworks yazılımı ile modellenmesi yapılmıştır. Şekil 6’da modellenmesi gerçekleştirilmiş olan braket parça gösterilmektedir.



Şekil 6: Modellenen Direksiyon ve Şasi Bağlantı Braket Parçası

Modellenen parça normal şartlarda 4 mm et kalınlığına sahip olup DIN 1.0490 yapı çeliğinden üretilmektedir. Parça bulunduğu konum itibari ile sürekli 50 kg statik yüke maruz kalmaktadır. Malzeme ataması tamamlanan parçanın yüzeyine mesh uygulanmıştır. Mesh uygulanan parça Şekil 7’de görülmektedir.



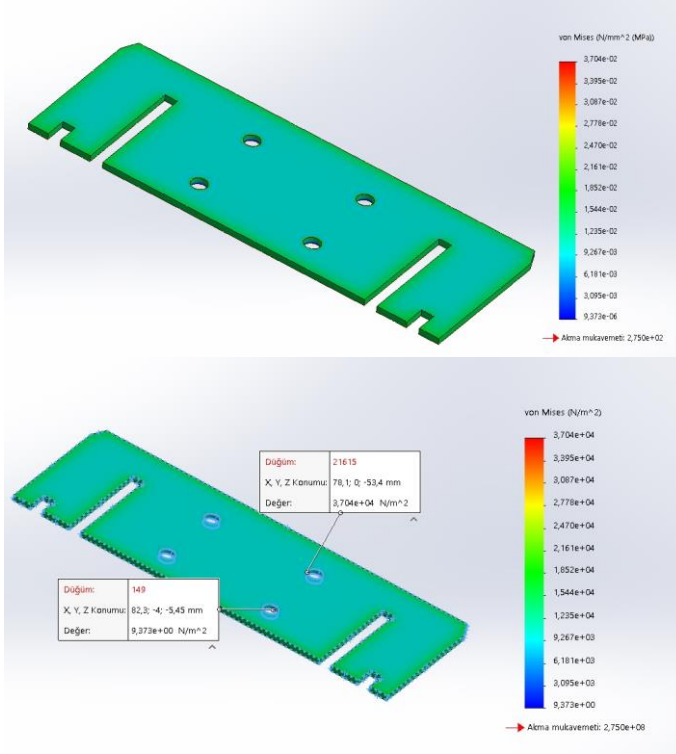
Şekil 7: Modellenen Parçanın Mesh Uygulanmış Hali

Mesh uygulanırken köşelerin mesh işlemi daha iyi analiz yapılabilmesi için inceltiştir. Tablo 3'te parça yüzeyine uygulanan mesh değerlerine ait bilgiler yer almaktadır.

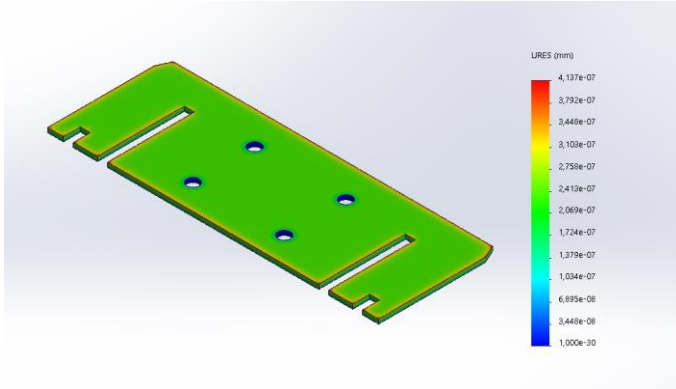
Tablo 3: Uygulanan Mesh Değerleri

Mesh kalitesi	Yüksek
Toplam düğüm	132184
Toplam eleman	76571
Maksimum en boy oranı	4.873

DIN 1.0490 yapı çeliği malzemesi atanan braket parçasının sabitlemeleri yapılarak üzerine 50 kg yük uygulanmıştır. Alınan sonuçlara göre maksimum gerilme değeri 37×10^3 Pa, minimum gerilme değeri 9373×10^3 Pa ve maksimum yer değiştirme 4.137×10^{-7} mm olarak belirlenmiştir. Bu değerler malzeme mukavemetinin, malzeme üzerine gelen yüke oranla çok yüksek olduğunu göstermiştir. Yük uygulama işlemi sonrası Şekil 8'de maksimum ve minimum gerilme bölgeleri, Şekil 9'da ise maksimum yer değiştirme bölgesi görülmektedir.

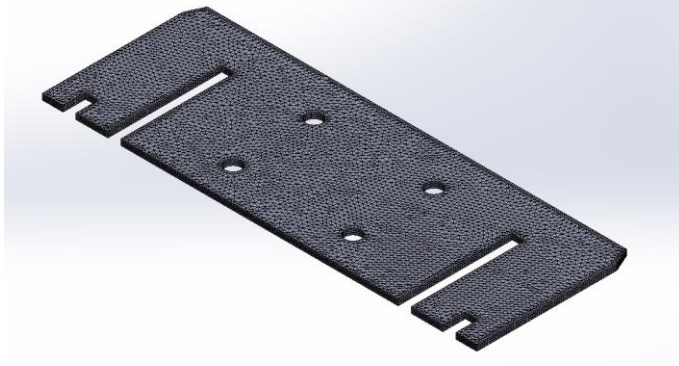


Şekil 8: Maksimum ve Minimum Gerilme Değerleri



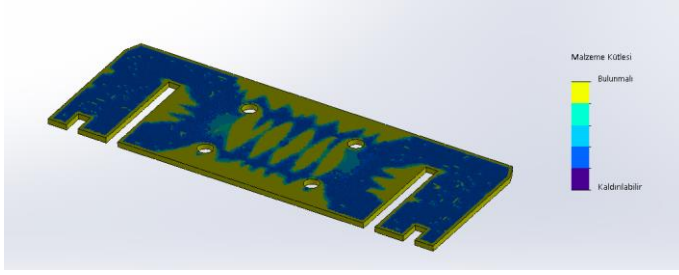
Şekil 9: Maksimum Yer Değiştirme Değeri

DIN 1.0490 yapı çeliği malzemesine göre yapılan analiz ile alınan sonuçlar ışığında modele PA 2200 malzemesi uygulanmıştır. DIN 1.0490 malzemesi ile aynı koşullarda mesh atanmış, sabitlemeler ve yüklemeler uygulanmıştır. Şekil 10’da malzeme uygulaması yapılarak mesh atılan parçaya yer verilmiştir.



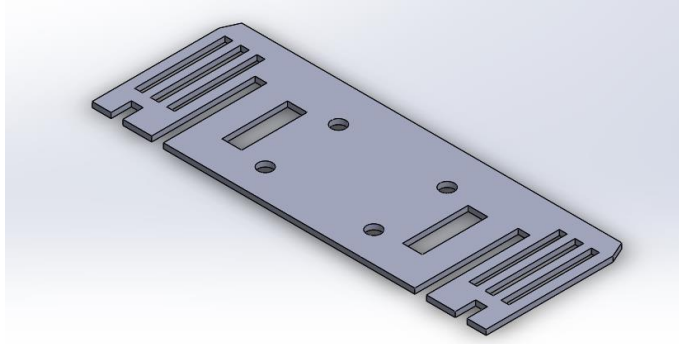
Şekil 10: PA 2200 Malzemesi Uygulanarak Mesh Atılmış Braket Parça

Gerçekleştirilen sabitlemeler ve uygulanan yüklemeler sonucunda maksimum gerilme değeri 35×10^3 Pa, minimum gerilme değeri 9373×10^3 Pa ve maksimum yer değiştirme 4.84×10^{-5} mm olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aynı boyut ve yükleme koşullarında parça üzerine uygulanan yükün PA 2200 malzemesi tarafından da güvenlik faktörü ile karşılayabileceği görülmüştür. Bu durumda malzemedен tasarruf etme olasılığı da ortaya çıkmıştır. Böylelikle PA 2200 malzemesi atanan modele topoloji etüdü uygulanmıştır. PA 2200 malzemesi ile oluşturulan model ağırlığı ile topoloji etüdü sonrası oluşturulabilecek malzemenin arasında yaklaşık %20 oranında malzeme tasarrufu sağlanacağı görülmüştür. Şekil 11’de topoloji etüdü gerçekleştirilmiş olan braket parça görülmektedir.



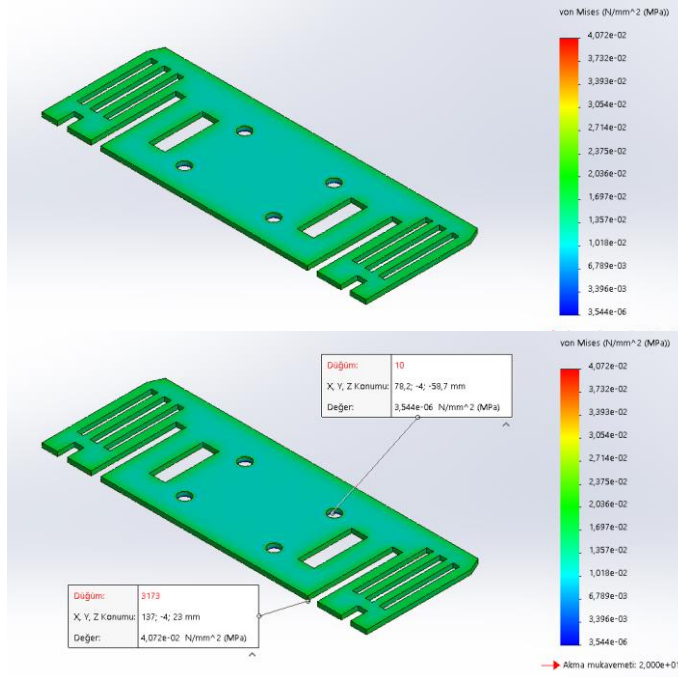
Şekil 11: Topoloji Etüdü Gerçekleştirilmiş Braket Parça

Topoloji etüdündeki bölgeler dikkate alınarak Şekil 12’de görüldüğü gibi modelde %15 malzemeden tasarruf sağlanacak şekilde değişiklikler yapılmış ve tekrar aynı koşullarda analize tabii tutulmuştur.

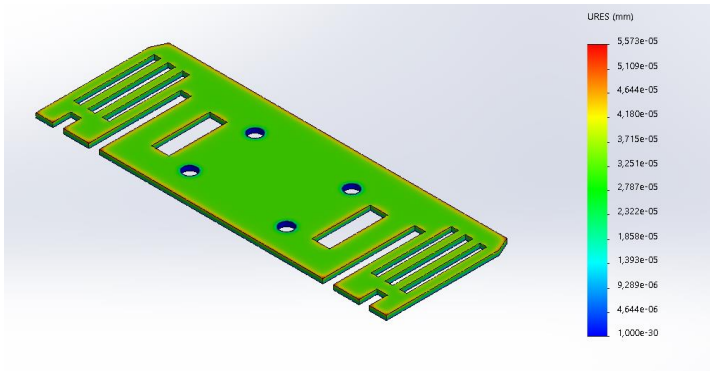


Şekil 12: % 15 Malzeme Tasarrufu Sağlanmış Braket Parça

Analize tabii tutulan parçanın maksimum gerilme değeri 40×10^3 Pa, minimum gerilme değeri 3.54×10^{-6} Pa ve maksimum yer değiştirme 5.57×10^{-5} mm olarak belirlenmiştir. Alınan sonuçlar yeni modellemenin aynı koşullar altında çalışabileceğini göstermektedir. Optimizasyon sonrası Şekil 13’de maksimum ve minimum gerilme bölgeleri, Şekil 14’de ise maksimum yer değiştirme bölgesi görülmektedir.



Şekil 13: Optimizasyon Sonrası Maksimum ve Minimum Gerilme Değerleri



Şekil 14: Optimizasyon Sonrası Maksimum Yer Değiştirme Değeri

3. SONUÇLAR

PA 2200 malzemesi ile üretilecek olan braket parça DIN 1.0490 yapı çeliği malzemesinden yapılan braket parçanın yüklenme durumunu aynı boyut ve ölçülerde karşılayabilmektedir. Topoloji etüdü dikkate

alınarak PA 2200 malzemesi ile modellenen braket parçada yapılan optimizasyon sayesinde malzemeden %15'a kadar tasarruf sağlanarak ideal forma ulaşılmıştır.

Modellenen braket bir araçta 2 adet olarak kullanılmakta olup, günde 16 araç üretim bandından çıkmaktadır. Böylelikle sadece malzemeden kaynaklı olarak günde yaklaşık 5 adet braket tasarrufu sağlanabileceği görülmektedir.

Seçici lazer sinterleme (SLS) tekniğinin başlangıçta maliyeti yüksek olsa da çevre kirliliği, malzeme israfı ve soğutma hızı gibi artı yönlerine ek olarak sadece bu braket parçanın seri üretiminde bile kısa sürede maliyetini karşılayabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Dadbakhsh, S., Verbelen, L. and Verkinderen, O., (2017). Effect of PA12 Powder Reuse on Coalescence Behaviour and Microstructure of SLS Parts, *European Polymer Journal*, 92, 250-262.
- Dong, G., Tang, Y. and Li, D., (2020). Design and Optimization of Solid Lattice Hybrid Structures Fabricated by Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing*, 33, 1-12.
- Duman, B. and Kayacan, C., (2017). Predicting the Mechanical Properties of the Part Produced by Direct Metal Laser Sintering/Melting Method, *SDU Journal of Technical Sciences*, 7(1), 12-28.
- Hussain, G., Khan, W.A. and Ashraf, H.A., (2019). Design and Development of a Lightweight SLS 3D Printer with a Controlled Heating Mechanism: Part A, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4), 373-378.
- Tang, Y., Kurtz, A. and Zhao, A.F., (2015). Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) Based Design Method for Lattice Structure to be Fabricated by Additive Manufacturing, *Computer-Aided Design*, 69, 91-101.
- Tong, Q., Xue, K. and Wang, T., (2020). Laser Sintering and Invalidation Composite Scan for Improving Tensile Strength and Accuracy of SLS Parts, *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1-11.
- Top, N., Gokce, H. and Sahin, İ., (2019). Topology Optimization for Additive Manufacturing: An Application on Handbrake Mechanism, *Journal of Selcuk-Technic*, 18(1), 1-13.
- Yan, M., Zhou, C. and Tian X., (2016). Design and Selective Laser Sintering of Complex Porous Polyamide Mould for Pressure Slip Casting, *Materials & Design*, 111, 198-205.

BÖLÜM 2

BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ KİMYASAL BİLEŞİMLERİ İLE ÜST ISI DEĞERLERİ ARASINDA YENİ BİR MODEL EŞİTLİK GELİŞTİRİLMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda TAŞAR¹, Dr. Öğr. Üyesi Beyda TAŞAR²

¹ Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, 23279, Elazığ.
sydtasar@firat.edu.tr

² Fırat Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 23279, Elazığ.
btasar@firat.edu.tr

GİRİŞ

Biyokütlenin Yapısı ve Kimyasal Bileşenleri

Biyokütle terimi, ana bileşenleri karbonhidratlar olan hayvansal ya da bitkisel menşeli tüm organik maddeleri kapsamaktadır. Kimyasal bileşimleri ve morfolojik yapıları fosil enerji kaynaklarından oldukça farklı olan biyokütle kaynakları, karmaşık bir yapıya sahiptir. Biyokütle kaynaklarının genel olarak yüksek oranda oksijen içeren organik polimerik yapılardan oluştuğu söylenebilir. Biyokütlenin yapısındaki temel bileşenler iki temel grupta ele alınabilir. Bunlar;

- (i) Yüksek molekül ağırlıklı polisakkaritler (selüloz, hemiselüloz) ve lignin,
- (ii) Düşük molekül ağırlıklı organik maddeler (ekstraktifler) ile anorganik (kül) maddelerdir (Mohan, 2006).

Lignoselülozik yapılı biyokütle kaynaklarının ana bileşeni kabul edilen ve bitkisel menşeli biyokütle türlerinde hücre duvarındaki miktarı, hücrenin yapısı ve evresine göre değişiklik gösteren selüloz, β -1, 4-D glukopiranoz ünitelerinin düz zincirlerle birbirine bağlanması sonucu teşekkül etmektedir (McKendry 2002).

Selüloz mikrofibrillerini destekleyici görev üstlenen hücre duvarında selüloz ve pektin ile birlikte bulunan hemiselüloz, bir heteropolisakkarittir. Heksoz şekerler (mannoz, glukoz, galaktoz gibi), pentoz şekerler (ksiloz, arabinoz gibi) ve şeker asitlerinden teşekkül etmektedir (McKendry 2002; Mohan ve ark. 2006). Hemiselüloz

biyokütle kaynağına göre ksilan yada glukomannan formunda bulunabilmektedir (Pasha vd., 2013).

Hücre duvarında su ve besinlerin iç dolaşımını sağladığı ve mikroorganizma saldırılarına karşı direnci arttırdığı bilinen lignin, biyokütlerde selüloz ve hemiselülozdan sonra en yaygın bulunan üçüncü biyopolimerdir (Lu ve Ralph, 2012). Yapısı ve bileşimi biyokütle türleri arasında önemli ölçüde farklılık göstermekle birlikte lignin, temel olarak üç aromatik birimden oluşmaktadır. Bunlar; hidroksifenil ünitesi içeren p-kumaril alkol, guasil ünitesi içeren koniferil alkol ve siringil ünitesi içeren sinapil alkoldür (Max vd., 2010, Sun vd.,1997; Sun vd. 2001; Palonen, 2004).

Su ve alkol gibi polar çözücüler ya da toluen ve hegzan gibi apolar çözücüler ile biyokütle kaynaklardan özütlenebilen maddeler, ekstraktif maddeler olarak tanımlanmaktadır. Tanen, zambak, terpenler, boya maddeler, pektin, reçine, vaks, organik asitler, protein, fenolik bileşikler, alkaloidler ve yağlar ekstrakte edilebilen maddelere örnek olarak sayılabilmektedir (Mohan vd. 2006).

BİYOKÜTLE ENERJİSİ

Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin, tükettikleri ve ürettikleri enerji miktarları ile ilişkili olduğu kabul edilmektedir. 1970 yılından sonra, toplumsal kalkınma çabalarının en önemli girdilerinden biri olan enerjinin; temiz, ucuz ve sürdürülebilir şekilde temin edilmesidir önem arz etmektedir. Bu amaçla son yıllarda, yenilenebilir ve sürdürülebilir alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasına yönelik ulusal politikalar

geliştirilmektedir. Yapılan çalışmalar ve değerlendirmeler sonucunda, biyokütle enerjisinin, gelecekte rekabetçi ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olma potansiyeline sahip olacağı düşünülmektedir. Doğal biyokütle kaynaklarından ısı enerjisi üretim maliyeti fosil yakıttan kıyasla daha pahalı olsa da, enerji üretimi için belediye katı atıkları, endüstriyel atıklar, tarımsal ve ormansal biyokütle atıklarının enerji hammaddesi kullanılması durumunda enerji üretim maliyetinin düşürülebileceği öngörülmektedir.

Endüstriyel anlamda biyokütle enerjisi, yaşayan ya da yakın zamanda yaşamış biyolojik kökenli organik atıkların/kaynakların enerji hammaddesi olarak kullanılması durumunda üretilen enerjidir. Biyokütle enerjisi, alternatif yenilenebilir enerji kaynakları içinde en büyük teknik öneme ve potansiyele sahip enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir (Baxter 2005).

Biyokütle enerjisinin, teknik öneme sahip alternatif enerji kaynağı olarak kabul edilmesindeki en önemli sebepler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Hasat edilen biyokütle tekrar yetiştirilmek istenirse enerji üretimi esnasında atmosfere salınan CO₂ yeniden büyüme döngüsüne gireceği için, enerji üretimi sırasında atmosfere net bir CO₂ salınımının olmadığı kabul edilmektedir. Yani, yakılmaları ile atmosfere hiç net CO₂ salınımı olmadığı için küresel ısınmaya yol açmazlar (Jenkins ve ark. 1998)

- Fosil enerji kaynaklarına kıyasla biyokütle kaynakları çok daha düşük miktarda azot ve kükürt içerirler. NO_x emisyonları fosil yakıtlara göre yanma sıcaklığının düşük olması sebebiyle çok düşüktür (Gonzalez ve ark 2004; Türe 2001). Bu nedenle, yakma tesislerine yakın bölgelerdeki alanlarda asit yağmurlarına sebep olmazlar.

Biyokütle kaynaklarının ısı içeriği, biyo-yakıtın tamamen yanması durumunda, yakıtın birim kütlesi başına salınan enerji olarak ifade edilir. Biyokütle kaynaklarının direk yakılması yoluyla elde edilen net ısı 8 MJ/kg ile 20 MJ/kg arasında değişmektedir. Biyokütle kaynaklarının net yanma ısısı kalori tayini ile belirlenebilmektedir. Ancak kalori tayini gerek tayin öncesi ön hazırlıklar gerektirmesi gerekse, ölçüm ve hesaplama prosedürleri sebebi ile oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle biyokütle kaynaklarının ısıl değerinin hesaplanmasında daha basit olarak yapılabilen analiz sonuçlarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, biyokütle kaynaklarının elementel, proximate veya kimyasal bileşimleri ile kalori değerlerinden hesaplanması (tahminine) yönelik olarak ampirik eşitlikler geliştirilmeye çalışılmıştır (Meraza ve ark. 2002; Meraza ve ark. 2003; Sheng ve Azevedo 2005; Demirbas ve ark. 1997; Demirbaş 1998a, Demirbaş 1998b; Parikhetal. 2007; Demirbas 2009; Garcia ve ark. 2014; Demirbas ve Ghamdi, 2015). Sunulan çalışmalarda, kimyasal bileşime dayalı olarak geliştirilen korelasyonların, elementel ve proksimate analize dayalı korelasyonlara kıyasla daha düşük doğruluğa (hassasiyete) sahip olduğu ifade edilmiş ve bunun sebebinin ise

biyokütle kaynaklarının kimyasal bileşimlerinde gözlenen çeşitlilik olduğu vurgulanmıştır. Bu sebeple, biyokütle kaynaklarının kimyasal bileşimine, özelliklede lignin içeriğine dayalı olarak net yanma ısılarının değişimini ortaya koyan ampirik korelasyonlar geliştirilse de, bu kapsamdaki çalışmalar elementel ve proximate analiz sonuçlarına dayalı çalışmaların gölgesinde kalmıştır (Demirbas 2001; Demirbaş 2002a; Demirbaş 2003; White 1987; Telmo ve Lousada 2011). Ancak sınırlı sayıda da olsa yapılan bu çalışmalar ile, lignoselülozik yapılı biyokütle kaynaklarının, lignin içeriği ile üst ısı değerinin doğru orantılı olduğu, oldukça doğrusal bir korelasyon sunduğu anlaşılmıştır.

Türkiye mevsimsel olarak değişiklik gösterse de tarımsal ve ormansal atık tür çeşitliliği ve rezervleri oldukça yüksek olan bir ülkedir. Bu atıkların verimli ve sürdürülebilir olarak değerlendirilmesinin, ekonomik olarak önemli bir katma değer oluşturabileceği düşünülmektedir. Farklı bileşim ve kalorifik değerdeki atık biyokütle türlerinden karışım oluşturulması, termal dönüşüm süreçlerine uygun kombine hammaddelerin hazırlanabilmesi ya da yakma prosesleri için ısıl verimi yüksek karışımların oluşturulabilmesi durumunda, mevcut atıklardan verimli ve sürdürülebilir enerji üretiminin önünün açılacağı ön görülmektedir.

Bu amaçla bu çalışmada, mevcut laboratuvar şartlarında, farklı tip biyokütle kaynaklarının ASTM standartlarına uygun olarak kalori tayinleri tayinleri ve kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler MATLAB 2019A paket programı yardımı ile yapılan veri analizleri ile değerlendirilmiş, kimyasal bileşim ve biyokütle

kaynaklarının üst ısı değeri arasında yeni bir model denklem (korelasyon-ampirik formül) geliştirilmiştir. Geliştirilen model eşitliğin deneysel veriler ile uyumunu ortaya koymak için yüzde hata ve mutlak sapma değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslanarak yorumlanmıştır. Ayrıca türetilen model denkleminin uygulama başarısı ve hassasiyeti literatürde bulunan farklı model denklemler ile uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan atık biyokütle niteliği taşıyan; çay posası, kayısı çekirdeği kabuğu, şeker pancarı küspesi, ceviz kabuğu, mobilya atık tozu, odun talaşları (kavak, çam, meşe, kayı) ve yarfıstığı kabuğu ev ve ticari işletmelerden temin edildi. Temin edilen atıklar, laboratuvar koşullarında atmosferik şartlarda polietilen brandalar üzerinde ön kurutma işlemine tabi tutulduktan sonra, 80 °C’de 48 saat süre ile etüvde kurutuldu. Deneysel çalışmalarda kullanılmadan önce, kurutulan atık biyokütle örnekleri gıda öğütücüsü (Renas marka) vasıtası ile öğütüldü ve laboratuvar ölçekli vibrasyonlu bir elek serisi kullanılarak fraksiyonlarına ayrıldı.

Biyokütle Kaynaklarının Isıl Değerlerin Belirlenmesi

Biyokütle atıklarının ısı değerleri, Elazığ Valiliği Çevre Ölçüm ve Analiz Laboratuvarında, Leco Ac-350 marka kalorimetre ile ASTM E 870 standardına göre yapıldı.

Biyokütle Kaynaklarının Kimyasal Analizi

Biyokütle kaynaklarının kimyasal bileşimi (ekstraktif madde, hemiselüloz, lignin ve selüloz), Li ve ark. (2004)'nin çalışmalarında detaylı olarak ifade edilen ve daha önceki çalışmalarımızda da (Taşar ve ark., 2011; Taşar ve ark. 2014) kullandığımız analitik metotlardan faydalanılarak belirlendi.

Ekstraktif madde miktarı: Biyokütle atıklarının geri soğutucu altında hacim oranları 2/1 olan toluen/etanol karışımı ile 3 saat süre ile muamele edildi. Filtrasyon ile çözücüden ayrılan katı bakiye öncelikle oda sıcaklığında daha sonra 105-110 °C'de tutulan etüvde sabit tartıma getirildi ve son tartımı alınarak ekstraktif madde miktarı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$W_1 = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada; W_1 =Ekstraktif madde yüzdesini; G_0 =Başlangıçta alınan biyokütle örneğinin miktarını (g); G_1 =Ekstraksiyon işleminden sonra kalan kalıntının miktarını (g) ifade etmektedir.

Hemiselüloz miktarı: Ekstraktif madde ekstraksiyonu sonucunda elde edilen kurutulmuş katı bakiye 500 mililitrelik bir balona konuldu ve üzerine 150 ml NaOH çözeltisi (20 g/L) ilave edildi. Katı bakiye geri soğutucu altında 1200 rpm karıştırma hızında 3.5 saat süreyle NaOH çözeltisi ile muamele edildi. İşlem sonunda katı bakiye filtrasyon ile ayrıldıktan sonra nötral pH değerine gelinceye kadar saf su ile yıkandı.

Yıkama işlemi sonrası katı bakiye sabit tartıma gelene kadar etüvde kurutuldu. Oda sıcaklığına kadar desikatörde soğutuldu ve son tartımı alınıp hemiselüloz içeriği aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplandı.

$$W_2 = \frac{G_1 - G_2}{G_0} \times 100 \quad (2)$$

Burada; W_2 =Hemiselüloz yüzdesini, G_0 =Başlangıçta alınan numune miktarını (g); G_1 =Ekstraksiyon işleminden sonra kalan kalıntı miktarını(g); G_2 =Sabit tartımdan sonra kalan kalıntının miktarını (g) ifade etmektedir.

Lignin miktarı: Ekstraktif madde miktarı tayini sonucunda kalan kalıntıdan 1.00 g örnek alındı ve sabit tartıma kadar Mettler LJ16 nem tayin cihazında kurutulmuş nemsiz madde miktarı belirlendi. Örnek 100 ml'lik balon içine konuldu, üzerine daha sonra yavaşça % 72'lik 30 ml H_2SO_4 çözeltisi eklendi ve bu karışım 24 saat süreyle 8-15 °C sıcaklık aralığında bekletildi. Bu süre sonunda örnek üzerine 300 ml saf su ilave edilip geri soğutucu altında 1 saat kaynatıldı. Karışım soğuduktan sonra filtre edildi katı bakiye sülfat iyonu kalmayana kadar (% 5'lik baryum klorür ile çökeltme testi yapıldı) saf su ile yıkandı. Son aşamada, kalıntı etüvde sabit tartıma gelene kadar kurutuldu, desikatörde soğutuldu ve tartıldı. Biyokütle kaynakları bünyesindeki lignin miktarı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$W_1 = \frac{G_4 \times (1 - W_1)}{G_3} \times 100 \quad (3)$$

Burada; W_3 =Lignin yüzdesini; W_1 =Ekstraktif madde yüzdesini; G_3 =Ekstraksiyon işlemi sonucunda kalan kalıntı miktarını (1.00) (g); G_4 =Lignin analizi sonucu sabit tartımdan sonra kalan kalıntıyı (g) ifade etmektedir.

Selüloz miktarı: Biyokütle kaynaklarının % selüloz içeriği aşağıdaki eşitlik yardımı ile farktan hesaplandı.

$$W_4 = 100 - (\% \text{Kül} + W_1 + W_2 + W_3) \quad (4)$$

Burada; W_4 =Selüloz yüzdesini, W_1 =Ekstraktif madde yüzdesini, W_2 =Hemiselüloz yüzdesini, W_3 =Lignin yüzdesini ifade etmektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

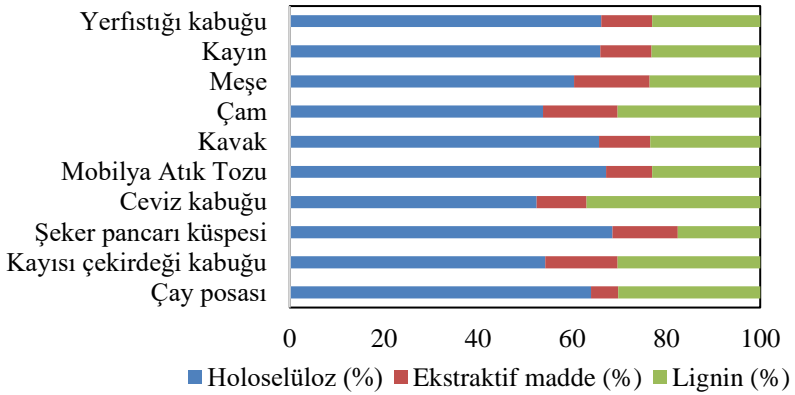
Biyokütle kaynaklarının kimyasal bileşimleri ve morfolojik yapıları birbirlerinden oldukça farklıdır. Biyokütle kaynaklarının, yapısı, yaşı ve yetiştirme koşullarına (iklim ve çevresel faktörlere) bağlı olarak farklı bileşim oranlarında hemiselüloz, selüloz ve lignin içerdiği bilinmektedir (Mohan ve ark 2006; Taşar 2011).

Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan biyokütle örneklerinin kimyasal analiz sonuçları sunulmuştur. Biyokütle örneklerinin analiz sonuçları literatürde mevcut lignoselülozik yapıya sahip olduğu bilinen biyokütle örnekleri ile karşılaştırıldığında, karakteristik olarak benzer özellikler taşıdığı sonucuna varılmıştır (Nizamuddin ve ark. 2017). Biyokütle türlerinin kimyasal analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak irdelendiğinde (Şekil 1), selülozik yapının ağırlıklı olduğunu göze

çarpmaktadır. Atıkların holoselüloz oranlarının % 52.46 ile % 68.62 arasında değiştiği görülmektedir.

Tablo 1. Biyokütle kaynaklarının kimyasal bileşimleri

Numune Adı	Kimyasal Analiz Verileri (% w)		
	Holoselüloz	Ekstraktif madde	Lignin
Ceviz Kabuğu	52.46	10.64	36.90
Çam Odun Talaşı	60.42	16.08	23.50
Çay Posası	64.03	5.820	30.15
Kavak Odun Talaşı	65.75	10.85	23.40
Kayın Odun Talaşı	66.02	10.88	23.10
Kayısı Çekirdeği Kabuğu	54.30	15.40	30.30
Meşe Odun Talaşı	53.85	15.85	30.30
Mobilya Fab. Atık Tozu	67.20	9.800	23.00
Şeker Pancarı Küspesi	68.62	13.88	17.50
Yerfıstığı Kabuğu	66.19	10.81	23.00
% holoselüloz = % hemiselüloz + % selüloz			



Şekil 1. Biyokütle örneklerinin kimyasal analiz kıyaslaması

Diğer biyokütle atıklarına kıyasla, mobilya fabrikası atık tozu (% 67.20) ve şeker pancarı küspesinin (% 68.62) holoselüloz oranının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Mobilya fabrikası atık tozunun kimyasal

analizi selülozik yapının ağırlıklı olduğu göstermektedir. Bu sonucun, çam, kavak, kayın, meşe odunlarının farklı oranlarda karışımını içerdiği bilinen mobilya fabrikası atık tozunun yapısında bulunan sert, yarı sert, yumuşak odun örnekleri ile mobilya üretiminde kullanılan yapıştırıcı vb. diğer katkıların bir sonucu olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

MALTLAB 2019A programı yardımıyla geliştirilen, biyokütle kaynaklarının kimyasal bileşimleri ile örneklerin üst ısı değerlerini ilişkilendiren denklem Tablo 2’de sunulmuştur. Ayrıca, Tablo 2’de literatürde kimyasal bileşim verilerinden biyokütle kaynaklarının ÜİD’nin hesaplanmasında kullanılan diğer model denklemlerde yer almaktadır.

Tablo 2’de verilen model denklemlerin doğrusal terimler içerdiği görülmektedir. Diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen model eşitlikler incelendiğinde; ÜİD’nin ya tek bir bağımsız değişkenin; ligninin ya da iki bağımsız değişkenin; lignin ve ekstraktif maddenin fonksiyonu olduğu göze çarpmaktadır. Sunulan çalışmalarda, genel olarak, lignoselülozik yapılu yakıtların ÜİD’lerinin, lignin içeriğinin artmasıyla arttığı ve ÜİD’nin, lignin içeriği ile doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmıştır (Demirbaş 2002a). Ayrıca, aynı yazarın farklı bir çalışmasında, ÜİD ile lignoselülozik yakıtların holoselüloz içeriği arasında doğrudan bir ilişki olmadığı ifade edilmiştir (Demirbaş, 2001b).

Tablo 2. Kimyasal bileşimden ÜID (kJ/g) hesaplamada kullanılan eşitlikler

İlişki Kurulan Değişkenler			
No	Bağımsız Değişkenler	Bağımlı Değişken	Geliştirilen Model Denklem
			$Y = 0.095582. x_2. x_3^2 - 0.45651. x_2^2. x_3 - 0.38985. x_1. x_3^2 + 0.3367. x_1. x_2. x_3 + 0.19202. x_1. x_2^2 + 0.0072004. x_1^2. x_3 - 0.11294. x_1^2. x_2 - 0.07361. x_2^3 + 0.58206. x_3^3$
*	Holoselüloz (x_1) Lignin (x_2) Ekstraktif m. (x_3)	ÜID (Y)	
1	Lignin (x_1)	ÜID (Y)	$Y = 0.0889. x_1 + 16.8218$
2	Lignin (x_2)	ÜID (Y)	$Y = 0.0864. x_1 + 16.6922$
3	Lignin (x_1) Ekstraktif m. (x_2)	ÜID (Y)	$Y = 14,3377 + 0.1228. x_1 + 0.1353. x_2$
4	Lignin (x_1)	ÜID (Y)	$Y = 0.0893. x_1 + 16.9742$
5	Lignin (x_1)	ÜID (Y)	$Y = 0.0877. x_1 + 16.4951$

*denklemler bu çalışmada geliştirilen denklemdir. 1 nolu eşitlik Phichai vd. (2013), 2-4-5. nolu eşitlikler Demirbas (2002a), 3. nolu eşitlik White (1987) çalışmasından alınmıştır.

Phichai vd. (2013) çalışmasında incelenen biyokütle örnekleri için, 1 nolu model eşitlikle hesaplanan ÜID ile deneysel ÜID arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0.9504 olduğu, hesaplanan değerle deneysel değer arasında ortalama % 0.056 fark gözlemlendiği vurgulanmıştır. Demirbas (2002a) çalışmasında, eşitlik (4 ve 5) için korelasyon katsayılarının sırasıyla, 0.9658 ve 0.9302, ortalama farklar ise % 0.045 ve % 0.067 olarak hesaplandığı bildirilmiştir.

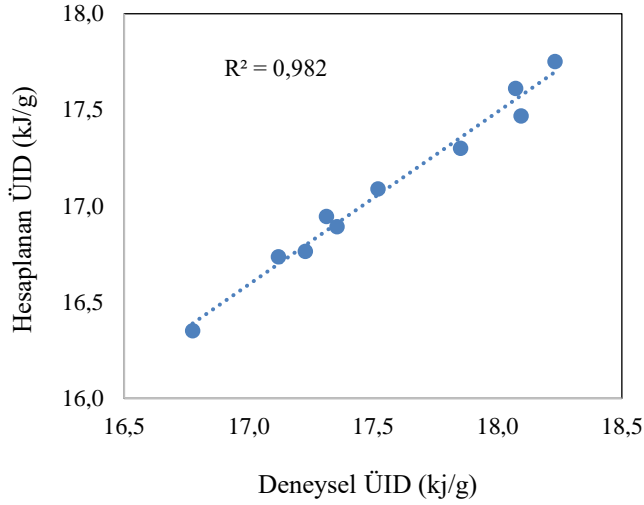
Çeşitli biyokütle türlerinin ekstraktif madde içeriği ile üst ısı değerleri arasında geliştirilen başka bir eşitlik ($ÜID = 0.00639(E^2) + 0.223(E) + 0.691$) için ise, korelasyon katsayısının 0.9748 olduğu söylenmiştir. Aynı çalışmada kül ve ekstraktif madde içeriğinin, ısıtma

değerini doğrudan etkileyen iki önemli parametre olduğu, yüksek ekstraktif madde içeriğinin yakıtlar için arzu edilen bir faktör olduğu vurgulanmıştır (Demirbaş 2002).

Bu çalışmada geliştirilen model eşitlik incelendiğinde ise, ÜID'nin lignoselülozik yapılı biyokütle kaynaklarının üç temel bileşeninin (holoselüloz, lignin ve ekstraktif madde) birden fonksiyonu olduğu görülmektedir. Geliştirilen ampirik korelasyonun bu üç değişkenin ortak etkilerini de içeren üçüncü dereceden bir polinom olduğu saptanmıştır. Bu yönüyle geliştirilen model eşitlik literatürdeki eşitliklerden oldukça farklıdır. Kimyasal bileşimleri ile üst ısı değerleri arasındaki ilişkiyi ifade eden, yeni geliştirdiğimiz model eşitlikle hesaplanan teorik üst ısı değerleri ile yüzde hata ve mutlak sapma değerleri Tablo 3'de özetlenmiştir. Ve biyokütle örneklerinin hesaplanan teorik ÜID ile deneysel ÜID arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 2'de sunulmuştur.

Tablo 3. Biyokütle kaynaklarının kimyasal analiz verilerinden hesaplanan teorik üst ısı değerleri ve karşılaştırma tablosu

Biyokütle Türü	DeneySEL ÜİD (kJ/g)	Teorik ÜİD (kJ/g)	Mutlak		Yüzde		Literatürde verilen ÜİD (kJ/g)	Referans
			Sapma	Hata %H	Hata %H	ÜİD (kJ/g)		
Ceviz Kabuğu	17.85	17.30	0.55	3.09	17.91	Goutam 2019		
Çam Odun Talaşı	16.77	16.35	0.42	2.53	20.35	Duranay 2018		
Çay Posası	18.10	17.47	0.63	3.47	17.10	Çağlar 2009		
Meşe Odun Talaşı	17.12	16.74	0.38	2.24	17.65	Duranay 2018		
Mobilya Atık Tozu	18.23	17.75	0.48	2.64	~20.0	Plis 2016		
Kavak Odun Talaşı	17.23	16.76	0.47	2.70	18.67	Gómez 2020		
Kayın Odun Talaşı	17.36	16.89	0.46	2.66	19.20	Demirbas 2017		
Kayısı Çekirdeği K.	17.52	17.09	0.43	2.46	17.70	Duranay 2018		
Şeker Pancarı K.	17.31	16.95	0.37	2.12	18.54	Perea 2018		
Yerfıstığı Kabuğu	18.07	17.61	0.46	2.56	18.12	Adiletta 2020		



Şekil 2. Hesaplanan ÜID ile deneysel ÜID arasındaki ilişki

Tablo 3 incelendiğinde hesaplanan ÜID'nin, literatürden alınan ve deneysel olarak tespit edilenler değerler ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Korelasyon katsayısının 0.982 olduğu görülmektedir. Bu çalışmada ulaşılan korelasyon değerinin literatürde sunulan diğer çalışmalarda elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum, bu çalışmada geliştirilen model eşitliğin kimyasal bileşim verileri ile ÜID hesaplama hassasiyetinin/doğruluğunun diğer eşitliklerden daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Çalışmada kullanılan biyokütle örneklerinin üst ısı değerleri irdelendiğinde en düşük ÜID'nin çam odun talaşı için 16.77 kJ/g ve en yüksek ÜID ise mobilya fabrikası atık tozu için 18.23 kJ/g olarak ölçüldüğü görülmektedir.

Elde edilen üst ısı değerlerinin, biyokütle kaynaklarının lignin ve ekstraktif madde içerikleri ile doğru orantılı olarak değişim gösterdiği göze çarpmaktadır. Bu yönüyle çalışma literatürdeki çalışmalar ile uygunluk göstermektedir. Yer fıstığı kabuğu, meşe odun talaşı, kayısı çekirdeği kabuğu ve ceviz kabuğunun ÜİD'nin diğer atık türlerine kıyasla literatürde sunulan ÜİD verilerine oldukça yakın olması, bu atıkların kimyasal bileşimlerinin yetiştirildiği bölge, iklim şartları, toprak türü ve bileşimi gibi parametrelerden daha az etkilendiği şeklinde yorumlanmıştır.

Geliştirilen model eşitliğin mevcut eşitliklerle daha detaylı kıyaslanması amacı ile Tablo 2'de sunulan ve farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen model denklemlerin, bu çalışmadaki biyokütle kaynaklarının kimyasal analiz verilere uygulanması ile elde edilen sonuçlar Tablo 4'de özetlenmiştir.

Tablo 3 ve Tablo 4 birlikte irdelendiğinde, bu çalışmada geliştirilen model eşitliğin ÜİD tahminindeki yüzde hata değerleri maksimum % 3.47 iken, diğer model denklemlerin yüzde hata değerleri sırasıyla Eşitlik 1 için; % 16.34, Eşitlik 2 için; % 15.11, Eşitlik 3 için % 20.44, Eşitlik 4 için % 17.32 ve 4. Eşitlik için % 14.17 olduğu görülmektedir.

Dikkate alınan biyokütle örnekleri için, diğer model denklemlere kıyasla, geliştirilen model denklemin tahmin doğruluğunun üç kat daha yüksektir.

Tablo 4. Literatürde sunulan model denklemlerle kimyasal analiz verilerinden hesaplanan üst ısı değeri ve yüzde hata verileri

Numune Adı	Eşitlik 1		Eşitlik 2		Eşitlik 3		Eşitlik 4		Eşitlik 5		
	ÜİD kJ/g	ÜİD % Hata	ÜİD kJ/g	ÜİD % Hata	ÜİD kJ/g	ÜİD % Hata	ÜİD kJ/g	ÜİD % Hata	ÜİD kJ/g	ÜİD % Hata	
Ceviz Kabuğu	17.85	20.10	12.61	19.88	11.36	20.31	13.76	20.27	13.54	19.73	10.53
Çam Odun Talaşı	16.77	19.52	16.34	19.31	15.11	20.20	20.44	19.68	17.32	19.15	14.17
Çay Posası	18.10	19.50	7.770	19.30	6.640	18.83	4.040	19.67	8.680	19.14	5.770
Meşe Odun Talaşı	17.23	18.90	9.710	18.71	8.620	18.68	8.420	19.06	10.65	18.55	7.650
Mobilya Atık Tozu	17.36	18.88	8.760	18.69	7.680	18.65	7.440	19.04	9.690	18.52	6.720
Kavak Odun Talaşı	17.52	19.52	11.39	19.31	10.22	20.14	14.97	19.68	12.33	19.15	9.320
Kayın Odun Talaşı	17.12	18.91	10.46	18.72	9.360	19.40	13.32	19.07	11.41	18.56	8.390
Kayısı Çekirdeği K.	18.23	18.87	3.480	18.68	2.460	18.49	1.410	19.03	4.370	18.51	1.540
Şeker Pancarı K.	17.31	18.38	6.150	18.20	5.150	18.36	6.080	18.54	7.070	18.03	4.140
Yerfıstığı Kabuğu	18.07	18.87	4.390	18.68	3.350	18.62	3.050	19.03	5.280	18.51	2.430

SONUÇ

Kalori tayininin deneysel tespiti için özel cihazlar gerekirken, kimyasal analiz için mevcut laboratuvar ekipmanı yeterlidir. Bu çalışmada yenilenebilir atık biyokütle kaynaklarının ÜİD'nin, basit bir kimyasal analizden elde edilen veriler kullanılarak geliştirilen model eşitlik yardımı ile hesaplanabileceği ortaya konulmuştur.

Geliştirilen model denklem yardımı ile hesaplanan maksimum yüzde hata değerinin % 3.5 olduğu belirlenmiştir. Korelasyon katsayısının 0.982 ve mutlak sapma değerleri ise 0.37-0.63 kJ/g aralığında olduğu saptanmıştır. Bu değer kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu sonucuna varılmıştır. Yani geliştirilen model eşitlikle oldukça iyi bir hassasiyetle üst ısı değerinin hesaplanabileceği görülmüştür.

Sonuç olarak, kalori tayinine gerek duyulmaksızın, geliştirilen model denklem kullanılarak, sezonluk olarak ortaya çıkan atık biyokütle kaynaklarından istenilen kimyasal bileşimde karışım oluşturulabileceği, yakma prosesleri için üst ısı değeri yüksek, kombine hammaddeler hazırlanabileceği anlaşılmıştır.

KAYNAKÇA

ASTM E870 – 82, (2006). Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels.

Baxter, L., (2005). Biomass-coal co combustion: opportunity for affordable renewable energy, *Fuel*, 84, 1295-1302.

Buranov, A. U., Mazza, G., (2008). Lignin in straw of herbaceous crops. *Industrial Crops and Products*, 28, 237-259.

Caglar A., (2009). Valorization of tea wastes by pyrolysis, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 23(2), 135-144.

Demirbas A., (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels, *Fuel*, 76, 431-434.

Demirbas, A. (1998a). Combustion properties and calculation of higher heating values of diesel fuels. *Petrol. Sci. Technol.* 16:785–797.

Demirbas, A. (1998b). Fuel properties and calculation of higher heating values of vegetable oils. *Fuel* 77:1117–1120. Parikhetal.,2007;

Demirbas, A. (2001). Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Convers. Manage.* 42:183–188.

Demirbas, A. (2002a). Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Explor. Exploit.* 20:105–111.

Demirbas, A. (2003). Relationships between heating value and lignin, fixed carbon and volatile material contents of shells from biomass products. *Energy Sour.* 25:629–635.

Demirbas, A. (2009). Prediction of higher heating values for vegetable oils and animal fats from proximate analysis data. *Energy Sour. Part A* 31:1264–1270.

- Demirbas, A., Ghamdi K. (2015). Relationships between specific gravities and higher heating values of petroleum components. *Petrol. Sci. Technol.* 33:732–740.
- Demirbas A, (2017). Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects*, 39(6), 592–598.
- Duranay N., Yılmaz M., (2018). Kısa Analiz Verileri Kullanılarak Biyokütleinin Üst Isı Değeri Hesaplanması, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 6-2, 103-108.
- Garcia, R., Pizzaro, C., Lavin, A. G., and Bueno, J. L. (2014a). Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Proximate analysis. *Fuel* 117:1130–1138.
- Garcia, R., Pizzaro, C., Lavin, A. G., and Bueno, J. L. (2014b). Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate anal data. *Fuel* 117:1139–1147.
- Gonzalez J.F., Gonzalez-Garcia C., Ramiro A., Gonzalez J., Sabio E., Ganan J., Rodriguez M., (2004). Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler, *Biomass & bioenergy*, 27/2, 145-154.
- Gómez-Martina J.M., Castaño-Díaz M., Cámara-Obregón A., Álvarez-Álvarez P., Folgueras-Díaz M.B., Diezc M.A., (2020). On the chemical composition and pyrolytic behavior of hybrid poplar energy crops from northern Spain, *Energy Reports*, 6, 764–76.
- Goutam S.G., Monoj K.G., Mondal K., (2019). Slow pyrolysis of chemically treated walnut shell for valuable products: Effect of process parameters and in-depth product analysis, *Energy*, 181, 665-676.
- Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles Jr T.R., Miles T.R., (1998). Combustion properties of biomass *Fuel Processing Technology*, 54, 17–46.

- Li, S., Xu, S., Shuqin, L., Chen, Y., Qinghua, L. (2004). Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas, *Fuel Processing Technology*, 85, 1201-1211.
- Lu, F., Ralph, J., (2012). Lignin. *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels*, University of Wisconsin, 169-207.
- Max, B., Salgado, J.M., Cortes, S. ve Dominguez, J.M., (2010). Extraction of Phenolic acids by alkaline hydrolysis from the solid residue obtained after prehydrolysis of trimming vine shoots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 1909-1917.
- McKendry, P., (2002). Energy production from biomass (Part I): Overview of biomass, *Bioresource Technolgy*, 83, 37-46.
- Meraza L., Oropeza M., Dominguez A., (2002). Prediction of the Combustion Enthalpy of Municipal Solid Waste, *Chem. Educator*, 7, 66-70.
- Meraza L., Dominguez A., Kornhauserb I., Rojas F., (2003). A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition. *Fuel*, 82, 1499-1507.
- Mohan, D., Pittman, C.U. ve Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio oil: A critical review, *Energy and Fuels*, 20, 848-889.
- Palonen, H., Thomsen, A.B., Tenkanen, M., Schmidt, A.S. and Viikari, L., (2004). Evaluation of wet oxidation pretreatment for enzymatic hydrolysis of softwood, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 117, 1-17.
- Pasha, I., Saeed F., Waquas, K., Anjum, F. M., Arshad, M.U., (2013). Nutraceutical and Functional Scenerio of Wheat Straw. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53, 287-295.

- Perea-Moreno M.A., Manzano-Agugliaro F., Hernandez-Escobedo Q., Perea-Moreno A. J., (2018). Peanut Shell for Energy: Properties and Its Potential to Respect the Environment, *Sustainability* 10, 3254.
- Sabzoi Nizamuddin, Humair Ahmed Baloch, G.J. Griffin, N.M. Mubarakc, Abdul Waheed Bhutto, Rashid Abro, Shaukat Ali Mazari, Brahim Si Ali, (2017). An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, 1289–1299.
- Sheng C., Azevedo J.L.T, (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass and Bioenergy*, 28, 499-507.
- Sun, R., Lawther, J.M. ve Banks, W.B., (1997). A tentative chemical structure of wheat straw lignin. *Industrial Crops and Products*, 6, 1-8.
- Sun, R. C., Tomkinson, J., (2001). Comparative study of lignins isolated by alkali and ultrasound-assisted alkali extractions from wheat straw, *Ultrasonics Sonochemistry*, 9, 85-93
- Taşar, Ş., Duranay N., Yılıgın M., (2011). Mobilya Fabrikası Atık Tozunun İzotermal Olmayan Şartlarda Gerçekleştirilen Pirolizinin Kinetik Parametrelerinin Belirlenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (2), 139-148.
- Taşar, Ş., Kaya, F., Özer, A. (2014). Biosorption of Lead (II) Ions from Aqueous Solution by Peanut Shells: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(2), 1018-1026.
- Telmo, C., and Lousada, J. (2011). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass Bioenergy* 35:1663–1667.
- Türe, S., (2001). *Biyokütle Enerjisi*, Tübitak Matbaası, Ankara.
- White, R. H. (1987). Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood Fiber Sci.* 19:446–452.

BÖLÜM 3

S7 1200 PLC İLE STEP MOTOR HAREKET KONTROL DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI

Levent YAVAN¹, Dr. Öğr. Üyesi Cengiz TEPE²

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Samsun, Türkiye, leventyavan@gmail.com

² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Samsun, Türkiye, ctepe@omu.edu.tr

Not: Bildirimiz 3. Uluslararası 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşımlar Kongresinde yayımlanmıştır.

GİRİŞ

Hareket kontrol sistemleri endüstriyel uygulamalarda büyük bir alana ve öneme sahiptir. Bu alanda PLC, sağlamış olduğu basitlik, esneklik, güvenli ve düşük işletme maliyetleri gibi üstünlüklerinden dolayı kontrolör olarak tercih edilmektedir. Hareket kontrol sistemleri uygulamalarında aktüatör olarak genellikle servo ve step motorlar kullanılır. Farklı PLC markalarının bu aktüatörleri kontrol etmek için değişik çözümleri vardır. Bu iki motor tipinin uygulama alanları, kontrol tarzları ve hassasiyetleri birbirinden farklıdır. Servo sistemler daha fazla güç ve hassasiyet gerektiren yerlerde tercih edilirken, step motorlu sistemler daha az güç, hassasiyet ve maliyet gerektiren yerlerde tercih edilir.

Step motorlar adım motoru olarak nitelendirilir ve sürücülerinden aldıkları her bir darbe akımı (pals) ile bir açısız yer değiştirmeye dönüştürür. Step motorlar direkt çalıştırılmadığından bir özel sürücü kullanılması gerekir. Her bir tur dönüşündeki pals sayısına göre hassasiyeti değişir. Step motorlar genellikle açık çevrim olarak kullanılır. Açık çevrim kontrol, kullanımda motorun pozisyonu ve hızı ile bilgi alınmayan fakat komutların gerçekleştiği öngörülerek hareketin kontrol edilmesidir. Kapalı çevrim kontrol ile yapılan sistemlerde motorun pozisyonu ve hızı hakkında bir bildirim alınabilir. Kapalı çevrim kontrolünde geri bildirim olarak genellikle enkoder tercih edilir. Wang çalışmasında PLC ve step motor sürücüsü ile kontrol ettiği step motordan enkoder üzerinden aldığı geri bildirim ile kapalı çevrim bir kontrol sistemi tasarlamıştır (Wang, 2013). Step

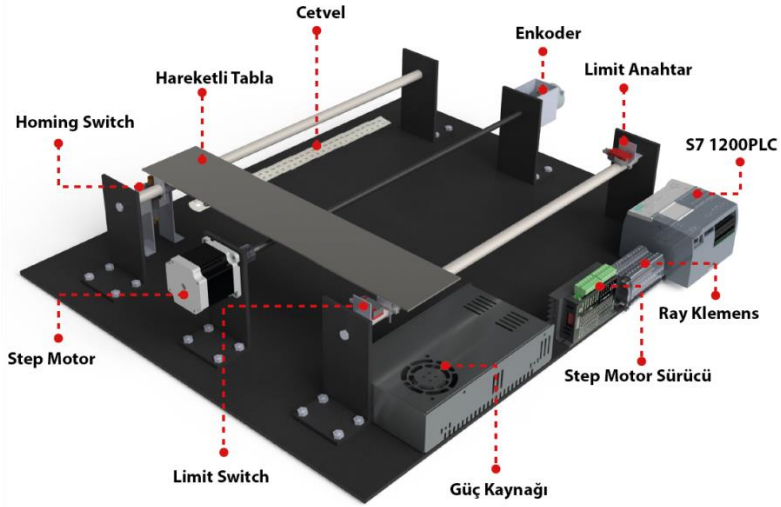
motorlar tam adım, yarım adım, mikro adım sürme teknikleri kullanılarak adım açısı küçültülerek hareket kontrol sistemlerinde hassasiyet artırılabilir. Sahran çalışmasında PLC kontrollü bir step motoru tam adım, yarım adım ve mikro adım sürme teknikleri kullanarak 2 eksenli NC bir sistemi kontrol etmiş her eksendeki doğrusal yer değiştirmeleri karşılaştırmıştır (Sahran, 2014). Step motorları sürmek için genellikle bir sürücü düzeneği gerekir aynı zamanda bu sürücüye pals göndermek için bir kontrolör gerekir. Kontrolör olarak PLC yada mikrodenetleyiciler kullanılır. PLC ile kontrol edilen step motorlarda kontrol palsi olarak Pulse Train Output (PTO) kullanılır ve PLC seçimi yapılırken bu fonksiyona sahip olmasına dikkat edilmelidir. PLC'nin PTO çıkışından alınan darbe sinyalleri sürücüye gönderilerek step motorun hızı kontrol edilebilir. Chong ve arkadaşları step motoru sürmek için iki ayrı yöntem denemişlerdir. Birinci yöntemde step motoru sürmek için direkt PLC çıkışları, ikinci yöntemde ise PLC'in yüksek hızlı çıkış veren PTO uçları kullanmışlardır. Her iki yöntemde düşük, orta ve yüksek hızlarda step motoru başlatma, durdurma, ileri ve geri hareketleri kontrol etmişlerdir (Chong vd.. 2015). Step motor sürücüne uygulanan pals frekansının değişimi step motorun bir tur dönüş hareketini tamamlama süresi üzerinde değişime neden olmaktadır. Hassan ve arkadaşları PLC ile kontrol edilen ve step motor ile hareket ettirilen bir prototip tasarlamışlar ve step motora farklı frekanslarda pals uygulayarak hareket süresinin pals frekansına bağlı değişimini incelemişlerdir. Ayrıca hazırladıkları düzenekte ileri ve geri yönde hareketi sonlandırmak için limit anahtarlar kullanmışlardır (Hassan

vd.. 2019).

Bu çalışmada PLC kontrollü step motor deney düzeneğinde kontrolör olarak Simens S7 1200 1214 DC/DC/DC modeli kullanılmıştır. Bu modelde 4 adet 100 kHz frekansında PTO çıkışı almak mümkündür. Step motor olarak adım açısı 1.8° olan PH265L-04-C4 motoru kullanılmıştır. Step motor sürmek için kullanılan sürücü tam adım, yarım adım ve mikro adım sürme yeteneklerine sahip bir sürücü olup step motorun hareket hassasiyeti istenildiği gibi kontrol edilebilmektedir. Ayrıca step motora bağlanan enkoder sayesinde istenilen mesafe kadar hareketin gerçekleşme durumu da kontrol edilebilmektedir. Step motorun hareket ettirdiği tablanın belli sınırlarda çalışması için her iki ucuna mekanik anahtarlar yerleştirilmiştir. Tasarımı yapılan deney düzeneği PLC ile step motor kontrollü hareketli bir sistemin birçok farklı parametresi değiştirilerek her birinin sisteme etkisinin incelenmesine imkan sağlamaktadır.

1. DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI

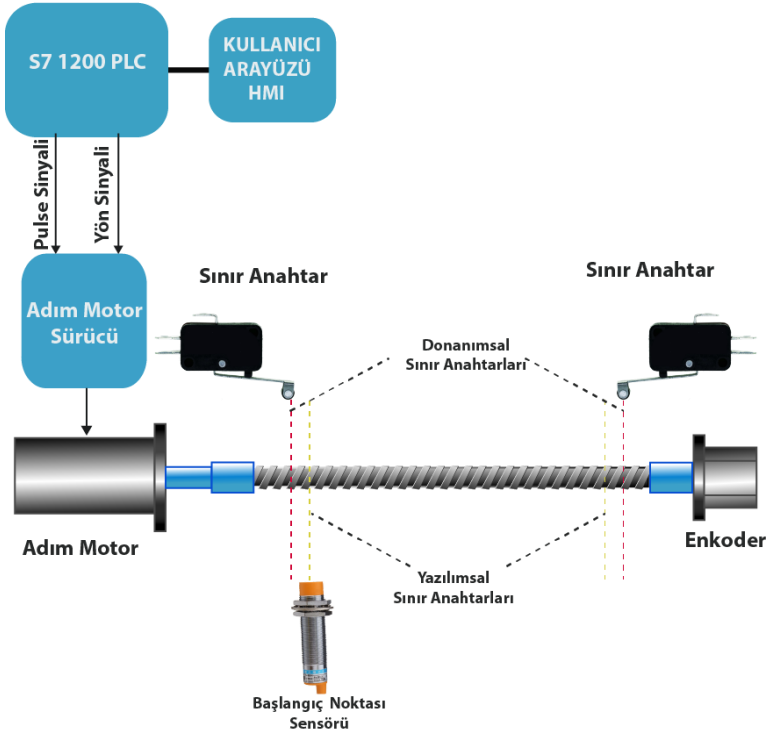
Deney düzeneği Solidworks ortamında çizimleri gerçekleştirildikten sonra imalat ve montajı yapılmıştır. Solidworks ortamında çizilen CAD çizim ve çalışma diyagramı Şekil 1'deki gibidir.



Şekil 1: DeneY Düzeneyi CAD Çizimi

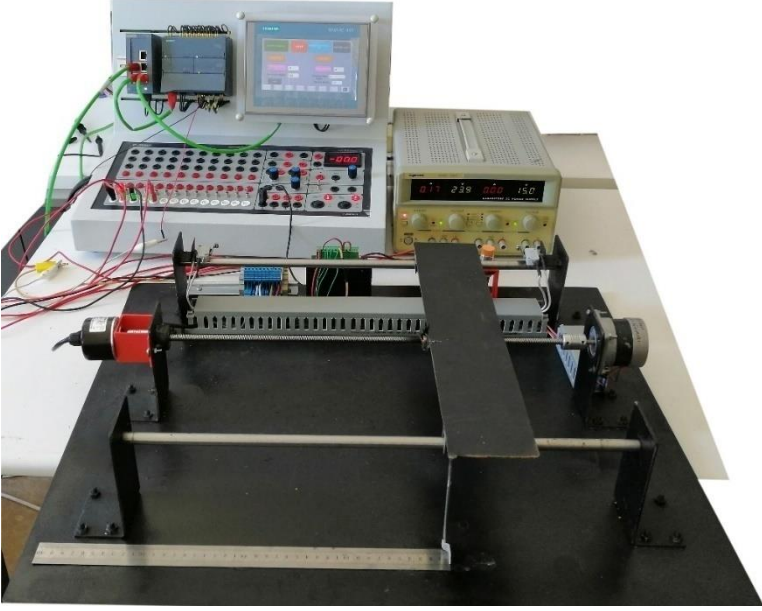
DeneY düzeneyinde HMI panele milimetre cinsinden bir mesafe girildiğinde PLC gerekli palsi üretir ve step motor sürücüsüne gönderir ve step motorun miline bağı olan hareketli tabla mesafe kadar hareket eder. Girilen mesafe bilgisi pozitif ise ileri yönde, negatif ise geri yönde bir hareket meydana gelir. Step motorun miline bağı olan enkoder üzerinden gelen veri HMI ekranın gösterilerek girilen mesafe kadar hareketin gerçekleşip gerçekleşmediğı kontrol edilebilmektedir. Özellikle yüksek frekanslı pals ile step motorlar sürüldüğünde adım kaçırma veya zamanla vidalı mil ile somun arasında meydana gelen boşluk (backlash) etkilerinden dolayı girilen mesafe kadar hareket gerçekleşmemektedir. Hareket etmesi istenen mesafe eğer sınırların dışında ise yazılımsal limit anahtar (Software)

ya da donanımsal (Hardware) mekanik limit anahtar ile step motor durdurabilmektedir. Deney düzeneğinde bulunan kapasitif bir sensör olan başlangıç noktası sensörü sayesinde göreceli (relative) ve mutlak (absolute) hareket ve sistemin başlangıç noktası belirlenebilmektedir. Mutlak harekette girilen mesafe başlangıç noktası sensörünün bulunduğu nokta sıfır noktası olarak kabul edilerek hareket sağlanır. Göreceli harekette ise tablanın durduğu o anki nokta başlangıç noktası kabul edilerek girilen mesafe kadar hareket sağlanır. Yapılan tüm hareketlerde mesafe ayrıca deney düzeneğine yerleştirilen bir cetvel üzerinde göz ile takip edilebilmektedir.



Şekil 2: Deney Düzeneği Çalışma Diyagramı

Tasarımı gerçekleştirilen deney düzeneği Şekil-3 'de verilmiştir.



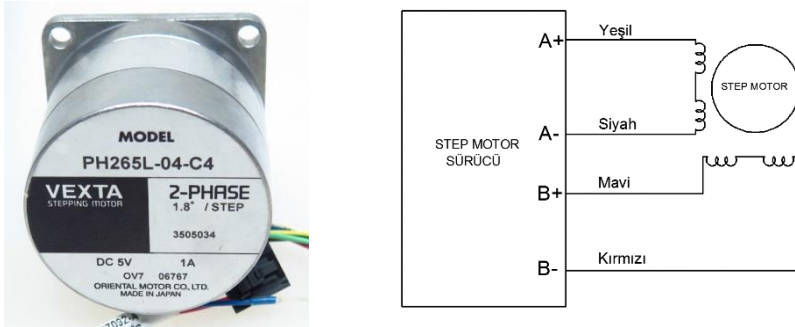
Şekil 3: Gerçekleştirilen Deney Düzeneği

2. DONANIMSAL ALT YAPI

2.1. PLC: Deney düzeneğinde kontrolör olarak Siemens marka S7 1200 1214 DC/DC/DC modeli kullanılmıştır. Özellikle bu modelin seçilmesinin nedeni PTO çıkışının olması, enkoderden gelen sinyallerin işlenebilmesi için yüksek hızlı sayıcı özelliğinin olması, sahada çok kullanılan bir marka olması ve programlaması için kullanılan TiaPortal yazılımının hareket kontrol sistemleri için sağlamış olduğu esnekliktir. Ancak istenirse PTO çıkışı ve yüksek hızlı sayıcı özelliği olan başka marka PLC modeli kolaylıkla bağlanabilir.

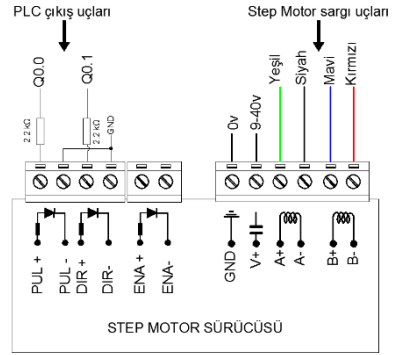
2.2. HMI panel: Tasarlanan ara yüz programı için S7 1200 PLC modelleri ile uyumlu olan Siemens KTP 700 renkli ekran modeli kullanılmıştır.

2.3. Step motor: Deney düzeneğimizde step motor olarak VEXTA firmasına ait PH265L-04-C4 modeli kullanılmıştır. Step motor 2 fazlı olup 1.8° derecelik dönüş açısına sahiptir. Bipolar modunda kullanılmıştır. Kablo bağlantı renkleri Şekil-4'deki gibidir.



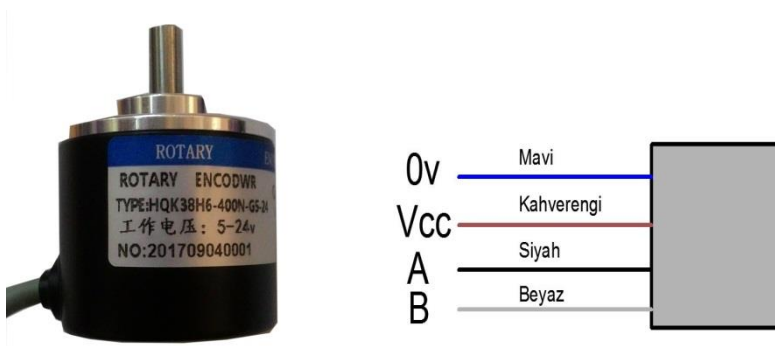
Şekil 4: Step Motor ve Bağlantı Şeması

2.4. Step motor sürücü: Deney düzeneğimizde TB6600 4A step motor sürücü kontrol kartı kullanıldı. 4 amper kadar çıkış verebilen sürücü kartı 9-40 V arasında besleme gerilimine sahiptir. Sürücü kartının mikro step özelliği vardır. Bu sayede step motorun çözünürlük ayarı, üzerindeki anahtarla değiştirilebilir. Çözünürlük arttıkça step motorun hassasiyeti de artmaktadır. Sürücü kartının model ve PLC bağlantı şeması Şekil-5'de verilmiştir.



Şekil 5: Step Motor Sürücü ve Bağlantı Şeması

2.5. Enkoder: Deney düzeneğimizde enkoder step motor hareketinde bir hata olup olmadığı kontrol amacı ile kullanılmıştır. Enkoder olarak 1 turda 2500 pals üreten rotary enkoder (dairesel) HQK38H6 modeli kullanılmıştır. Enkoder çıkışında genelde A, B ve Z kanalı bulunur ve sadece A kanalı PLC yüksek hızlı sayıcı girişine bağlanarak enkoder gelen sinyaller okunmuştur. Kullanılan enkoder ve bağlantı şeması Şekil 6 'da verilmiştir.



Şekil 6: Enkoder ve Bağlantı Şeması

2.6. Vidalı mil: Step motorun tablayı hareket ettirebilmesi için 8mm çapında vidalı mil kullanılmıştır. Step motorun her bir tam tur dönmesinde tabla 8 mm hareket etmektedir.

2.7. Sınır anahtarları ve başlangıç konum sensörü : Deney düzeneğinin her iki tarafına normalde açık kontakları olan ve hareketli tablanın çarpması ile kapanan mikro limit anahtarlar kullanılmıştır. Hareketli tablayı algılayan ve başlangıç noktasını belirlemek için kapasitif bir sensör kullanılmıştır.

3. YAZILIMSAL ALT YAPI

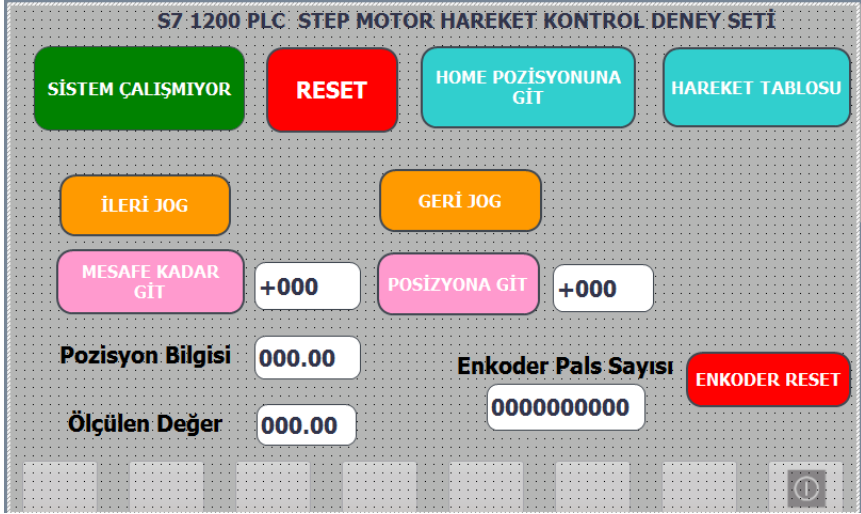
S7 1200 PLC programlamak için kullanılan Tia Portal yazılımında Ladder, STL, FBD, SCL gibi birçok farklı program yazma tekniği mevcuttur. Aynı zamanda hareket kontrol sistemleri için birçok çözüm yöntemleri vardır. Deney düzeneğinde Tia Portal yazılımın sunduğu hareket kontrol çözümlerinden yararlanılmış ve aşağıdaki bloklar kullanılmıştır.

- MC_Move_Jog: Tablayı jog modunda hareket ettirme.
- MC_Home: Tablayı referans noktaya hareket ettirme.
- MC_Move_Relative: Tablayı bulunduğu noktadan ileri, geri istenen mesafe kadar hareket ettirme.
- MC_Move_Absolute: Tablayı referans noktasına göre istenen yere hareket ettirme.
- MC_Halt: Tablayı hareketinin herhangi bir anda durdurma.
- MC_Command Table: Bir hareket tablosu oluşturularak tablayı

hareket ettirme.

- MC_Reset: Tabla hareketini belirlenen sınırları aşması durumunda sistemi resetleme.
- MC_Start: Sistemi başlatma.
- MC_MoveVelocity: Tabla hareketinin hızını değiştirme.

Deney düzeneğinin kullanıcı ara yüzü üzerinden kontrol etmek için KTP 700 panelinde bir tasarım yapılmış istenen bütün kontroller sağlanmıştır.



Şekil7: Deney Düzeneği HMI Panel Yazılımı

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada endüstride sıklıkla kullanılan step motor denetiminin, Elektrik-Elektronik, Makine, Kontrol ve Mekatronik Mühendisliği öğrencileri tarafından daha iyi anlaşılması ve uygulanması için bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Hazırlanan deney düzeneği

Ondokuzmayıs Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Samsun/Türkiye) Endüstriyel Kontrol Laboratuvarında lisans öğrencilerinin kullanımına sunulmuştur. Öğrenciler bu deney düzeneği ile açık çevrim kontrol, kapalı çevrim kontrol, step motor, adım kontrol, puls sinyali, HMI, enkoder, PTO, PLC kontrol komutları ve mekanik hareket ekipmanları hakkında bilgi ve becerileri uygulamalı olarak pekiştirme imkânı bulmuşlardır. Ayrıca yapılan bu deney düzeneği ile PLC ile step motor kontrolü üzerinde birçok senaryonun öğrencilerin deneyebileceği ve bu konuda bilgi ve tecrübelerini artırebilecekleri uygulamalar yapma imkânı sağlanmıştır. Wang (2013) çalışmasında step motoru kapalı çevrim kontrol etmiş ve enkoder ile geri bildirim almış ancak sistemi kontrol etmek için bir ara yüz kullanmamıştır. Bizim yaptığımız çalışmada oluşan hatanın ne kadar olduğunu görmek için bir ara yüz tasarımı yapılmıştır.

Chong ve arkadaşlarının (2015) çalışmasında step motoru direkt ve bir sürücü kullanarak kontrol edilmiş ancak yüksek frekanslarda step motorlarda adım kaçırmaya neden olan bir hata olup olmadığı kontrol edilmemiştir. Bu çalışmada adım hatalarının olup olmadığı enkoder üzerinden kontrol edilebilmektedir.

Hassan (2019) çalışmasında step motoru taşıyan bir tablayı bir mekanizma üzerinde konumlandırmış olduğu iki switch arasında ileri ve geri butonlarını kullanarak hareketi sağlamış ancak herhangi bir mesafe giriş bilgisi kullanmamış, aynı zamanda geri bildirim için enkoder verisi ve bir ara yüz tasarımı yapmamıştır. Bu çalışmada

hareketli mekanizma herhangi bir noktada iken ileri ve geri yönde istenen mesafe kadar hareket sağlanmaktadır.

Sarhan (2014) yaptığı çalışmada step motoru yarım, tam ve mikro adım modlarını kullanarak pozisyon kontrolü yapmış ancak herhangi bir geri bildirim elemanı kullanmamış ve hareket sınırlarını belirlemek için limit anahtar kullanmamıştır. Bu çalışmada ise hem sınırları hem de başlangıç noktasını belirlemek için sınır anahtarları ve başlangıç konum sensörü kullanılmıştır.

Yapılan bu deney setinde PLC ile step motor kontrolünde yukarıdaki çalışmaların eksik yönleri tespit edilerek deney düzeneği gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde yapılan test uygulamalarında girilen mesafe ile enkoderden gelen veriler karşılaştırıldığında %0,4 bir hata meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Oluşan bu hata mekanik aksam ve step motorun adım kaçırması vb nedenlerden kaynaklanmaktadır. Tasarlanan deney düzeneği geliştirilmeye açıktır. Deney düzeneğinde farklı PLC markaları ve farklı motorlar bağlanarak uygulamalar yapılabilir.

KAYNAKÇA

Chong, Y., Xu, C., Feng, H., Shi, X., Li, J., Du, C., & Wang, J. (2015). One kind of control method based on PLC of stepper motor. Paper presented at the 2nd International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences.

Hassan, S., Yusof, M., Embong, Z., Kamarudin, Q., Haq, R., Ibrahim, M., . . . Ismon, M. (2019). A study of frequency and pulses for stepper motor controller system by using programmable logic controller. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.

Sarhan, H. J. I. J. o. E., & Technology. (2014). PLC-controlled stepper motor drive for NC positioning system. 3(3), 298.

Simatic S7 1200 CPU 1214C Data Sheet 2019

TB6600 Stepper Motor Driver User Guide 201

Wang, X. Y. (2013). The application of PLC in the Stepper motor closed-loop control system design. Paper presented at the Advanced Materials Research.

BÖLÜM 4
ÇALIŞMA ORTAMININ ERGONOMİK AÇIDAN ANALİZİ:
HİTİT ÜNİVERSİTESİ ÖRNEĞİ

Dr. Öğr. Üyesi Berna GÜR¹

¹ Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Çorum, Türkiye, bernagur@hitit.edu.tr

1. GİRİŞ

Ofisler; çalışanların sosyal ve mekânsal zamanının çoğunluğunu geçirdiği, etkileşimin sürekli olduğu yaşam alanlarıdır (Secer Kariptas vd., 2019). Gelişen teknoloji ile ofislerde çalışma süresi gün geçtikçe artmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği kanununun temel prensibi çalışana koruma olduğu için çalışma ofislerinin ortam ve koşulları önemli hale gelmiştir. İş güvenliği çalışılan ortamlarındaki tehlikelerin en aza indirilerek kişilerin iş kazası ve meslek hastalıklarını azaltmayı hedefleyen bilim dalıdır.(Yavuz vd., 2018) Ofis ortam ve çalışma koşullarının önemli olması ergonomi alanı ile ilgili çokça çalışma yapılmasına neden olmuştur. Eski Yunanca da “Ergonomi” kelimesi iş kelimesi “Ergo” ve doğal düzen anlamındaki “Nomos” kelimelerinden üretilmiştir. (Ana Britannica,1988:249) Ergonomi “*İnsana ilişkin ve en fazla rahatlık, güvenlik ve etkinlikle kullanılacak araç, makine ve donanım anlaşılması için gerekli bilgilerin tümü*” diye tanımlamıştır. (Şimşek,1994:45) Ergonomi biliminin amacı çalışanların çalışma ortamı kalitesini artırmaktır. Bu amacına da ancak çalışanlara uygun fiziksel ve psikolojik çalışma ortamının oluşturmasıyla ulaşabilir. Ergonominin temel amaçları insancılık ve ekonomiklik, sağlığın korunması, işin sosyal uygunluğu, teknik ekonomiklik olmak üzere dört başlık altında toplanmıştır (Kaya, 2008).

Çalışanların fiziksel ortamdan etkilenme biçimine bağlı olarak iş verimliliği artmakta veya azalmaktadır. Fiziksel ortam etkenlerinin başında aydınlatma, havalandırma, ses yalıtımı ve ofis mobilyaları yer almaktadır (Secer Kariptas vd., 2019). Ofislerde doğal veya yapay

aydınlatma kullanılabilir. Kaynağı gün ışığı olan doğal aydınlatma tepeden, tek veya çift yönden sağlanabilir. Gün ışığından yeterli miktarda faydalanmak için kullanılan ofis mobilyalarının ışığa göre düzenlenmesi gerekmektedir. Doğal aydınlatmadan yararlanılmayan durumlarda yapay aydınlatma kullanılmaktadır. Ofis ortamında olumsuz fiziksel ortam özelliklerinden birisi de gürültüdür. Çalışanların uzun süre gürültülü ortamda çalışması bedenen ve ruhen olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Ofis ortamında gürültü dikkat dağınıklığı ve odaklanmada problemlere neden olmakta ve iş verimliliğini azaltmaktadır (Yararel, 2019).

Çalışanları etkileyen ortam koşullarından biri de klimalı ortamlardır. Yakut ve arkadaşlarına göre *“klimanın hemen altında ve karşısındaki duvar kenarlarında rahatsızlık verici soğuk hava etkisi ve normalin üzerinde ortam hava hızı yüzünden uygun oturma konumu değildir. Daha çok odanın kapısının karşısında uygun alanlar bulunmaktadır.”* (Yakut vd., 2013:104) Düşük aktivite gerektiren ofislerdeki sıcaklığın yaz mevsiminde 23-27 °C aralığında olması gerekmektedir. Ayrıca klima ile ofis ortamında homojen sıcaklık dağılımı sağlanmadığı, bazı bölgelerin istenen sıcaklıktan daha soğuk, bazı bölgelerin daha sıcak olduğu tespit edilmiştir. (Yakut vd., 2013). Ofis ortam renginin insan psikoloji üzerinde etkisi yadsınamaz.

Çalışma alanlarındaki duvar, zemin ve ofis araç-gereçlerinde kullanılan renkler, çalışanların iş tatminini, yapılan işe motivasyonunu ve buna bağlı olarak da çalışan performansını etkileyen fiziksel ortam faktörlerinden biridir. Ofis ortamında kullanılan sıcak renkler;

çalışanlarda dışa daha kolay odaklanmayı ve çevreye olan farkındalığı artırırken, soğuk renkler de içe dönüklük ve odaklanma sorunu ortaya çıkmaktadır (Yararel, 2019). Çalışma ortamında insana uygun masa, sandalye vb. eşyaların kişilere uygun olması, çalışanlarda meydana gelebilecek rahatsızlıkları ortadan kaldıracaktır.

İş sağlığı ve güvenliği kapsamında çalışma alanları içinde en masum görülen ofis ortamı olmasına rağmen çalışanlarda ortam şartlarının uygun olmamasından kaynaklanan mesleki kas ve iskelet sistem hastalıkları oldukça sık görülmektedir. “*Kas-iskelet sistemi hastalıkları Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Komisyonu'nun da tanımladığı gibi kas-iskelet sisteminde oluşan ve işten kaynaklanan rahatsızlıklar veya hastalıklardır.*” (Özkan ve Kahya, 2017:142) Mesleki kas ve iskelet sistemi rahatsızlıkları aslında günlük hayatta sorun oluşturmayan eğilme, doğrulma, tutma, kavrama, bükme ve uzanma gibi hareketlerin yapılmasından meydana gelir. Bu hareketleri hastalık boyutuna taşıyan gün içerisinde fazla tekrar edilmesi, ani hareketlerle ve fiziksel zorlanmalarla uygun pozisyonların sağlanmamasıdır (Özkan ve Kahya, 2017). Yapılan araştırmalarda mesleki kas ve iskelet hastalıklarının artan yaş ile daha fazla görüldüğü ve bu hastalıkların kadınlarda erkeklere göre daha fazla ortaya çıktığı ortaya konulmuştur (Akpınar vd., 2018). Bu hastalıklar çalışanlara verilen masa, sandalye, vb. ofis araç-gereçlerinin kişiye uygun olması veya ayarlanabilir olması ile önlenir.

2. ARAŞTIRMANIN AMACI

Bu alıŐma da; 6331 sayılı İŞ Sağlığı ve Güvenliği Kanunun yürürlüğe girmesinden sonra yapılan yeni binalarda çalışan akademisyenlerin ofis ortam memnuniyetlerini belirlemek amaçlanmaktadır. Bu ana amaç altında Şu hipotezler belirlenmiştir.

H1- Akademisyenlerin cinsiyetine bağlı olarak çalışma ofis ortam memnuniyetinde farklılıklar görülmektedir.

H2- Akademisyenlerin yaŐlarına bağlı olarak çalışma ofis ortam memnuniyetinde farklılıklar görülmektedir.

H3- Akademisyenlerin kurumda çalışma sürelerine bağlı olarak çalışma ofis ortam memnuniyetinde farklılıklar görülmektedir.

H4- Akademisyenlerin akademik unvanlarına bağlı olarak çalışma ofis ortam memnuniyetinde farklılıklar görülmektedir.

3. EVREN VE ÖRNEKLEM

Araştırmanın evrenini Hitit Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu ve Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu'ndaki 78 akademik çalışan oluŐurmaktadır. Çalışmanın rneklemine ankete gönüllü olarak katılan 59 akademik çalışan oluŐurmaktadır. Araştırma, akademik personelin uygulanan anket maddelerine kendi zgr iradeleriyle ve objektif olarak yanıt verdiklerini varsayarak gerçekleştirilmiştir.

4. VERİ TOPLAMA ARACI

Araştırmada veri toplamak amacı ile anket yönteminden yararlanılmıştır. Anket soruları oluşturulurken akademisyenlerin çalıştıkları ofisin fiziksel ortam koşulları ve kullandıkları araç-gereçler anket sorularının hazırlanmasında etkili olmuştur.

Araştırma veriler için hazırlanan anket 2 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde demografik bilgilere ait 5 soru, ikinci bölümde ise çalıştıkları ofis ortam memnuniyetleri için 13 soruluk hazırladığımız ölçek yer almaktadır. Ofis ortam memnuniyetleri ölçeğinde yer alan ifadelerin değerlendirilmesinde “5’li Likert Ölçeği” kullanılmıştır. İfadeler; “1: Kesinlikle hayır, 2: Hayır, 3: Kararsızım, 4: Evet ve 5: Kesinlikle evet” aralığında düzenlenerek akademisyenlerin ofis ortam memnuniyetleri ölçülmeye çalışılmıştır.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Anket sorularına verilen cevaplar “IBM SPSS Statistics 22.0” programı ile analiz edildiğinde “Cronbach Alpha (α)” değeri 0.728 bulunmuştur. Bulunan değer $0.6 < \alpha < 0.8$ aralığında olması araştırmanın güvenilirliğini kanıtlamaktadır. Demografik özellikler için frekanslar ve yüzdeler bulunmuş. Hipotezlerin doğruluğunu test etmek için *t*- testi analizi ve Anova analizleri yapılarak yorumlanmıştır. Yapılan anket çalışmamızın sonuçlarının birbiriyle tutarlı ve anlaşılır olması akademisyenlerin anketi doğru anladığını göstermektedir. Araştırmada $p < 0.05$ değeri anlamlı farkı ifade etmektedir.

5.1. Demografik özellikler

Tablo 1'e göre ankete katılanların %27.1'i kadın, %72.9'u erkektir. Akademisyenlerin %6.8'i 20-30 yaş, %49.2'si 31-40 yaş, %32.2'si 41-50 yaş, %11.9'u 50 yaş ve üzeri yaş aralığındadır. Araştırmaya katılan akademisyenlerin %27.1'i 0-5 yıl, %30.5'i 6-10 yıl, %11.9'u 11-15 yıl ve %30.5'i 16 yıl ve üzeri çalışma süreleri bulunmaktadır. Ayrıca akademisyenlerin %72.9'u Öğr. Gör., %6.8'i Öğr. Gör. Dr., %13.6'sı Dr. Öğr. Üyesi, %6.8'i ise Doç. Dr. unvanına sahiptirler. Araştırma örnekleminin iki meslek yüksekokulu olması ve Prof.Dr., Doç.Dr., Dr. Öğr. Üyesi unvanına sahip akademisyenlerin daha çok fakülteler bünyesinde görev yapması, araştırmamıza katılan akademisyenlerin unvan dağılımının büyük bir kısmının Öğr. Gör. olmasına neden olmuştur.

Tablo 1: Akademisyenlerin Demografik Özelliklerine Göre Dağılımı

CİNSİYETİ	N	%
Kadın	16	27.1
Erkek	43	72.9
YAŞI	N	%
20-30 yaş	4	6.8
31-40 yaş	29	49.2
41-50 yaş	19	32.2
50 yaş ve üstü	7	11.9
ÇALIŞMA SÜRESİ	N	%
0-5 yıl	16	27.1
6-10 yıl	18	30.5
11-15 yıl	7	11.9
16 yıl ve üstü	18	30.5
UNVAN	N	%
Öğr. Gör	43	72.9
Öğr. Gör.Dr	4	6.8
Dr. Öğr. Üyesi	8	13.6
Doç. Dr.	4	6.8

5.2. Anket Soruları ve Sonuçlar

Tablo 2’de anket soruları verilmiştir.

Tablo 2: Anket soruları

Odanın duvarlarında ses yalıtımı vardır
Odamdaki duvar, mobilya, zemin renkleri beni rahatsız etmektedir
Odamda aydınlatma kaynağı olarak gün ışığı yeterli olmaktadır
Odamda gündüz de olsa sürekli lamba kullanmak zorunda kalıyorum
Odamda güneş ışınlarından rahatsız olduğum için sürekli perde kullanmak zorundayım
Odamdaki toz ve dumandan rahatsızım.
Günde en az üç kez pencereyi açıp odamı havalandırmak ihtiyacı hissediyorum.
Odam ya çok soğuk ya da çok sıcak oluyor.
Çalışma masamı güneş ışığını karşıdan alacak şekilde yerleştirdim.
Sandalyem ayarlanabilir özellikte olmasına rağmen, benim ölçülerime uygun değil.
Sandalyede otururken ayaklarım yere değmediği için yükseltici kullanmak zorunda kalıyorum.
Sandalyede otururken bazen kayacak gibi oluyorum.
Sandalyede otururken arkama belimi destekleyici minder koyarak oturuyorum.
Sandalyede uzun süre oturduğumda boynumda ve sırtımda ağrılar hissediyorum
Bilgisayarın göz hizamda olmasını sağlamak için bilgisayarın altına kitap, defter, vb. yerleştiriyorum
Klavye kullandığımda bileğimde ağrı oluşuyor
Klavyenin kablolu olması işlerimi yaparken zorlanmama sebep oluyor
Mouse’un kablolu olması işimi yaparken hareket alanımı kısıtlıyor
Masamdaki kullandığım araç-gereçleri almak için sürekli uzanmak zorundayım
Odamdaki kabloların açıkta ve düzensiz olması benim için tehlike kaynağıdır
Odamdaki kitaplığım en üst rafına rahatlıkla uzanamıyorum
Bilgisayara belirli bir süre bakınca gözümde batmalar hissediyorum

Akademisyenlerin anket sonuçlarına verdiği cevapların yüzde dağılımları hesaplanarak yorumlanmıştır. Ayrıca ankette sorulara verilen cevaplar 1 ile 5 arasında kodlanmıştır. Aralıkların eşit olduğu varsayımından yola çıkıldığında Puan Aralığı = (En yüksek değer – En düşük değer) / 5 = (5-1)/5 = 0.80 hesaplanmıştır.

Bu durumda sorulara verilen cevapların aralıkları ve kodlanması şu şekilde olmaktadır:

1-1.80: "Kesinlikle Hayır", 1.81-2.60 : "Hayır", 2.61-3.40 : "Fikrim Yok", 3.41-4.20 : "Evet", 4.21-5.00 : "Kesinlikle Evet".

Tablo 3: Akademisyenlerin anket soruları ve sorulara verdikleri cevapların dağılım yüzdeler

	KESİNLİKLE HAYIR		HAYIR		KARARSIZIM		EVET		KESİNLİKLE EVET	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
	S1	24	40.7	23	39.0	8	13.6	4	6.8	
S2	18	30.5	36	61.0	3	5.1	1	1.7	1	1.7
S3	5	8.5	10	16.9	7	11.9	24	40.7	13	22
S4	17	28.8	23	39.0	7	11.9	9	15.3	3	5.1
S5	15	25.4	22	37.3	4	6.8	7	11.9	11	18.6
S6	13	22	32	54.2	6	10.2	7	11.9	1	1.7
S7	1	1.7	18	30.5	10	16.9	24	40.7	6	10.2
S8	5	8.5	22	37.3	7	11.9	14	18.6	14	23.7
S9	5	8.5	26	44.1	1	1.7	23	39.0	4	6.8
S10	13	22.0	28	47.5	9	15.3	6	10.2	3	5.1
S11	23	39.0	36	61.0						
S12	18	30.5	27	45.8	5	8.5	8	13.6	1	1.7
S13	9	15.3	26	44.1	1	1.7	9	15.3	14	23.7
S14	3	5.1	15	25.4	6	10.2	22	37.3	13	22.0
S15	9	15.3	34	57.6	1	1.7	8	13.6	7	11.9
S16	5	8.5	20	33.9	7	11.9	21	35.6	6	10.2
S17	5	8.5	16	27.1	6	10.2	23	39.0	9	15.3
S18	3	5.1	15	25.4	4	6.8	27	45.8	10	16.9
S19	1	1.7	38	64.4	6	10.2	14	23.7	-	-
S20	5	8.5	18	30.5	9	15.3	23	39.0	4	6.8
S21	8	13.6	25	42.4	2	3.4	19	32.2	5	8.5
S22	1	1.7	14	23.7	5	8.5	24	40.7	15	25.4

Ofislerde gürültünün var olup olmadığını belirlemek için sorulan *“Odamın duvarlarında ses yalıtımı vardır”* sorusuna akademisyenlerin %79,7’si hayır veya kesinlikle hayır cevabını vererek odalarında ses yalıtımının olmadığını ifade etmişlerdir. Ofis ortamında kullanılan renklerden kişilerin nasıl etkilendiği belirlemek için sorulan *“Odamdaki duvar, mobilya, zemin renkleri beni rahatsız etmektedir”* sorusuna akademisyenlerden %91,5’i hayır veya kesinlikle hayır cevabını vererek renklerden rahatsız olmadıklarını ifade etmişlerdir. Kişilerin ofis ortamındaki renklerden rahatsız olmaması, akademisyenlerin iş memnuniyetini ve çalışma verimini artıracaktır.

Akademisyenlerin ofis ortamında kullandıkları aydınlatma aracının ne olduğunu belirlemek için üç soru sorulmuştur. Bu sorulardan *“Odamda aydınlatma kaynağı olarak gün ışığı yeterli olmaktadır”* sorusuna akademisyenlerin %62,7’si evet veya kesinlikle evet cevabını, *“odamda gündüz de olsa sürekli lamba kullanmak zorunda kalıyorum”* sorusuna akademisyenlerin %67,8’i hayır veya kesinlikle hayır cevabını vermiştir. Bu sonuçlar ankete katılanların ofis ortam içinde güneş ışığından yararlandıklarını ve bu aydınlatma ile ilgili olumsuz bir durum yaşamadıklarını ortaya koymaktadır.

Yeni yapılan ofis ortamlarındaki havalandırma sisteminin çalışanların temiz hava ihtiyacını karşılayıp karşılamadığını tespit etmek için *“günde en az üç kez penceremi açıp odamı havalandırmak ihtiyacı hissediyorum”* sorusuna akademisyenlerin %30,5’i hayır cevabını verirken %40,7’si evet cevabını vermiştir. Kişilerin ihtiyaç duydukları temiz hava miktarı yaş, cinsiyet ve yaptığı işin niteliği gibi özelliklere

bağlı olarak değişmektedir. Bu cevaplar da kişilerin aynı ofis ortamlarında çalışsalar bile temiz hava ihtiyaçlarının farklı olacağını göstermektedir. Temiz hava ihtiyacı fazla olan akademisyenlerin camları açarak bu ihtiyaçlarını karşıladıkları söylenebilir.

Akademisyenlerin “*Odamdaki toz ve dumandan rahatsızım*” sorusuna %76,2’si hayır veya kesinlikle hayır cevabı vermiştir. Bu cevaplar ofis ortamında kişilerin hijyen açısından sağlığını olumsuz etkileyecek bir durumun olmadığını göstermektedir.

Ofis ortamlarında çalışan kişilerin en çok kullandığı araç gereçlerden biri olan sandalye, masa ve dolabın akademisyenlerin fiziksel özelliklerine uygun olup olmadığını tespit edebilmek için ankete katılanlara altı soru sorulmuştur. Akademisyenlerin bu sorulardan sandalye ile ilgili olan “*Sandalyem ayarlanabilir özellikte olmasına rağmen, benim ölçülerime uygun değil*” sorusuna %69,5’i hayır veya kesinlikle hayır cevabı, “*Sandalyede otururken ayaklarım yere değmediği için yükseltici kullanmak zorunda kalıyorum*” sorusuna ise %100’ü hayır veya kesinlikle hayır cevabını vermişlerdir. Yine “*sandalyede otururken bazen kayacak gibi oluyorum*” sorusuna akademisyenlerin %76,3’ü kesinlikle hayır veya hayır cevabını verirken “*sandalyede otururken arkama belimi destekleyici minder koyarak oturuyorum*” sorusuna ise %44,1’i hayır cevabını vermişlerdir. Ofis ortamında kullanılan sandalye ile ilgili soruların cevaplarına bakıldığında, kişilerin özelliklerine uygun sandalye seçildiği ve bu seçiminde akademisyenlerde MKİS hastalıklarının olma ihtimalini azalttığı söylenebilir. Ofis ortamında kullanılan masa ve dolabın kişiye

uygunluğunu tespit etmek için “*Masamdaki kullandığım araç-gereçleri almak için sürekli uzanmak zorundayım*” sorulan soruya akademisyenlerin %64,4’ü hayır cevabını verirken “*Odamdaki kitaplığın en üst rafına rahatlıkla uzanamıyorum*” sorusuna ise akademisyenlerin %42,4’ü hayır, % 32,2’si ise evet cevabını vermişlerdir. Bu cevaplar doğrultusunda masa ölçülerinin akademisyenlere uygun olduğu sonucu çıkarken, kullanılan dolap boyunun standart olması ve kişilerin boy uzunluklarının farklı olması nedeniyle bazı akademisyenlerin dolabı kullanırken sıkıntı yaşadığı sonucuna varılabilir.

Kullanılan bir diğer ofis araçlarından biri olan bilgisayarın kişilerin özelliklerine uyumlu olarak ayarlanabilir olup olmadığını belirlemek için “*bilgisayarın göz hizamda olmasını sağlamak için bilgisayarın altına kitap, defter, vb. yerleştiriyorum*” sorusu sorulmuştur. Akademisyenlerin %72,9’u hayır ve kesinlikle hayır cevabını vermişlerdir. Bu cevap akademisyenlerin bilgisayar kullanırken ekranın boyunu ayarlayabildikleri ve bilgisayar kullanımında herhangi bir sıkıntı yaşamadıkları söylenebilir.

Tablo 4: Tamamlayıcı istatistikler

Ölçek maddeleri	\bar{x}	Sonuç
1. Odanın duvarlarında ses yalıtımı vardır.	1,8644	Hayır
2. Odamdaki duvar, mobilya, zemin renkleri beni rahatsız etmektedir.	1,8305	Hayır
3. Odamda aydınlatma kaynağı olarak gün ışığı yeterli olmaktadır.	3,5085	Evet
4. Odamda gündüz de olsa sürekli lamba kullanmak zorunda kalıyorum.	2,2881	Hayır
5. Odamda güneş ışınlarından rahatsız olduğum için sürekli perde kullanmak zorundayım.	2,6102	Kararsızım
6. Odamdaki toz ve dumandan rahatsızım.	2,1695	Hayır
7. Günde en az üç kez penceremi açıp odamı havalandırmak ihtiyacı hissediyorum.	3,2712	Kararsızım
8. Odam ya çok soğuk ya da çok sıcak oluyor.	3,1186	Kararsızım
9. Çalışma masamı güneş ışığını karşıdan alacak şekilde yerleştirdim.	2,9153	Kararsızım
10. Sandalyem ayarlanabilir özellikte olmasına rağmen, benim ölçülerime uygun değil.	2,2881	Hayır
11. Sandalyede otururken ayaklarım yere değmediği için yükseltici kullanmak zorunda kalıyorum.	1,6102	Kesinlikle Hayır
12. Sandalyede otururken bazen kayacak gibi oluyorum.	2,1017	Hayır
13. Sandalyede otururken arkama belimi destekleyici minder koyarak oturuyorum.	2,8814	Kararsızım
14. Sandalyede uzun süre oturduğumda boynumda ve sırtımda ağrılar hissediyorum.	3,4576	Evet
15. Bilgisayarın göz hizamda olmasını sağlamak için bilgisayarın altına kitap, defter, vb. yerleştiriyorum	2,4915	Hayır
16. Klavye kullandığımda bileğimde ağrı oluşuyor	3,0508	Kararsızım
17. Klavyenin kablolu olması işlerimi yaparken zorlanmama sebep oluyor.	3,2542	Kararsızım
18. Mouse'un kablolu olması işimi yaparken hareket alanımı kısıtlıyor	3,4407	Evet
19. Masamdaki kullandığım araç-gereçleri almak için sürekli uzanmak zorundayım	2,5593	Hayır
20. Odamdaki kabloların açıkta ve düzensiz olması benim için tehlike kaynağıdır	3,0508	Kararsızım
21. Odamdaki kitaplığın en üst rafına rahatlıkla uzanamıyorum	2,7966	Kararsızım
22. Bilgisayara belirli bir süre bakınca gözümde batmalar hissediyorum	3,6379	Evet

5.3. Akademisyenlerin Cinsiyet Değişkenine İlişkin Bulgular

Hitit Üniversitesinde akademisyenlerin ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeyleri arasında cinsiyete göre anlamlı bir farklılığın olup olmadığını test etmek için t-testi yapılmıştır. Bu testi yapmadan önce verilerin homojen dağılıp dağılmadığı test edilmiş ve homojenlik katsayısı 0.351 olarak bulunmuş ve bu değer 0.05'ten büyük olduğu için grup varyanslarının homojen dağıldığı anlaşılmıştır. T-testi analizi sonucunda $t(57) = 1.98$; $p = 0.232$ ve Güven Aralığı: $[-0.332; 0.191]$ verileri elde edilmiştir.

Tablo 3: Akademisyenlerin çalışma ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeylerinin cinsiyete göre t-testi sonuçları

Cinsiyet	N	X	SS	Sd	t	p
Kadın	16	2.6847	.41708	57	1.98	0.232*
Erkek	43	2.7550	.45627			

* $p < 0.05$ anlamlı farklılık

İstatistiksel verilerde anketi cevaplayan akademisyenler arasında ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeyleri arasında cinsiyete göre anlamlı fark bulunamamıştır ($p > 0.05$). H1 hipotezi reddedilmiştir.

5.4. Akademisyenlerin Yaş Değişkenine İlişkin Bulgular

Hitit Üniversitesi MYO da çalışan akademisyenlerin ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeyleri arasında yaşa göre anlamlı bir farklılığın olup olmadığını test etmek için tek yönlü varyans analizi yapılmıştır. Bu testi yapmadan önce verilerin homojen dağılıp dağılmadığı test edilmiş ve homojenlik katsayısı 0.052 olarak bulunmuş ve bu değer 0.05'ten büyük olduğu için grup varyanslarının homojen

dağıldığı anlaşılmıştır. Anova analizi sonucunda $F = (3.55) = 0.670$; $p = 0.574$ elde edilmiş ve bu $p > 0.05$ olduğundan H2 hipotezi ret edilmiştir.

Tablo 4: Akademisyenlerin çalışma ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeylerinin yaşa göre anova testi sonuçları

Yaş	KT	sd	KO	F	p
Gruplar arası	.403	3	.134	.670	.574*
Gruplar içi	11.008	55	.200		
Toplam	11.411	58			

* $p < 0.05$ anlamlı farklılık

Yaş	N	\bar{X}	Ss
20-30	4	2.7727	.58799
31-40	29	2.7257	.42039
41-50	19	2.8162	.50571
50 ve üstü	7	2.5390	.26430
Toplam	59	2.7359	.44355

5.5. Akademisyenlerin Hizmet Yılları Değişkenine İlişkin Bulgular

Hitit Üniversitesi MYO da çalışan Akademisyenlerin ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeyleri arasında hizmet yıllarına göre anlamlı bir farklılığın olup olmadığını test etmek için tek yönlü varyans analizi ile incelenmiştir. Bu testi yapmadan önce verilerin homojen dağılıp dağılmadığı test edilmiş ve homojenlik katsayısı 0.0501 olarak bulunmuş ve bu değer 0.05'ten büyük olduğu için grup varyanslarının homojen dağıldığı anlaşılmıştır. Anova analizi sonucunda $F = (3.55) = 0.721$; $p = 0.544$ elde edilmiş ve bu $p > 0.05$ olduğundan H3 hipotezi ret edilmiştir.

Tablo 5: Akademisyenlerin çalışma ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeylerinin hizmet yıllarına göre anova testi sonuçları

Hizmet Yılları	KT	sd	KO	F	p
Gruplar arası	.432	3	.144	.721	.544*
Gruplar içi	10.979	55	.200		
Toplam	11.411	58			

* $p < 0.05$ anlamlı farklılık

Hizmet Yılları	N	\bar{X}	Ss
0-5	16	2.7102	.42797
6-10	18	2.8081	.42198
11-15	7	2.5260	.37100
16 ve üstü	18	2.7682	.50751
Toplam	59	2.7359	.44355

5.6. Akademisyenlerin Unvan Değişkenine İlişkin Bulgular

Hitit Üniversitesi MYO da görev yapan akademisyenlerin ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeyleri arasında unvanlarına göre anlamlı bir farklılığın olup olmadığını test etmek için tek yönlü varyans analizi yapılmıştır. Bu testi yapmadan önce verilerin homojen dağılıp dağılmadığı test edilmiş ve homojenlik katsayısı 0.683 olarak bulunmuş ve bu değer 0.05'ten büyük olduğu için grup varyanslarının homojen dağıldığı anlaşılmıştır. Anova analizi sonucunda $F = (3.55) = 2.044$; $p = 0.118$ elde edilmiş ve bu $p > 0.05$ olduğundan H_4 hipotezi ret edilmiştir.

Tablo 6: Akademisyenlerin çalışma ofis ortamının ergonomisi memnuniyet düzeylerinin unvanlarına göre anova testi sonuçları

Unvan	KT	sd	KO	F	p
Gruplar arası	1.145	3	.382	2.044	.118*
Gruplar içi	10.266	55	.187		
Toplam	11.411	58			

*p<0.05 anlamlı farklılık

Unvan	N	\bar{X}	Ss
Öğr. Gör	43	2.6799	.42025
Öğr. Gör. Dr	4	3.1591	.58151
Dr. Öğr. Üyesi	8	2.8977	.46909
Doç. Dr.	4	2.5909	.31272
Toplam	59	2.7359	.44355

SONUÇ

Çalışmada 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği kanununun 2012 yılında yürürlüğe girmesinden sonra yapılan yeni binalardaki ergonominin çalışma koşullarına etkisinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bunun için Hitit Üniversitesi'nde yenilenen Meslek Yüksek Okulu binasında çalışan akademisyenler dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Akademisyenlere anket gözlem altında uygulanmıştır. Bu nedenle her bir akademisyenin görev yaptığı ofisler tek tek görülmüştür ve görülen ortam özellikleri yorumlara yansımıştır.

Araştırma sonucunda akademik personelin ofis ortam memnuniyetlerinde cinsiyet, yaş, unvan ve hizmet yıllarının etkili olmadığı görülmektedir. Ankete katılan akademisyenlerin tamamının aynı fiziksel ortam koşulları taşıyan ofisleri ve araç-gereçleri kullandığı gözlenmiştir. Bu yüzden akademisyenlerin ofis ortam memnuniyet-

lerinin demografik özelliklere göre farklılık göstermemesi beklenen bir sonuçtur.

Akademisyenlerin sorulara verdikleri cevapların ortalamaları ve ortalamalara bağlı verilen kodlar sonucu elde edilen Tablo 3'e göre aşağıdaki yorumlar yapılmıştır.

- Akademisyenlerin “*Odamın duvarlarında ses yalıtımı vardır*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucunun “*hayır*” çıkması, kişilerin çalışma esnasında dış ortam kaynaklı gürültülere maruz kaldıklarının göstergesidir. Gürültü kişilerde dikkat dağınıklığına yol açtığı için, akademisyenlerin yeni ofislerinde çalışma verimlerinin azaldığı düşünülmektedir.
- Akademisyenlerin “*Odamdaki duvar, mobilya, zemin renkleri beni rahatsız etmektedir*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucunun “*hayır*” çıkması, akademisyenlerin ofis ortam koşullarından renk parametresinden genel olarak memnun olduklarını göstermektedir. Bu memnuniyetin de akademisyenlerin iş tatminine ve iş motivasyonuna olumlu katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
- Akademisyenlerin “*Odamda aydınlatma kaynağı olarak gün ışığı yeterli olmaktadır*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucunun “*evet*” ve “*Odamda gündüz de olsa sürekli lamba kullanmak zorunda kalıyorum*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucunun “*hayır*” çıkması birbirlerini destekleyen nitelikte cevaplardır. Ergonomide doğal ışık kaynağı kullanılması esas

olup, doğal ışığın olmadığı yerlerde yapay aydınlatma tercih edilir. Akademisyenlerin odalarında aydınlatma için güneş ışığını kullanmaları ve lamba kullanımına ihtiyaç duymamaları ofis ortamının aydınlatma yönünden çalışma için uygun olduğunu göstermektedir.

- “*Odamdaki toz ve dumandan rahatsızım*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucunun “*hayır*” olması, ofis ortamının iş hijyeni açısından uygun olduğunu ve iş hijyenine bağlı meslek hastalıklarının olmayacağını göstermektedir.
- “*Sandalyemin ayarlanabilir özellikte olmasına rağmen, benim ölçülerime uygun değil*”, “*Sandalyede otururken bazen kayacak gibi oluyorum*”, “*Bilgisayarın göz hizamda olmasını sağlamak için bilgisayarın altına kitap, defter, vb. yerleştiriyorum*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucunun “*hayır*”, ve “*Sandalyede otururken ayaklarım yere değmediği için yükseltici kullanmak zorunda kalıyorum*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucunun “*kesinlikle hayır*” olması ofis malzemelerinden masa, sandalye ve bilgisayar ile ilgili sorulara verilen cevapların birbiri ile tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu cevaplar doğrultusunda yeni alınan ofis malzemelerinin akademisyenlerin fiziksel özelliklerine uyumlu olduğu söylenebilir. Sandalye, masa ve bilgisayarın kişilerin fiziksel özelliklerine göre ayarlanabilir olması, iş çalışma koşullarını iyileştirmektedir.

- Akademisyenlerin sandalye ile ilgili sorulara verdikleri hayır cevaplarının yanında “*Sandalyede uzun süre oturduğumda boynumda ve sırtımda ağrılar hissediyorum*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucu “*evet*” olmuştur. Bu da akademisyenlerin uzun süren çalışma saatlerinin olduğu düşünüldüğünde ancak yorumlanabilir. Kişilerin uzun süre hareketsiz şekilde sandalyede vakit geçirmeleri boyun ve sırtta ağrılara neden olabilir. Bu durumda özellikle işverenler tarafından ergonomik nedenlerle oluşabilecek meslek hastalıkları hakkında çalışanlara eğitim verilmesi ve çalışma ortamında basit hareketlerle oluşabilecek bel ve sırt ağrılarının oluşumunun nasıl önüne geçinilebileceğinin anlatılması gerekmektedir.
- Ankete katılan akademisyenlerin “*Mouse’un kablolu olması işimi yaparken hareket alanımı kısıtlıyor*” sorusuna verdikleri cevapların ortalamasıyla elde edilen kodlama sonucu “*evet*” olmuştur. Bilgisayarın işlev açısından en önemli unsurlardan biri mouse’un kablolu olması akademisyenlerin çalışma alanlarını kısıtladığından, akademisyenlerin çalışma veriminde azalma olacağı düşünülmektedir. İşverenler tarafından kişilerin daha verimli çalışmalarını sağlamak için mouse’un kablosuz olanla değiştirilmesi gerekmektedir.
- Basitmiş gibi görünen günlük hareketlerin bile her gün tekrarlanmasına bağlı olarak mesleki kas ve iskelet sistemi hastalıklarının (MKİS) görülmesi kaçınılmazdır. İş güvenliği uzmanı veya iş yeri hekimi tarafından MKİS hastalıklarını

engellemek (eğilme, uzanma gibi) için kişilere doğru hareketlerin nasıl olduğuna dair bilgilerin yanında uygun oturma ve çalışma pozisyonlarının, uygun dinlenme aralarının önemi ve etkin geçirme yöntemlerinin nasıl olacağı hakkında eğitimler verilmelidir.

Sonuç olarak akademisyenlerin yeni geçilen ofis ortamından ve kullandıkları araç-gereçlerinden dolayı olumsuzluk yaşamadıkları tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akpınar, T., Çakmakkaya, B. Y., ve Batur, N. (2018). “Ofis Çalışanlarının Sağlığının Korunmasında Çözüm Önerisi Olarak Ergonomi Bilimi”. *Balkan and Near Eastern Journal of Social Sciences*. 04 (02): 77-98
- Ana Britannica. (1988). Ana yayıncılık İstanbul, (8), 249.
- Secer Kariptas, F., Yararel, B., Ünver, B. (2019). Ofis Mekanlarının Ergonomik Tasarımının Çalışanlar Üzerindeki Etkileri The Effect Of The Ergonomic Design Of Office Spaces On Employees.
- Şimşek, M. (1994). Mühendislikte Ergonomik Faktörler. İstanbul: Marmara Üniversitesi Yayınları.
- Kaya, S. (2008), “Ergonomi ve Çalışanların Verimliliği Üzerine Etkileri”, İzmir Ticaret Odası Ar&Ge Bülten Ağustos-Kurumsal.
- Özkan, N. F. ve Kahya, E. (2017). “Bir üniversitenin idari ofislerindeki ergonomik risklerin değerlendirilmesi”. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32:1, 141-150.
- Yararel, B . (2019). “Ofis Tasarımında Ergonomik ve Antropometrik Etkenler. Mimarlık ve Yaşam”. 4 (1) , 141-153. DOI: 10.26835/my.555794
- Yavuz, Ş., Bülter, A., Köse, D. (2018). Osmancık Ömer Derindere Meslek Yüksek Okulu’nda İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürünün İncelenmesi. *International Journal of Labour Life and Social Policy*, 1 (2) , 24-36.
- Yakut, M. Z., Selbaş, R., Yakut, G., (2013). “Ofis Ortamında İklimlendirmenin Çalışanlara Etkisi” Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi Yıl: 2013/1, Büro Yönetimi Özel Sayısı.

BÖLÜM 5

MİKRO ELEKTROMEKANİK SİSTEMLERİN ÜRETİMİ İÇİN KULLANILAN EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR¹

¹ Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Muş, Türkiye. o.ulkir@alparslan.edu.tr

GİRİŞ

Eklemeli imalat veya 3B yazıcı yöntemi, mikro elektromekanik sistemlerin (MEMS) oluşturulmasında kullanılan minyatür bileşenlerin kolay üretimini sağlayan devrim niteliğinde bir üretim teknolojisidir (Gibson vd., 2014). MEMS cihazları, havacılık, otomotiv, biyomedikal cihazlar, elektronik ve giyilebilir teknoloji gibi alanlarda birçok uygulamaya sahiptir (Fu vd., 2004; Zhang vd., 2017). Eklemeli imalat teknolojisi, karmaşık 3B modellerin sanal bir alanda çizilebildiği bilgisayar destekli çizim programından doğrudan bileşenler oluşturmak için kullanılır. Daha sonraki aşamada tasarlanan bileşenler katman katman biriktirme ile 3B yazıcı da üretilir. İşleme ve delme gibi geleneksel üretim işlemlerinden farklı olarak eklemeli imalat üretim sürecinde, yerinde işlem kontrolü, kesici takımlar, soğutucular veya diğer ek kaynaklar gerektirmezler (Willilams vd., 2016; DebRoy vd., 2018).

Eklemeli imalat tekniklerinin en önemli avantajlarından biri, geleneksel imalat teknikleri ile erişilemeyen basit adımlar kullanarak küçültülmüş karmaşık yapısal geometriler oluşturma yeteneğidir. Ayrıca eklemeli imalat teknikleri, geometrik tasarımlarda esneklik, hassas kontrol, mükemmel özellik boyutu ve şekilleri, düzgün gradyan dağılımı ve işlevsel olarak derecelendirilmiş materyalleri yazdırma yeteneği gibi başka birçok özellik sunmaktadır (Chacon vd., 2017; Kok vd., 2018). Son yıllarda, 3B yazıcı teknolojisi, bu tür teknikleri kullanarak MEMS cihaz imalatının yolunu açan basit prototipleşmeden seri üretime

paradigma değişikliğine neden olan inovasyon konusunda önemli ilerleme kaydetmiştir.

MEMS, ölçülen bir mekanik sinyalin optik, elektrik veya termal olabilecek makine tarafından okunabilir bir sinyale dönüştürülmesini içeren minyatür mekanik ve elektromekanik elemanlardan (genel olarak 1 ila 100 µm) oluşan bir teknolojidir. 1980'lerin başında ortaya çıkmasından günümüze kadar, MEMS teknolojisi mikro/nano araştırma alanlarında devrim yaratmıştır (Wang vd., 2019). Başlangıçta MEMS, basınç ve sıcaklık sensörleri, gaz kromatografları, ivmeölçerler ve anahtarlar gibi çeşitli uygulamalar için geliştirilmiştir (Zou vd., 2014; Singh vd., 2015). Son yıllarda MEMS teknolojisi optik, biyomedikal cihazlar, terapatik stratejiler, mekanik, elektrik ve havacılık çalışmaları gibi çeşitli araştırma alanlarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir (Guarnier, vd., 2014; Bosman vd., 2014). Mevcut MEMS cihazlarının bazıları, projektörler için dijital ışık işleme, cep telefonu paketleri içindeki mikro jiroskoplar, otomasyonlardaki ivmeölçerler ve basınç sensörleri, mikro çip üzerinde DNA teşhis araç takımları, çeşitli çevre ve havacılık uygulamaları için gaz sensörleri içerir (Hirabayashi vd., 2015). Genel olarak, tipik bir MEMS cihazı, mikro boyutlu platform, algılama elemanları, mikro boyutlu aktüatörler ve mikro elektronik olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır (Steiner vd., 2015; Tan vd., 2016; Ertuğrul vd., 2019).

MEMS cihazları, yüzey mikro işleme, gövde mikro işleme, litografi, galvanoformung, abformung, ıslak/kuru reaktif dağlama, ultraviyole fotolitografi, metal biriktirme şemaları, kimyasal buhar biriktirme

işlemleri gibi geleneksel teknolojiler kullanılarak üretilmektedir (Howe, 1988; Kovacs vd., 1996; Lee vd., 1999). Bu teknikler, silikon wafer'ların yüzeyi üzerinde ince tabakalar halinde hassas ve minik malzeme hacimlerini işleyen katkı veya çıkarma işlemlerine dayanmaktadır (Bustillo vd., 1998; Lee vd., 1999). Bu geleneksel yöntemler son derece hassastır ve düzlemsel geometrilerin üretimi için uygundur. Yüksek en boy oranlarına sahip MEMS cihazlarının üretimi için, yığılmış silikon wafer plakalarda 3B özelliklerin oluşturulduğu ıslak dağlama ve derin reaktif iyon dağlama işlemleri kullanılır (Burrer ve Esteve, 1995). Bu üretim süreçleri, işlem karmaşıklığı, özel tesis ve ekipman ihtiyacı, sofistike çalışma ortamı, uzun teslim süresi ve bazı esnek malzemelerle (polimerler ve plastikler) uyumsuzluk gibi bazı dezavantajlarla ilişkilidir. Bu zorlukların ortaya çıkması, MEMS topluluğunun alternatif 3B mikro fabrikasyon stratejilerini araştırması için bir pencere açmıştır. Son yıllarda, kapasitörler, dirençler, indüktörler, mikro kanallar, mikro rezonatörler, mikro kirişler, elektronik baskılı devre ve sensör platformları gibi cihazlarda MEMS üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımında önemli bir artış gördü (Teh, 2017; Lifton vd., 2014; Hormes vd., 2003; Ertuğrul ve Ülker, 2020; Ülker ve Ertuğrul, 2020).

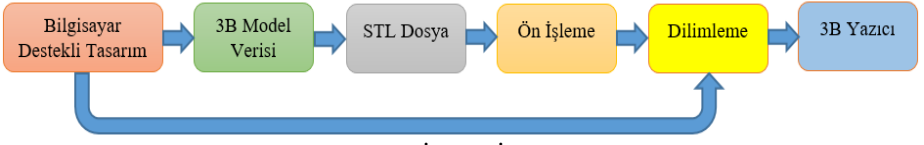
Bu çalışmada, eklemeli imalat alanında yapılan son gelişmeler ışığında, geniş kapsamlı MEMS cihazlarının üretimi için 3B yazıcı teknolojisindeki ilerleme vurgulanmaktadır. MEMS uygulamaları için eklemeli imalat alanında yayınlanan önceki çalışmalar göz önüne alındığında, odak noktamız 3B yazıcı destekli tekniklerle ticari anlamda

başarı yakalayan fonksiyonel MEMS teknolojilerinden bazıları olacaktır. Ayrıca MEMS tabanlı uygulamalar için 3B baskı sürecinin uygulanmasıyla ilgili zorluklar ve gelecekteki yönelimler tartışılacaktır.

1. EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ

Eklemeli imalat, üç boyutlu olarak tasarlanan geometrik verileri kullanarak malzemenin katman katman eklenmesiyle imalatını gerçekleştiren bir imalat yöntemidir. Bu teknik ile karmaşık geometrik yapılara sahip parçaların hızlı ve ucuz bir biçimde üretimi yapılabilmektedir. Bu teknikte parça, bilgisayar destekli tasarım programları ile çizim, tersine mühendislik, bilgisayar tomografi gibi farklı yöntemler ile ortaya çıkarılan 3B modelden üretilir. 3B model çok sayıda ince katmanlara dilimlenir ve imalat sistemleri, parça tamamlanıncaya kadar her bir ardışık biçimde üretim için bu geometrik veriyi kullanır (Çelik vd., 2013; Giannatsis ve Dedoussis, 2009; Özsoy ve Duman, 2017; Ertugrul, 2020).

Üretimi düşünülen 3B model çoğu durumda direk olarak 3B yazıcıya gönderilmemektedir. İlk olarak, 3B model eklemeli imalat arabirimi olan STL biçimli dosyaya dönüştürülür. Daha sonra, onarım, tablaya yerleşim ve hata analizi gibi ön işlemlere tabi tutulur. Ön işleme aşamasından sonra 3B model dilimlenerek üretime hazır hale getirilir ve 3B yazıcı cihazına gönderilir. 3B katı model STL dönüşümü yapılmadan da dilimlenerek yazıcıya gönderilebilmektedir. Eklemeli imalat üretim işlemi veri akış diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir (Duman ve Kayacan, 2016).



Şekil 1: Eklemeli İmalat İşlemi Veri Akışı

STL formatı 3B modelin dış yüzeyini temsil eden sıralanmamış bir üçgen yüzey listesinden ibarettir. Üçgen yüzeyleri oluşturan her üç vektör için x, y, z koordinatları ve bir normal vektörle tanımlanır. STL format ile çalışmanın, 3B modelin basit bir biçimde temsil edilmesi ve birçok eklemeli imalat ve CAD sisteminde kullanılabilmesi gibi birçok avantajları vardır (Huang vd., 2003).

Uluslararası standardizasyon organizasyonu (ISO) ve Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM), eklemeli imalat teknolojilerini biriktirme tekniklerini temel alan gruplar, malzemenin kaynaşmış veya katılaştırılmış biçimi, kullanılan malzeme türleri gibi yedi kategoriye ayırdı. Bu çalışmada tartışılan eklemeli imalat teknolojileri sıvı, toz ve katı gibi kullanılan malzeme temelinde sınıflandırılmıştır ve 3B yazıcı tekniklerinin bazı özellikleri özetlenmiştir.

1.1. Sıvı Bazlı Üretim Teknikleri

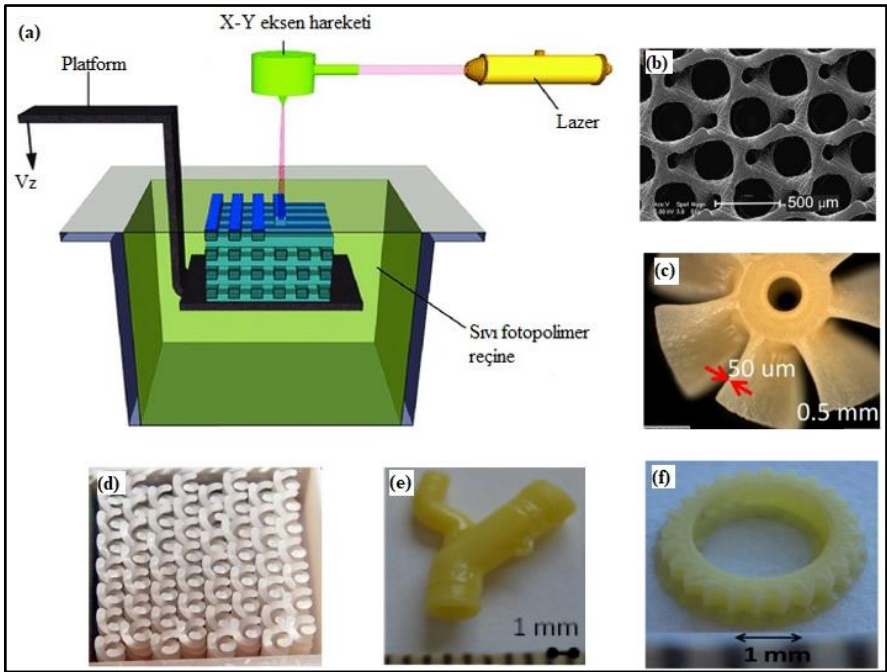
Sıvı malzeme üretim teknikleri, temel işlem malzemesi olarak erimiş malzemeleri (sıvı), radyasyonla iyileştirilebilen reçineleri veya polimerize edilebilir malzemeleri kullanır. Bu malzemelerin seçici olarak kürlenmesi için bir ışık kaynağı kullanılır. Bu bölümde, bu kategoriye giren ve en çok kullanılan eklemeli imalat teknikleri anlatılmıştır. Bu teknikler: stereolitografi, dijital ışık işleme, ön polimerizasyon, inkjet baskı ve doğrudan lazer yazma dır.

1.1.1. Stereolitografi

“Stereolitografi (SLA)” terimi ilk kez 1980’lerin ortasında Charles Hull tarafından ortaya atılmıştır. Bu işlemde, daha önce bir kap içinde bırakılmış bir sıvı fotopolimer tabakası ultraviyole (UV) ışığına maruz bırakılarak seçici olarak kürlenir (Kaur ve Srivastava, 2002). Işınlama üzerine fotopolimerler, monomerlerin polimer oluşturmak üzere çapraz bağlandığı ve sıvıdan katıya bir faz değişikliğine yol açtığı bir dizi polimerizasyon reaksiyonuna maruz kalır. Bu işlem kazan fotopolimerizasyonu olarak da bilinir. SLA üretim yönteminin temel metodolojileri Şekil 2 (a)’da gösterilmiştir (Tian vd., 2017). Fotopolimerlerin kendinden yapışkanlı özellikleri, bir 3B geometrisinin formülasyonuna yol açan ara katmanlar arası bir bağlanma ile sonuçlanır. Parça imalatından sonra bir kimyasal banyoya daldırma işlemi ekstra reçineyi çıkarmak için gerçekleştirilir ve ardından UV ile kürlenir (Zhang vd., 1999). Bu işlem, yüksek çözünürlük, doğruluk, pürüzsüz yüzey, geniş yapı alanlarına uyum ve karmaşık geometriler oluşturma yeteneği gibi bazı istisnai özellikler sunar. Stereolitografi ilk olarak 1993 yılında Ikuta ve Hirowata tarafından MEMS üretimi için kullanıldı (Ikuta ve Hirowatari, 1993). Minimum 0.25 μ hassasiyeti ve yaklaşık 30 dakikalık bir üretim süresi ile polimer ve metallere 3B mikro yapılarının farklı tiplerini başarıyla ürettiler.

Mikron yapıda stereolitografi kullanılırsa, işlem mikro-stereolitografi olarak isimlendirilir (Zhang vd., 1999). Mikro-stereolitografi işleminde, bir ultraviyole ışık 1-2 μ kalınlığa kadar bir fotopolimer tabakası üzerine odaklanır, böylece mikron altı özellikler yüksek

çözünürlükle oyulabilir. Bir çalışmada 5μ nokta büyüklüğünde bir UV ışını ile çalışan gelişmiş bir mikro-stereolitografi sistemi tasarlanmıştır (Zhang vd., 1999). Stereolitografi yöntemi kullanılarak üretilen çeşitli 3B mikro yapılar Şekil 2 (b)-(f)'de gösterilmiştir (Halloran, 2016; Pan vd., 2017; Gauvin vd., 2012).



Şekil 2: a) SLA Yönteminin Temel Metodolojisi b) Doku İskelesi c) Turbo Fan d) SiO₂ Seramik e) Dişli Boru f) Mikro Dişli

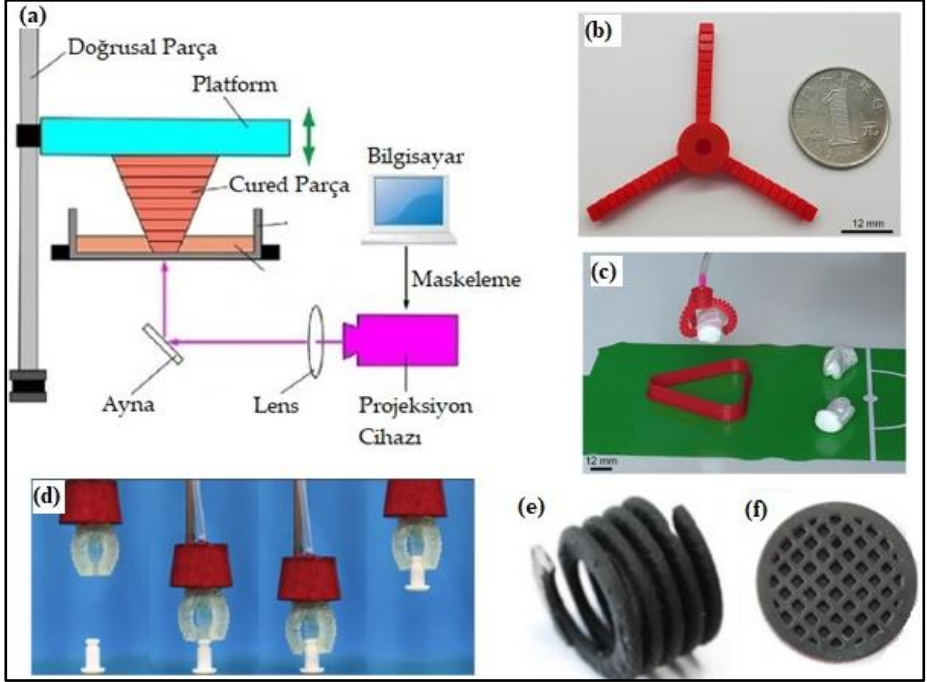
1.1.2. Dijital Işık İşleme

Dijital ışık işleme (DLP) yöntemi, UV veya lazer ışık kaynağının fotopolimerizasyon için basit bir beyaz ışık kaynağı ile değiştirildiği mikro-stereolitografi işleminin gelişmiş bir varyantıdır. DLP, 3B bir modelin her bir katmanının iki boyutlu desenli bir görüntüsünü oluşturmak için dijital maskeleme, dijital mikro-ayna cihazı (DMD)

veya sıvı kristal ekran (LCD) gibi uzamsal ışık modülasyonu (SLM) ögesi kullanır (Zheng vd., 2012). Dijital görüntü, voksel adı verilen birçok kare pikselden oluşur ve DLP'nin çözünürlüğü, piksel boyutu değiştirilerek kontrol edilebilir. Bu işlemde, sıvı polimer teknesi, dijital projektörden yansıtılan desenli ışığa maruz bırakılarak tek bir pozlamada iki boyutlu bir kesitin tamamının fotopolimerizasyonuna izin verir. DLP işleminin temel metodolojileri Şekil 3 (a)'da gösterilmiştir (Ge vd., 2018).

3B katı model, sonraki her katmanın sertleşmesinden sonra odak düzleminin dikey konumu değiştirilerek üretilir. DLP yöntemi kullanan 3B yazıcılar, ekipmanın nispeten daha düşük toplam maliyetiyle daha yüksek işleme hızlarında daha büyük yapı boyutlarının üretilmesini sağlar. Bu yazıcıların diğer bazı avantajları, hızlı üretim, yüksek çözünürlük, hassasiyet ve minimum malzeme tüketimidir. DLP işlemi, bir çıkıntı yapısının veya alttan kesilmiş bir yapının yazdırılması için bir destek yapısı gerektirir. Ayrıca basılı numunelerin kürlenme ve temizleme aşamalarını gerektirir. Bir çalışmada DLP tekniği ile sulu çözelti içinde odun yığını ile yapılandırılmış bir hidrojel iskelesinin 3B baskısı rapor edilmiştir (Pawar vd., 2016). Diğer bir çalışmada ise pnömatik olarak enerjili yumuşak aktüatörleri üretmek için yüksek oranda esnekliğe sahip ve UV ile kürlenebilen elastomerlerin baskısı için DLP tekniği kullanılmıştır (Patel vd., 2017). Bu yapılar mükemmel esnekliği ortaya çıkarır ve yumuşak robotik alanında DLP yöntemini kullanılmak için büyük bir potansiyele sahiptir. DLP, esnek elektronik cihazlar için şekil hafızalı polimerlerin basılması, 3B iletken polimerik

yapılar, 3B elektrotlar ve yumuşak pnömatik mikro tutucular gibi çeşitli uygulamalar için birçok karmaşık cihazın imalatında kullanılmıştır. DLP yöntemi kullanılarak üretilen çeşitli 3B yapılar Şekil 3 (b)-(f)'de gösterilmiştir (Ge vd., 2018; Patel vd., 2017; Mu vd., 2017).



Şekil 3: a) DLP Yönteminin Temel Metodolojisi (b, c) Pnömatik Tutucu d) Pnömatik Aktüatör e) Dalga Şeklinde Rezistans f) Delikli Kondansatör

1.1.3. Ön Polimerizasyon

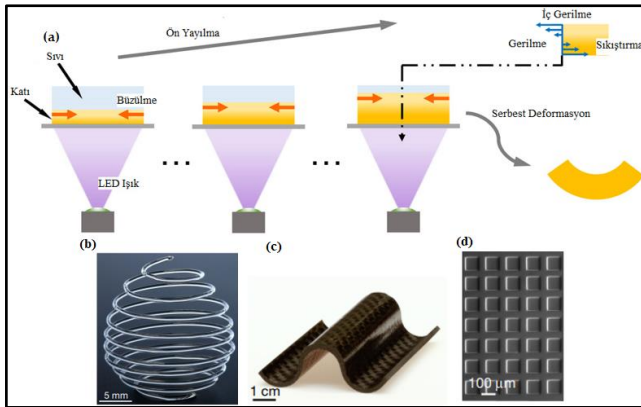
Ön polimerizasyon (FP) kendi kendine devam eden bir polimer kütleme işlemidir ve bugün sektörde en umut verici tekniklerden biridir. FP yöntemi, kendiliğinden ilerleyen bir ekzotermik reaksiyon dalgasının, sıvı monomerlerini, lokalize bir reaksiyon bölgesinde tamamen kürlenmiş polimerlere dönüştürdüğü bir polimerizasyon işlemidir (Robertson vd., 2018). Tipik bir FP işleminde, bir monomer

çözeltisi ve gizli başlatıcı karışımı, başlatıcı monomerlerin polimerizasyonu için tetiklenene kadar lokal olarak ısıtılır. Tetiklendikten sonra FB yöntem reaksiyonu daha da ileri götürmek ve malzemeyi sertleştirmek için polimerizasyondan entalpi veya dahili enerji kullanır. Üç tip FP vardır: ön fotopolimerizasyon (FPP), izotermal ön polimerizasyon (IFP) ve termal ön polimerizasyon (TFP) (Moeller ve Matyiaszewski, 2012).

FPP işleminde, polimer film, sürekli bir radyasyon akışı vasıtasıyla, genellikle bir UV ışığı yoluyla, belirli bir doğrultuda sürekli olarak sertleştirilmekte/polimerize edilmektedir (Cabral vd., 2004). IFP işlemi, yüksek moleküler ağırlıklı katı polimer parçasından monomerinin bir çözeltisine ve bir termal radikal başlatıcısına lokalize polimerizasyon yayılımını içerir. Monomer çözeltisi, polimer tohumlarını termal başlatıcı mevcudiyetinde çözer, böylece yavaşça daha fazla sertleştirilen lokal bir viskoz jel bölgesi oluşturur. TFP, termal taşınımın sinerjik birleşimi ve bir ekzotermik polimerizasyon işleminin reaksiyon hızından kaynaklanan lokalize ısıtılmış reaksiyon bölgelerinin yayılmasını içerir. TFP işleminde polimerizasyonu başlatmak için, termal başlatıcıları ayrıştırmak ve bunları serbest radikallere dönüştürmek için havya gibi harici bir küçük ısı kaynağı gereklidir (Pojman vd., 1996).

Basit üretim protokolü, daha kısa işlem süresi ve yüksek verim gibi FP yöntemlerinin mükemmel özellikleri, havacılık, otomobil ve MEMS üretimi gibi birçok uygulama için uygun olmasını sağlamaktadır. Bir çalışmada foto-iyileştirilebilir polimerlerle FPP yöntemini kullanarak

karmaşık 3B origami yapıları oluşturuldu (Zhao vd., 2017). Üretim tekniği kavramı, sıvı reçinenin fotopolimerizasyona bağlı hacim büzülmesine dayanmaktadır. LED'lerin ışınlanması üzerine, ışığa doğrudan maruz kalan katman, bitişik katmanlardan daha hızlı bir şekilde kürlendi. Sıvı-katı geçiş cephesi sıvı reçineden geçtikçe, sertleşen polimer filmin kalınlığı artmıştır. Katmanlar arasındaki sıcaklık gradyanı, 3B origami yapılarının oluşumuyla sonuçlanan düzgün olmayan bir hacimde büzülme yol açtı. Fotopolimerizasyon sırasında hacim büzülmesi, foto emiciler kullanılarak zayıflatılmış bir ışık alanı oluşturularak kontrol edildi. Foto emiciler, hacim küçülmesini sıralı bir şekilde kontrol eden bir ışık yoğunluğu gradyanı üretti. FB işleminin temel metodolojileri Şekil 4 (a)'da gösterilmiştir (Zhao vd., 2017). FP yöntemleri, mikro elektronik, biyomedikal mikro aygıtlar, yumuşak sensörler ve aktüatörler gibi çeşitli uygulamalar için MEMS yapılarının imalatına yeni ve basit bir yol sağlamıştır. FB yöntemleri kullanılarak üretilen çeşitli 3B yapılar Şekil 4 (b)-(d)'de gösterilmiştir (Zhao vd., 2017; Robertson vd., 2018).



Şekil 4: a) FP Yönteminin Temel Metodolojisi b) Serbest Biçimli Yapı c) Oluklu Karbon Parça d) Jel Tabaka

1.1.4. Inkjet Baskı

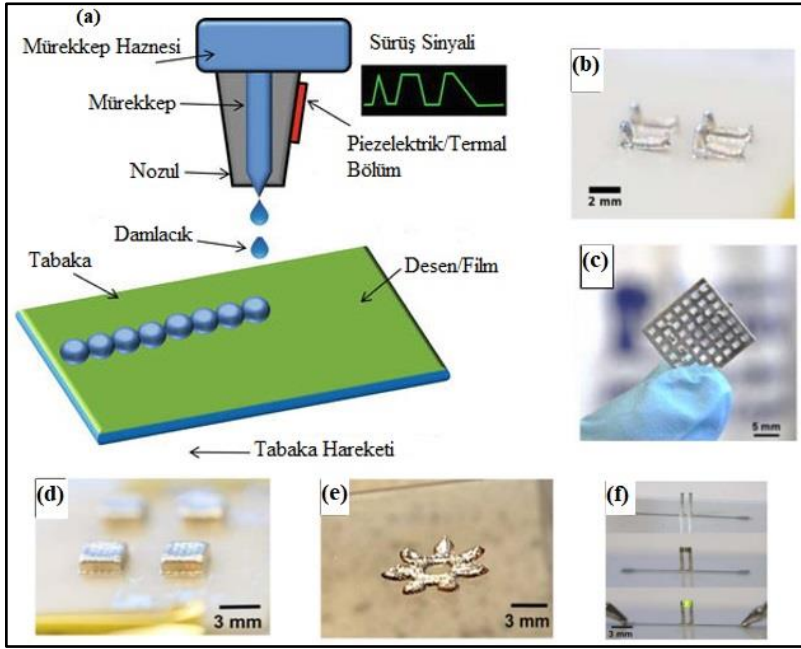
Inkjet baskı (IP), sıvı fazlı malzemeler için kullanılan temassız dijital baskı tekniğidir. Üretim süreci esas olarak, yüksek hareket çözünürlüğüne sahip mikrometre boyutunda bir mürekkep püskürtmeli meme kafası içinden damlacıklar olarak mürekkebin kontrol edilebilir şekilde dağıtılmasını içerir. Dağıtılan mürekkep, belirtilen desende bir alt tabaka üzerine birikir ve birden çok katman, yazıcının çözünürlük sınırı dahilinde bilgisayar destekli bir tasarım paketinin hassasiyeti ile üst üste yerleştirilebilir. Sürekli inkjet (CIJ), elektrostatik inkjet (EIJ) ve isteğe bağlı damla (DOD) baskı olmak üzere üç tür inkjet baskı tekniği kullanılır. Tipik bir CIJ baskı sisteminde, sıvı haznesinin basınçlandırılmasıyla sürekli bir sıvı (mürekkep) jeti üretilir, bu da kontrol edilebilir bir mikro nozuldan dışarıya doğru sürekli bir damla akışı ile sonuçlanır. Damla boyutu sıvı reolojisi, meme çapı ve tahrik frekansı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Yazdırma işlemi sırasında istenmeyen damlaların oluşması, MEMS imalatında CIJ sisteminin kullanımını sınırlar. Bu teknik çoğunlukla endüstriyel uygulamalar için, özellikle ürün markalama ve kodlamada kullanılır. EIJ yazıcıda, indüklenen elektrik alanından dolayı damlacık oluşumu meydana gelir. Yeterince yüksek bir uygulama potansiyelinde, yüklü bir sıvı yüzeyinde yaşanan elektrostatik itme nedeniyle, Taylor konisi olarak bilinen bir sıvı menisküs oluşur (Taylor, 1969). DOD baskı sisteminde, gerektiğinde bir mürekkep damlası üretilir, bu da onu CIJ ve EIJ baskı tekniklerinden daha ekonomik hale getirir.

Şekil 5 (a)'da tipik bir DOD baskı sisteminin temel metodolojileri gösterilmiştir (Khan vd., 2019). Bu teknolojiye, baskı memesi kafasının çalıştırılmasıyla damlalar üretilir. Inkjet başlığı, dağıtılan mürekkep damlacıklarının kırılması için piezoelektrik, termal ve elektrohidrodinamik gibi çeşitli mekanizmalarla çalıştırılır (Lee, 2002). Bazen kabarcık püskürtmeli baskı olarak da adlandırılan termal DOD inkjet içinde, akışkanla temas eden ince bir film ısıtma elemanı, akışkan bölmesindeki nozul kafasının yakınında bulunur. Isıtıcıya elektrik akımı verildiğinde, doğrudan temas halindeki sıvı ısıtılır ve kaynama sıcaklığında bir kabarcık oluşur. Yeni oluşan kabarcık, elektrik beslemesi 'kapatıldığında' ısı transferi nedeniyle hızla çöker. Bu kabarcık oluşumu ve hızlı çökme, küçük bir delikten bir damla sıvıyı dışarı atmak için kullanılan basınç darbesi üretir.

Piezoelektrik tahrikli DOD inkjet yazıcının çalışma prensibi, basınç impuls üretiminde kullanılan mekanizma haricinde termal mürekkep püskürtmeli yazıcının çalışma prensibine benzemektedir. Bu sistemde, baskı kafasına bir piezoelektrik silindirik boru veya bir piezoelektrik düz plaka monte edilir ve voltaj uygulandığında, mürekkep haznesini daraltır ve sıkar (Stemme ve Larsson, 1973). Mürekkep haznesinin hacmindeki ani azalma, basınç darbesi üretir, bu da memeden bir damlacık çıkmasına neden olur. Çıkarılan damla yerçekimi etkisi altına girer ve alt tabakaya etki edene ve hareketi sırasında edinilen momentumun altına yayılıncaya kadar hava direncinden etkilenir. Damla daha sonra çözücü buharlaştırma yoluyla kurutulur ve artık madde işareti mürekkep kalıntısıdır. Inkjet baskı esas olarak, meme

şekli ve boyutu, mürekkebin viskozitesi, aktüatörlerin voltaj beslemesi ve ortamın çalışma koşulları gibi çeşitli faktörlerden doğrudan etkilenen damlacık ayrılmasına bağlıdır. Mükemmel doğruluk, iyi yüzey kalitesi, temassız baskı, mürekkebi daha düşük viskoziteli, düşük mürekkep israfı ve düşük üretim maliyeti ile basma yeteneği gibi çeşitli avantajları nedeniyle, inkjet baskı teknikleri günümüzde MEMS cihazları için mikro imalatta yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son zamanlarda, fotolitografi işleminde fotorezist baskı için inkjet baskı kullanılmıştır. Inkjet baskının geleneksel fotolitografi işlemlerine göre bazı avantajları vardır. Örneğin, fotolitografi, fotorezist kaplama, maske hazırlama, UV ışığına maruz kalma, geliştirme adımları, temizleme ve pişirme sonrası aşamalar gibi çeşitli aşamalar gerektirirken, inkjet baskı durumunda, baskı gibi malzemelerin atılmasını tamamlamak için çok az adım gereklidir (Demirci, 2006; Fuller vd., 2002). Inkjet baskı, MEMS cihaz üretimi alanında önemli bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Baskılı devre kartı (PCB), düz panel ekranlar (FPD'ler), yarı iletkenler ve sensörler için mikro kalıpların basılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Inkjet baskı yöntemi kullanılarak üretilen çeşitli 3B yapılar Şekil 5 (b)-(f)'de gösterilmiştir (Vaithilingam vd., 2018).



Şekil 5: a) İnkjet Baskı Yönteminin Temel Metodolojisi b) Konsol Yapılar c) Izgara Yapısı d) Kübik Yapılar e) Dişli Yapı f) Işık Yayan Diyotlar

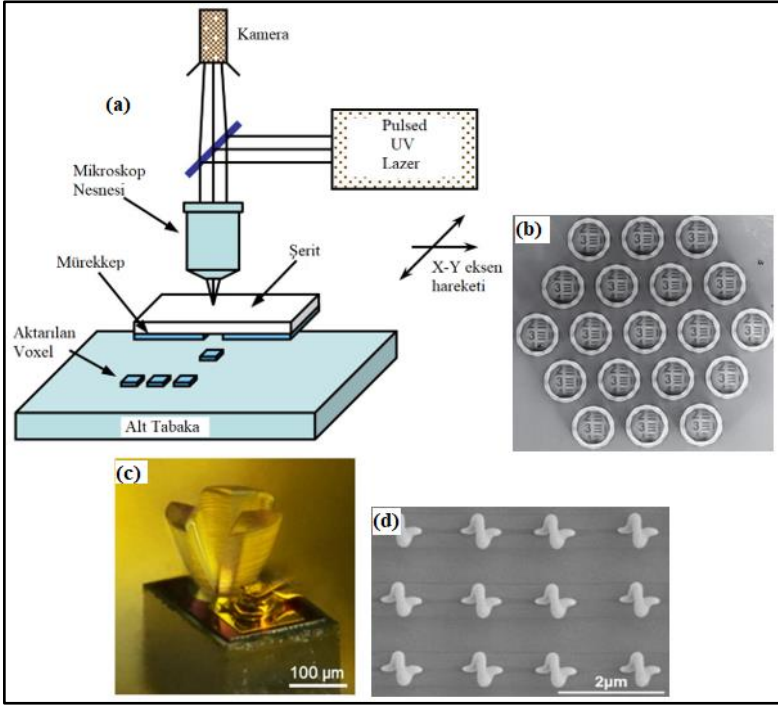
1.1.5. Doğrudan Lazer Yazma

Doğrudan lazerle yazma (DLW), uygun fotopolimerize edilebilir malzemeler kullanılarak 3B yapıların üretilmesine izin veren çok resimli polimerizasyon tabanlı bir 3B yazıcı tekniğidir. Bu işlemde, sıvı fotopolimerize olabilen malzemelerin yüzeyini aydınlatmak için belirtilen dalga boyunda odaklanmış bir lazer ışığı kullanılır. Darbeli lazer ışığı sıvı fotopolimer üzerindeki bir noktaya sıkıca odaklandığında, lokalize polimerizasyona neden olan iki veya daha fazla fotonu doğrusal olmayan bir şekilde emilir. Polimerin belirli bir kalınlığına karşılık gelen küçük bir hacimde malzemenin başarılı bir şekilde polimerizasyon işleminden sonra, ışının odak noktası, sonraki katmanları yazdırmak için sayısal olarak kontrol edilen bir motor

kullanılarak değiştirilir (Deubel vd., 2004). Şekil 6 (a)'da, DLW teknolojisinde yer alan temel işlem adımları gösterilmiştir (Pearre vd., 2019).

DLW yöntemi, geleneksel düzlemsel devrelerle mkemmел üretim uyumluluğu, yüksek yazma hızı, kırınım sınırının altında bile yanal özellik boyutlarına sahip 3B mikro/nano yapıların desenlemesini sağlayan yüksek uzamsal znrlk gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Genel olarak, DLW tekniği hidrojel, polimerler, siloksanlar ve organik/inorganik mezeller gibi elektriksel olarak yalıtılmıŐ malzemeleri basabilir. İletken malzemelerin dökümü için 3B kalıplar geliŐtirmek için de kullanılabilir (Fischer ve Wegener, 2013).

DLW yöntemi, MEMS uygulamaları için karmaşık 3B polimerik yapıların üretimini için uygun bir yüksek znrlkl litografi tekniği olarak kabul edilmiştir. DLW, süper kapasitörlerin, fotonik kristallerin üretiminde de kullanılmıştır. Bir alıŐmada DLW tekniği ile esnek mikro-süper kapasitörlerin üretimini yapılmıştır (In vd., 2015). Diğer bir çalışmada ise telekomünikasyon uygulamaları için DLW aracılığıyla 3B foton kristal Őablonları retilmiŐtir (Deubel vd., 2004). DLW yöntemi kullanılarak üretilen çeşitli 3B yapılar Şekil 6 (b)-(d)'de gösterilmiştir (Teh, 2017).



Şekil 6: a) DLW Yönteminin Temel Metodolojisi b) CMOS Görüntü Sensörü c) Kolimatör Optiği d) Omega Parçalarının SEM Görüntüsü

1.2. Toz Bazlı Üretim Teknikleri

Toz bazlı 3B yazıcı işlemleri, malzemelerin baskı için toz halinde kullanılmasını içermektedir. Toz bazlı eklemeli imalat teknolojilerinin genel örnekleri arasında seçmeli lazer sinterleme (SLS), seçmeli lazer ergitme (SLM), lazer mikro sinterleme (LMS) ve elektron ışınli ergitme (EBM) teknikleri bulunur.

1.2.1. Seçmeli Lazer Sinterleme/Ergitme

Seçmeli lazer sinterleme (SLS), bir parçanın lazer ışığıyla ışınlama yoluyla elde edilen toz malzemelerin eritilmesi ve sinterlenmesi yoluyla

katman katman tabaka olarak oluşturulduğu toz bazlı bir 3B yazıcı tekniğidir. Tipik bir SLS işleminde, toz malzemeler bir merdane sistemi kullanılarak yatak üzerinde eşit olarak dağıtılır ve bir lazer ışını yüzey üzerinde belirtilen bir yolu tarar ve bu da maruz kalan bölgelerdeki tozların sinterlenmesine neden olur. Açığa çıkan toz malzemeler, lazer ışını tarafından empoze edilen aşırı yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle moleküler seviyede kaynaşır ve daha sonra oda soğutma etkileri katı bir parçanın oluşmasına yol açar. Lazer ışınının tek geçişinden sonra, toz yatağı CNC sistemi tarafından gerekli olan belirli bir tabaka kalınlığına indirilir ve toz tekrar önceden basılmış tabaka üzerine dağıtılır. Bu işlemler son parça üretilene kadar tekrarlanır. Şekil 7 (a)'da, SLS teknolojisinde yer alan temel işleme adımları gösterilmiştir (Munir vd., 2017).

Lazer ışınının küçük nokta boyutu nedeniyle, kompleks bir yapısal geometri bu karmaşıklıkla üretilir. Eriyik yığarak modelleme (FDM) ile karşılaştırıldığında, SLS sarkan yapılar gibi karmaşık 3D mimarileri inşa etmek için herhangi bir destek yapısı gerektirmez. Komşu tozlar, sonraki katmanlara sarkan parçalar için destek sağlamaktadır. SLS yöntemi, 3B katı yapıların imalatında tozların sinterlenmesini ve kaynaşmasını içerdiğinden, ortaya çıkan parçalar yüksek gözeneklilik ve düşük mekanik mukavemet ile üretilmektedir. 3B kompleks bir mikro yapı, darbeli veya süreli lazer tipleri, lazer ışınının spot büyüklüğü, katman kalınlığı ve kontrolör sistemi gibi çeşitli işleme ve işlem parametrelerini kontrol ederek SLS aracılığıyla üretilmektedir (Agarwala vd., 1995). SLS baskılı parçaların özellik

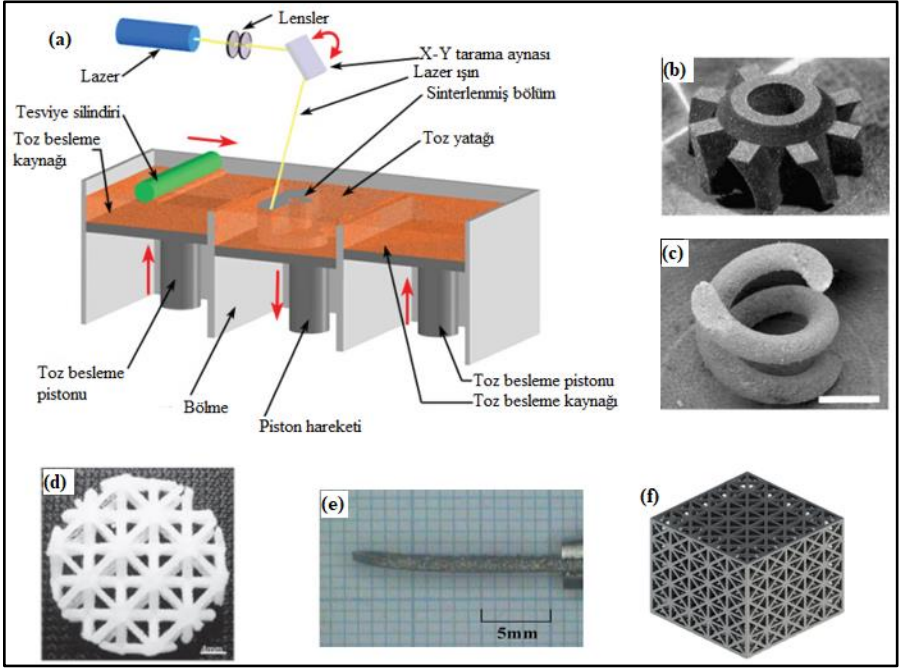
boyutu, viskozite, yüzey gerilimi, termal iletkenlik, özgül ısı, toz boyutu ve erime sıcaklığı gibi malzeme özelliklerine de bağlıdır. SLS polimerik numunelerin üretimi için kullanılır ve bu işlemle metal ve seramik parçalar da oluşturulabilir. SLS tıp endüstrilerinde protez, diz ve kalça implantları, cerrahi kılavuzlar ve aletler, cerrahi öğrenme aletleri ve iskeleler gibi çeşitli implantların veya cerrahi aletlerin basılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Araştırmacılar, SLS gibi 3B yazıcı teknolojilerinin yardımıyla, özelleştirilmiş tıbbi hapları başarıyla 3B olarak üretebiliyor, birden fazla hapı tek bir varlıkta birleştirebiliyorlar. SLS yöntemi birden fazla hapı tek bir hap halinde birleştiren özelleştirilmiş tıbbi hapların 3B baskısında başarıyla kullanılmıştır.

1990'ların ortalarında, metalik yapıların üretimi için Fraunhofer Enstitüsünde seçmeli lazer eritme (SLM) olarak bilinen SLS sisteminin bir çeşidi geliştirildi. SLS ve SLM için çalışma prensipleri neredeyse benzerdir. İki teknik arasındaki tek fark SLM yönteminde tozlar öncelikle bu işlemlerde kullanılan yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışınıyla eritilir. Erimiş malzemeler hızla katılaşıyor ve katı yapıların oluşmasına neden olur. Öncelikle durum değişikliği ve işleme sırasındaki yüksek akışkanlık nedeniyle sarkan metalik yapıları desteklemek için SLM teknolojisinde destek yapılarına ihtiyaç vardır. Ayrıca, ısıtılmış metalik yapıların oksitlenmesini önlemek için SLM işleminde etkisiz bir ortama ihtiyaç vardır. SLM yönteminin SLS tekniğine göre birincil avantajları, tozların erimesi ve katılaşması, tamamen yoğun yapılar üretmesidir. Böylece tıbbi ve diş uygulamaları,

soğutma sistemleri ve hafif yapılar gibi birçok uygulama için kullanılabilir bir üretim yöntemidir (Mazzoli vd., 2009; Fina vd., 2017).

2000'lerde, metal mikropartlar üretmek için Lazer Enstitüsü Mittelsachsen tarafından lazer mikro sinterleme (LMS) olarak bilinen SLS yönteminin bir çeşidi geliştirildi. LMS yönteminde, mikron altı boyutlu metalik tozların sinterlenmesi için yüksek yoğunluklu darbeli lazer ışını kullanılır (Exner vd., 2008). LMS, üretim çözünürlüğünü 10 µm aralığa düşürmüştür. Başlangıçta, 3B imalatında tungsten ve nikelin işlenmesi için geliştirilmiştir. Son zamanlarda, bakır, seramik, molibden, paslanmaz çelikler ve nikrom gibi çeşitli malzemelerin mikro yapıları 3B baskı da kullanılmıştır.

LMS baskılı mikro yapılar, güç yatağının tutarsız kompaktlığı ve yoğunlaşma etkisi nedeniyle zayıf yüzey kalitesi ile ilişkilidir. Ayrıca, daha yüksek yüzey alanı/hacim oranı nedeniyle, daha küçük boyutlu metalik tozlar (tipik olarak 1–2 µm) nem ve oksijen varlığında reaksiyona girmeye daha yatkındır ve tozların korozyonuna neden olur. Ek olarak, mikron altı boyutlu tozlar, boyut etkisi nedeniyle kolaylıkla kendi kendine topaklaşırlar. Bu nedenle, bu işlemi gerçekleştirmek için bazı önlemlere ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, mikron boyutlu parçaların hızlı imalatı için artan talep ile LMS, MEMS cihazlarının imalatı için uygun bir tekniktir. SLS/LMS yöntemleri kullanılarak üretilen çeşitli 3B yapılar Şekil 7 (b)-(f)'de gösterilmiştir (Clare vd., 2008; Roy vd., 2019; Liao vd., 2013).



Şekil 7: a) SLS Yönteminin Temel Metodolojisi b) SLS ile Mikro Türbin Üretimi c) SLS ile Tungsten Bobin Üretimi d) LMS ile Ortogonal Kanal Üretimi e) SLM ile Konsol Kiriş Üretimi f) SLS ile Mikro Kafes Yapı

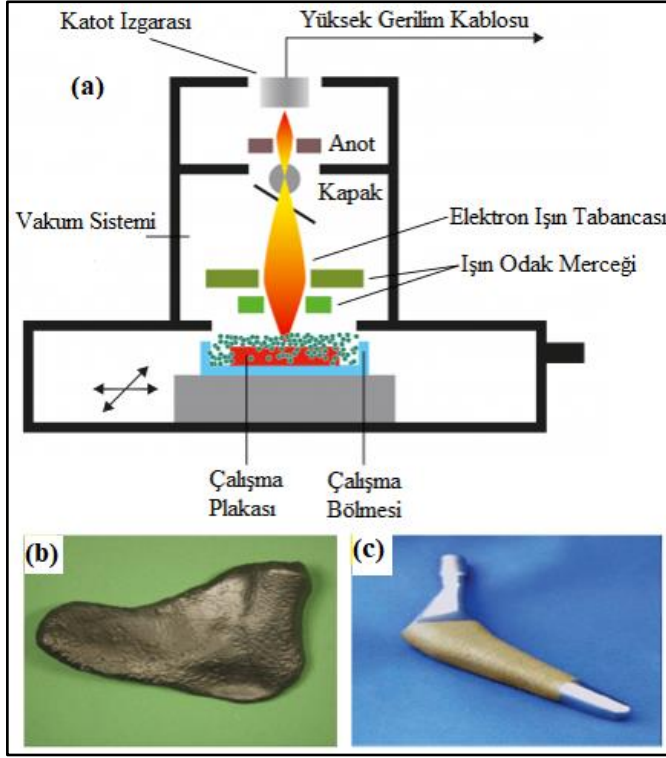
1.2.2. Elektron Işınli Ergitme

Elektron ışınli ergitme (EBM), metal bileşenlerin hem hızlı prototiplenmesi hem de 3D baskısı için kullanılan yeni bir yenilikçi toz yatağı bazlı eklemeli imalat işlemidir. Bu işlemde, ayrıntılı 3B yapıları imal etmek için toz katmanların seçimli şekilde ergitilmesi için enerji katmanı olarak bir katman katman halinde bir elektron ışını kullanılır.

Üretim süreci, elektronların gaz molekülleri ile çarpışmadığından emin olmak için bir vakum odası gerektirir ve 3B yapıların oksidasyonsuz baskılarının ortaya çıkması için herhangi bir iyonizasyon yapılmaz. Elektron ışınının yüksek enerji yoğunluğu, eritme ve enjeksiyonla

kalıplanmış parçalara eşdeğer yüksek mekanik mukavemetli katılaşma yoluyla baskılı parçalar üreten toz malzemelerin homojen erimesine neden olur. EBM yöntemiyle, yüksek güç/ağırlık oranına sahip malzemeleri işleyebilir, işleme maliyetini düşürür ve basılı numunelerin önemli ağırlığını azaltır. EBM, lazer tabanlı eklemeli imalat teknolojileri üzerinde, daha kısa teslim süresi, daha az destek yapısına ihtiyaç, enerji verimli süreçler ve basılı örneklerin azalmış artık gerilmeleri gibi çeşitli ayırt edici özellikler sunar. Ayrıca, elektron ışınının yüksek enerji yoğunluğu, tozu doğrudan eriterek SLS tekniğinde kullanılan sinterleme adımlarını ortadan kaldırır. Bu, üreticilerin basılı parçaların gözenekliliği ve mekanik mukavemet sorunları üzerinde hassas kontrol elde etmelerini sağlar.

Gözeneklilik, elektron ışını parametrelerinin ayarlanmasıyla daha da ayarlanabilir. EBM sisteminin temel metodolojileri Şekil 8 (a) 'da gösterilmiştir. Diğer toz bazlı 3B yazıcı teknolojileri gibi, EBM tabanlı teknoloji de bugüne kadar MEMS sınırlı uygulamalara sahiptir (Sun vd., 2017). Bununla birlikte, EBM, tıbbi ekipman, implantlar, kafatası plakaları, kalça, çene ve diz replasmanları gibi ortopedik bileşenlerin yazdırılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. EBM yöntemi kullanılarak üretilen çeşitli 3B yapılar Şekil 8 (b)-(c)'de gösterilmiştir (Mazzoli vd., 2009; Cronskar vd., 2013).



Şekil 8: a) EBM Yönteminin Temel Metodolojisi b) Kafatası Plakası c) Kalça Sapı

1.3. Katı Bazlı Üretim Teknikleri

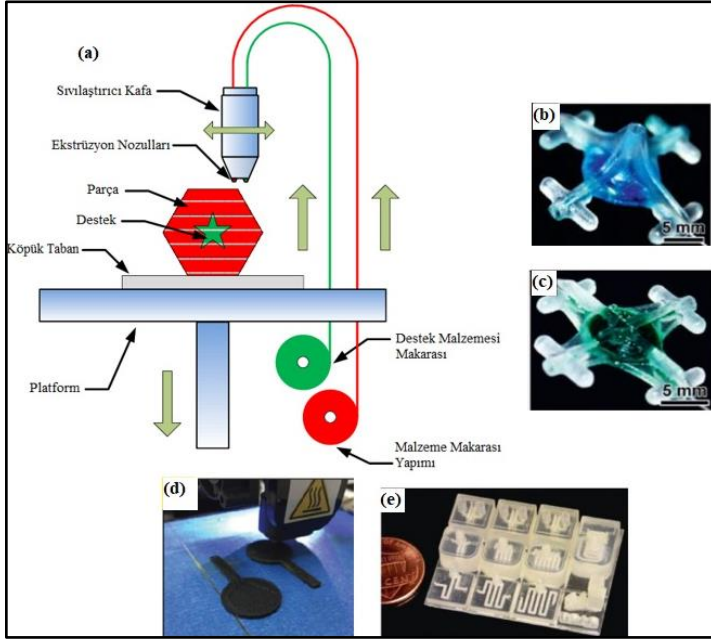
Bu bölümde, bu kategoriye giren ve en çok kullanılan eklemeli imalat teknikleri anlatılmıştır. Bu teknikler: eriyik yığarak modelleme ve levha laminasyonu dur.

1.3.1. Eriyik Yığarak Modelleme

Eriyik yığarak modelleme (FDM) tabanlı 3B yazıcı teknikleri, sadelikleri ve nispeten ucuz yapısı nedeniyle son on yılda büyük ilgi gördü. FDM üretim işlemlerinde, 3B yapı bir ısıtma memesinden ekstrüde edilen yarı erimiş malzemelerin önceden ısıtılmış bir yatak üzerine bırakılmasıyla imal edilir. Basılı filament oda sıcaklığında

soğur ve katı bir 3B yapı oluşturmak için önceden bırakılmış tabakalara yapıştır. Tipik bir FDM üretim işleminin temel metodolojileri Şekil 9 (a)'da gösterilmiştir. FDM hermo plastiklerin baskısından başlayarak, havacılık, otomobil ve elektronik gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Düşük maliyeti, sadeliği, düşük riski ve diğer çeşitli özellikleri nedeniyle, FDM teknolojisi insanların evlerine girmiştir.

FDM baskı kalitesi, baskı parametreleri (tarama açısı, yerleşik yönlendirme, baskı hızı vb.), çalışma ortamı (sıcaklık, nem) ve malzemelerin fiziksel parametreleri (termal iletkenlik, viskozite, yüzey gerilimi) gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, FDM baskılı yapılar genellikle düşük çözünürlük, zayıf yüzey kalitesi ve düşük mekanik mukavemet ile ilişkilidir. FDM tarafından mikron altı/nano boyutlara sahip 3B yapıların üretimi hala bir zorluktur ve üretim stratejisinde bazı iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda, 3B elektrikli bileşenlerin (dirençler, kapasitörler, bobinler, 3B polimerik anahtarlar, esnek sensörler, kapasitif düğmeler ve 3B elektrotlar) geliştirilmesi için MEMS imalatı alanında geniş ilgi gördü. Bir çalışmada yerleşik bobinli 3B “akıllı kapak” çalışması sunulmuştur (Wu vd., 2015). Destekleyici ve kurban yapılar içeren 3B mikro yapılar, çoklu bir meme sistemi ile donatılmış FDM teknolojisi kullanılarak 30 µm bir çözünürlükle üretilmiştir. Kurban malzemelerin çıkarılmasından sonra, askıda gümüş parçacıklar daha sonra enjekte edildi ve metalik elemanlar/ara bağlantılar olarak katılaştı. FDM yöntemiyle üretilen 3B yapılar Şekil 9 (b)-(e)'de gösterilmiştir (Wu vd., 2015; Foo vd., 2018).



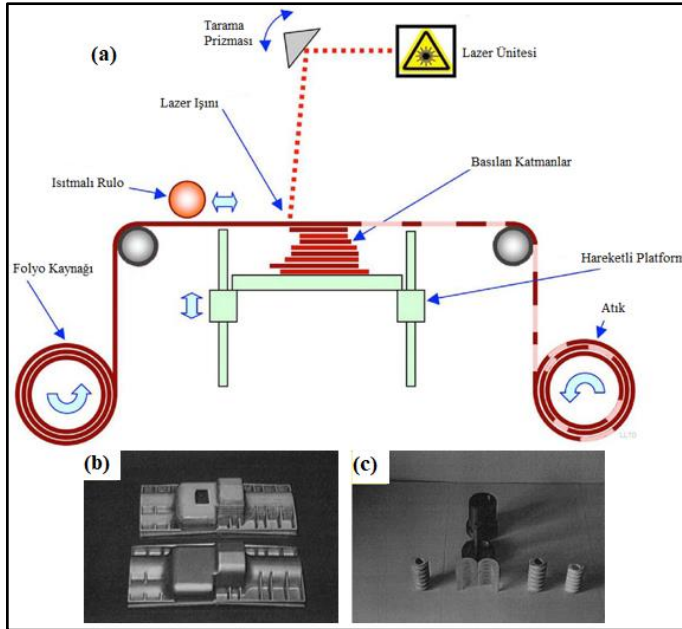
Şekil 9: a) FDM Yönteminin Temel Metodolojisi b) Akışkan Transistör c) Akışkan Diyot d) 3B Baskılı Elektrotların Optik Görüntüsü e) Mikro Akışkan

1.3.2. Levha Laminasyonu

Bu tip eklemeli imalat işleminde, önceden desenli malzeme tabakalarının ince tabakaları üst üste istiflenir ve bir ısı kaynağı veya yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilir. Levhalar ultrasonik bağlama işlemi kullanılarak lamine edilirse, işlem ultrasonik katkı maddesi üretimi (UAM) olarak adlandırılır ve yapışkan yığılmış tabakaların laminasyonunda kullanılırsa buna lamine nesne üretimi (LOM) denir. Şekil 10 (a)'da, LOM için temel metodolojileri göstermektedir (Dizon vd., 2018).

Levha laminasyon tekniklerinin ucuz işleme, yüksek hacimsel yapı oranı, iyi sağlamlık, bir malzeme ve kompozit kombinasyonunun

yüksek proses baskı kapasitesi gibi çeşitli avantajları vardır. Bu teknikler, uygun bağlayıcı malzemenin mevcudiyeti, ince malzeme tabakalarının gereksinimi ve karmaşık parçaların düşük çözünürlüğü gibi bazı sınırlamalar da sergilemektedir. Bununla birlikte, tabaka laminasyon teknikleri, mikro-sensörler, mikro-reaktörler, mikro-yakıt hücresi bileşenleri ve ısı eşanjörleri gibi çeşitli 3B mikro-yapıların üretimi için kullanılmıştır. Ayrıca, LOM hızlı takımların geliştirilmesi için uygundur. Bir çalışmada metal döküm için çeşitli döküm desenleri ve kalıpları, yani alüminyum döküm için 3 mm et kalınlığında kablo kovani ve aks braketi için enjekte balmumu desenli LOM kalıbı geliştirilmiştir (Mueller ve Kochan, 1999). LOM yöntemi kullanılarak üretilen 3B yapılar Şekil 10 (b)-(c)'de gösterilmiştir (Luong vd., 2018).



Şekil 10: a) LOM Yönteminin Temel Metodolojisi b)Kablo Kılıfı c) Metal Baskılar

2. TARTIŞMA

Bu çalışmada, MEMS cihazların üretiminde kullanılan veya gelecekte potansiyel olarak kullanılacak çeşitli 3B yazıcı teknolojilerini tartıştık. Eklemeli imalat teknolojileri, MEMS üretimi ve endüstriyel ölçekli uygulamaları için sürdürülebilir bir büyüme göstermiştir. 2025 yılına kadar, imalat sanayilerinin birçoğunun eklemeli imalat teknolojilerine geçmesi beklenmektedir. Son zamanlarda, FDM tabanlı 3B baskı ve stereolitografi de çok yönlü bir 3B yazıcı teknolojisinin geliştirilmesine yönelik önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. Eklemeli imalat, talep edilmesi durumunda üretime uygun oldukları için teorik olarak envanter gereksinimlerini endüstrilerden kaldırabilir. Müşteriler, özelleştirilmiş bir 3B katı modeli dosyasını doğrudan üreticilere gönderebilir ve basılı nesnelere işyerlerinde veya evlerinde alabilirler. Eklemeli imalat yöntemi yavaş yavaş geleneksel MEMS üretimine uygun bir alternatif haline gelmiştir.

Bununla birlikte, MEMS üretimi için bu geleneksel eklemeli imalat süreçleri ile ilgili önemli zorluklar bulunmaktadır. 3B yazdırılmış örneklerin çoğu, özellikle mikro-akışkan ve mikro-elektronik uygulamalarında, cihazların uygulama arızasıyla sonuçlanan önemli yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Bu uygulamalar ile birlikte 3B baskı teknikleri alanında önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. Ancak, gelişmiş malzemelerin/kompozitlerin baskı kapasitelerinin benimsenmesi için teknolojiye önemli bir yükseltme yapılması gerekmektedir. Ayrıca, 3B baskı büyük ölçüde viskozite, erime sıcaklığı, termal iletkenlik ve yoğunluk gibi malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, her

malzemenin/kompozitin baskı fizibilitesini keşfetmek için kapsamlı bir çalışmaya ihtiyaç vardır. 3B yazıcı teknikleri için optimize edilmiş işlem parametrelerinin seçilmesi, gelecekteki büyüme hızında da önemli bir faktör olacaktır. Eklemeli imalat teknolojileri için diğer zorluklar, yüksek başlangıç üretim maliyeti, baskı süresi ve nesnelerin boyutudur. Inkjet baskı gibi bazı eklemeli imalat teknolojileri geniş alan yüzeylere baskı yapabilir, ancak sınırlamalar hala geçerlidir.

Eklemeli imalat teknolojilerinin bir başka büyük sorunu da tekrarlanabilirliktir. Parçalar katman katman imal edildiğinden, yazdırma parametreleri makineler veya performansları arasında değişiklik gösterebilir. Sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar da baskı işlemini etkiler. Toz bazlı eklemeli imalat teknolojileri, toz formunda boyutları ve şekilleri düzgün olmayan malzemeler kullanır, bu da partiküllerin düzgün olmayan sinterlenmesine neden olur. Ayrıca, birçok çok malzemeli bazlı kompozit, eklemeli imalat teknolojileri aracılığıyla cihazların üretimine ilgi çekmiştir, bu da baskı işlemi üzerinde daha iyi kontrol sağlamak için bu malzemeler arasındaki etkileşimin kapsamlı çalışmalarını gerektirir.

3. SONUÇ

Eklemeli imalat veya 3B yazıcı teknolojilerinin mikro/nano uzunluk ölçeğinde üretim yetenekleri MEMS cihazlarının yolunu açtı. Bu çalışmada en çok kullanılan eklemeli imalat teknolojilerinin kapsamlı bir incelemesi bu çalışmada gözden geçirilmiştir. Bu çalışmada açıklanan bazı eklemeli imalat teknolojileri hala gelişim aşamalarında olmakla birlikte, stereolitografi, SLS, inkjet ve DLP gibi çeşitli

teknikler, MEMS üretimi için uygulanabilir alternatif üretim teknolojileri olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, eklemeli imalat teknolojilerinin sürekli büyümesi, MEMS üreticilerine mikro/nano düzeyde karmaşık yapısal geometriye cihazların üretimi için çok esneklik kazandırdı. Eklemeli imalat teknolojilerinin taşıdığı birçok avantaja rağmen, hala bazı zorluklar mevcuttur ve araştırmacılar tarafından bu sorunları azaltmak için çok çaba sarf edilmektedir. 3B baskı teknolojileri, çeşitli uygulamalar için mikro elektromekanik sistemlerin hassas isteğe bağlı üretimi için gelecekte heyecan verici olanaklar vaat ediyor.

KAYNAKÇA

- Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., & Barlow, J. (1995). Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*.
- Bosman, J., ter Horst, P. G., Smit, J. P., Dijkstra, J. R., Beekhuis, H. R., Slingsland, R. J., & Hospes, W. (2014). Adherence of antidepressants during pregnancy: MEMS compared three other methods. *Therapeutic Advances in Psychopharmacology*, 4(2), 61-69.
- Bustillo, J. M., Howe, R. T., & Muller, R. S. (1998). Surface micro machining micro electromechanical systems. *Proceedings of the IEEE*, 86(8), 1552-1574.
- Burrer, C., & Esteve, J. (1995). A novel resonant silicon accelerometer in bulk-micromachining technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 46(1-3), 185-189.
- Cabral, J. T., Hudson, S. D., Harrison, C., & Douglas, J. F. (2004). Frontal photopolymerization for microfluidic. *Langmuir*, 20(23), 10020-10029.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143-157.
- Clare, A. T., Chalker, P. R., Davies, S., Sutcliffe, C. J., & Tsopanos, S. (2008). Selective laser melting of high aspect ratio 3D nickel–titanium structures two way trained for MEMS applications. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 4(2), 181-187.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., & Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (031), 53-70.

- Cronskär, M., Bäckström, M., & Rännar, L. E. (2013). Production of customized hip stem prostheses—a comparison between conventional machining and electron beam melting (EBM). *Rapid Prototyping Journal*.
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.
- Demirci, U. (2006). Droplet-based photoresist deposition. *Applied Physics Letters*, 88(14), 144104.
- Deubel, M., Von Freymann, G., Wegener, M., Pereira, S., Busch, K., & Soukoulis, C. M. (2004). Direct laser writing of three-dimensional photonic templates for telecommunications. *Nature Materials*, 3(7), 444-447.
- Dizon, J. R. C., Espera Jr, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44-67.
- Duman, B., & Kayacan, M. C. (2016). Seçmeli lazer sinterleme tezgahı için imalat yazılımı geliştirilmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(3), 27-45.
- Ertugrul, İ., & Ülker, O. (2020). MEMS tabanlı mikro rezonatörün tasarımı ve analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(18), 25-29.
- Ertugrul, I. (2020). The fabrication of micro beam from photopolymer by digital light processing 3D printing technology. *Micromachines*, 11(5), 518.
- Ertugrul, I., Akkus, N., & Yüce, H. (2019). Fabrication of MEMS based electrothermal microactuators with additive manufacturing technologies. *Materiali in Tehnologije*, 53 (5), 665-670.
- Exner, H., Horn, M., Streek, A., Ullmann, F., Hartwig, L., Regenfuß, P., & Ebert, R. (2008). Laser micro sintering: A new method to generate metal and ceramic parts of high resolution with sub-micrometer powder. *Virtual and Physical Prototyping*, 3(1), 3-11.

- Fischer, J., & Wegener, M. (2013). Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit. *Laser & Photonics Reviews*, 7(1), 22-44.
- Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., & Basit, A. W. (2017). Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. *International Journal of Pharmaceutics*, 529(1-2), 285-293.
- Fu, Y., Du, H., Huang, W., Zhang, S., & Hu, M. (2004). TiNi-based thin films in MEMS applications: a review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 112(2-3), 395-408.
- Foo, C. Y., Lim, H. N., Mahdi, M. A., Wahid, M. H., & Huang, N. M. (2018). Three-dimensional printed electrode and its novel applications in electronic devices. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.
- Fuller, S. B., Wilhelm, E. J., & Jacobson, J. M. (2002). Ink-jet printed nanoparticle microelectromechanical systems. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(1), 54-60.
- Gauvin, R., Chen, Y. C., Lee, J. W., Soman, P., Zorlutuna, P., Nichol, J. W., ... & Khademhosseini, A. (2012). Microfabrication of complex porous tissue engineering scaffolds using 3D projection stereolithography. *Biomaterials*, 33(15), 3824-3834.
- Ge, L., Dong, L., Wang, D., Ge, Q., & Gu, G. (2018). A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 273, 285-292.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2014). Additive manufacturing technologies (Vol. 17). New York: Springer.
- Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2009). Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1-2), 116-127.

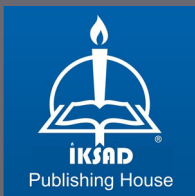
- Guarnieri, V., Biazi, L., Marchiori, R., & Lago, A. (2014). Platinum metallization for MEMS application: Focus on coating adhesion for biomedical applications. *Biomatter*, 4(1), e28822.
- Halloran, J. W. (2016). Ceramic stereolithography: additive manufacturing for ceramics by photopolymerization. *Annual Review of Materials Research*, 46, 19-40.
- Hirabayashi, M., Mehta, B., Nguyen, B., & Kassegne, S. (2015). DNA immobilization on high aspect ratio glassy carbon (GC-MEMS) microelectrodes for nanoelectronics applications. *Microsystem Technologies*, 21(11), 2359-2365.
- Hormes, J., Göttert, J., Lian, K., Desta, Y., & Jian, L. (2003). Materials for LiGA and LiGA-based microsystems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 199, 332-341.
- Howe, R. T. (1988). Surface micromachining for microsensors and microactuators. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*, 6(6), 1809-1813.
- Huang, S. H., Zhang, L. C., & Han, M. (2003). CS file—an improved interface between CAD and rapid prototyping systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(1), 15-19.
- In, J. B., Hsia, B., Yoo, J. H., Hyun, S., Carraro, C., Maboudian, R., & Grigoropoulos, C. P. (2015). Facile fabrication of flexible all solid-state micro-supercapacitor by direct laser writing of porous carbon in polyimide. *Carbon*, 83, 144-151.
- Ikuta, K., & Hirowatari, K. (1993, February). Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding. *Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems* (pp. 42-47). IEEE.
- Kaur, M., & Srivastava, A. K. (2002). Photopolymerization: A review. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 42(4), 481-512.

- Khan, S., Ali, S., & Bermak, A. (2019). Smart Manufacturing Technologies for Printed Electronics. *In Flexible Electronics. IntechOpen.*
- Kok, Y., Tan, X. P., Wang, P., Nai, M. L. S., Loh, N. H., Liu, E., & Tor, S. B. (2018). Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials & Design*, 139, 565-586.
- Kovacs, G. T., Petersen, K., & Albin, M. (1996). Peer reviewed: Silicon micro: Sensors to systems. *Analytical Chemistry*, 68(13), 407A-412A.
- Lifton, V. A., Lifton, G., & Simon, S. (2014). Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology. *Rapid Prototyping Journal*, 20(5), 403-412.
- Liao, H. T., Chen, J. P., & Lee, M. Y. (2013). Bone tissue engineering with adipose-derived stem cells in bioactive composites of laser-sintered porous polycaprolactone scaffolds and platelet-rich plasma. *Materials*, 6(11), 4911-4929.
- Lee, E. R. (2018). Microdrop generation. CRC press.
- Luong, D. X., Subramanian, A. K., Silva, G. A. L., Yoon, J., Cofer, S., Yang, K., ... & Ajayan, P. M. (2018). Laminated object manufacturing of 3D-printed laser-induced graphene foams. *Advanced Materials*, 30(28), 1707416.
- Mazzoli, A., Germani, M., & Raffaelli, R. (2009). Direct fabrication through electron beam melting technology of custom cranial implants designed in a PHANToM-based haptic environment. *Materials & Design*, 30(8), 3186-3192.
- Moeller, M., & Matyjaszewski, K. (2012). Polymer science: a comprehensive reference. *Newnes.*

- Mu, Q., Wang, L., Dunn, C. K., Kuang, X., Duan, F., Zhang, Z., ... & Wang, T. (2017). Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing*, 18, 74-83.
- Mueller, B., & Kochan, D. (1999). Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. *Computers in Industry*, 39(1), 47-53.
- Munir, K. S., Li, Y., & Wen, C. (2017). Metallic scaffolds manufactured by selective laser melting for biomedical applications. In *Metallic Foam Bone* (pp. 1-23). Woodhead Publishing.
- Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3B baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.
- Pan, Y., Chen, Y., & Yu, Z. (2017). Fast mask image projection-based micro-stereolithography process for complex geometry. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 5(1).
- Patel, D. K., Sakhaei, A. H., Layani, M., Zhang, B., Ge, Q., & Magdassi, S. (2017). Highly stretchable and UV curable elastomers for digital light processing based 3D printing. *Advanced Materials*, 29(15), 1606000.
- Pawar, A. A., Saada, G., Cooperstein, I., Larush, L., Jackman, J. A., Tabaei, S. R., ... & Magdassi, S. (2016). High-performance 3D printing of hydrogels by water-dispersible photoinitiator nanoparticles. *Science Advances*, 2(4), e1501381.
- Pearre, B. W., Michas, C., Tsang, J. M., Gardner, T. J., & Otchy, T. M. (2019). Fast micron-scale 3D printing with a resonant-scanning two-photon microscope. *Additive Manufacturing*, 30, 100887.
- Pojman, J. A., Ilyashenko, V. M., & Khan, A. M. (1996). Free-radical frontal polymerization: self-propagating thermal reaction waves. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 92(16), 2825-2837.

- Robertson, I. D., Yourdkhani, M., Centellas, P. J., Aw, J. E., Ivanoff, D. G., Goli, E., ... & Moore, J. S. (2018). Rapid energy-efficient manufacturing of polymers and composites via frontal polymerization. *Nature*, 557(7704), 223-227.
- Roy, N. K., Behera, D., Dibua, O. G., Foong, C. S., & Cullinan, M. A. (2019). A novel microscale selective laser sintering (μ -SLS) process for the fabrication of microelectronic parts. *Microsystems & Nanoengineering*, 5(1), 1-14.
- Singh, K., Joyce, R., Varghese, S., & Akhtar, J. (2015). Fabrication of electron beam physical vapor deposited polysilicon piezoresistive MEMS pressure sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 223, 151-158.
- Steiner, H., Keplinger, F., Schalko, J., Hortschitz, W., & Stifter, M. (2015). Highly efficient passive thermal micro-actuator. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 24(6), 1981-1988.
- Stemme, E., & Larsson, S. G. (1973). The piezoelectric capillary injector—a new hydrodynamic method for dot pattern generation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 20(1), 14-19.
- Sun, Q., Whitney, M. M., Bryan, F. O., & Tseng, Y. H. (2017). A box model for representing estuarine physical processes in Earth system models. *Ocean Modelling*, 112, 139-153.
- Tan, Y., Dong, Y., & Wang, X. (2016). Review of MEMS electromagnetic vibration energy harvester. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(1), 1-16.
- Taylor, G. I. (1969). Electrically driven jets. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 313(1515), 453-475.
- Tian, X., Jin, J., Yuan, S., Chua, C. K., Tor, S. B., & Zhou, K. (2017). Emerging 3D-printed electrochemical energy storage devices: a critical review. *Advanced Energy Materials*, 7(17), 1700127.
- Teh, K. S. (2017). Additive direct-write microfabrication for MEMS: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 12(4), 490-509.

- Ülker, O., & Ertugrul, İ. (2020). Mikro giriş uzunluğu değişiminin deformasyona etkisinin araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(18) , 136-141.
- Vaithilingam, J., Saleh, E., Körner, L., Wildman, R. D., Hague, R. J., Leach, R. K., & Tuck, C. J. (2018). 3-Dimensional inkjet printing of macro structures from silver nanoparticles. *Materials & Design*, 139, 81-88.
- Zhang, X. S., Su, M., Brugger, J., & Kim, B. (2017). Penciling a triboelectric nanogenerator on paper for autonomous power MEMS applications. *Nano Energy*, 33, 393-401.
- Zhao, Z., Wu, J., Mu, X., Chen, H., Qi, H. J., & Fang, D. (2017). Origami by frontal photopolymerization. *Science advances*, 3(4), e1602326.
- Zhang, X., Jiang, X. N., & Sun, C. (1999). Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 77(2), 149-156.
- Zheng, X., Deotte, J., Alonso, M. P., Farquar, G. R., Weisgraber, T. H., Gemberling, S., ... & Spadaccini, C. M. (2012). Design and optimization of a light-emitting diode projection micro-stereolithography. *Review of Scientific Instruments*, 83(12), 125001.
- Zou, X., Thiruvengathanan, P., & Seshia, A. A. (2014). A seismic-grade resonant MEMS accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23(4), 768-770.
- Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire+ arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), 641-647.
- Wang, P., Lu, Q., & Fan, Z. (2019). Evolutionary design optimization of MEMS: a review of its history and state-of-the-art. *Cluster Computing*, 22(4), 9105-9111.



ISBN: 978-625-7897-56-3