



**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
POROZ YAPILI VE BİYOMİMETİK AĞAÇ BENZERİ
ELEMENLARIN YAPISAL, TERMAL VE AKIŞ
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Yeşim Zeynep MANDEV

**Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM**

**2025
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN POROZ YAPILI VE
BİYOMİMETİK AĞAÇ BENZERİ ELEMANLARIN YAPISAL, TERMAL VE
AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Yeşim Zeynep MANDEV

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN POROZ YAPILI VE
BİYOMİMETİK AĞAÇ BENZERİ ELEMANLARIN YAPISAL, TERMAL VE
AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Ali Fatih YETİM danışmanlığında, Yeşim Zeynep MANDEV tarafından hazırlanan bu çalışma 31 / 01 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **Oy birliği ile (5/5)** kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Güven TURGUT	İmza	:
Üye	: Doç Dr. Halim KOVACI	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZICI	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

* Bu tez çalışması, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Bursu Programı tarafından desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

31 / 01 / 2025

Yeşim Zeynep MANDEV

ÖZET

DOKTORA TEZİ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN POROZ YAPILI VE BİYOMİMETİK AĞAÇ BENZERİ ELEMANLARIN YAPISAL, TERMAL VE AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yeşim Zeynep MANDEV

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

Bu çalışmada, SLM yöntemiyle üretilen poroz plaka numunelerin yapısal ve termal özellikleri ve yine SLM yöntemi kullanılarak üretilen biyomimetik ağaç benzeri yapıların terlemeli soğutma performansları incelenmiştir. Bu yapılar, özellikle uçak motorları gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçalar için terlemeli soğutma yönteminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. CoCrW, 316L, Ti6Al4V tozlarından SLM ile üretilen poroz plakalarla yapılan ısı iletkenlik deneyleri ve yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ölçümleriyle elde edilen sonuçlara göre; malzemelerin fiziksel, mekanik, termal ve yüzey özelliklerinin büyük ölçüde SLM üretim parametrelerine bağlı olduğu görülmüştür. Her 3 malzeme ile üretilen poroz plaka numunelerde malzemenin doluluk oranının artmasıyla sertlik değerleri artış göstermiştir. Farklı enerji yoğunluklarında yapılan üretimler neticesinde numunelerde gözlenebilecek en temel fark boşluk oranında olmuştur. Sonuç olarak, eklemeli imalat sürecinin ısı ve akış uygulamalarına yönelik ürünlerinde proses parametrelerinin dikkate alınmasının önemli olduğu gözlemlenmiştir. SLM ile üretilen poroz plaka numunelerde yapılan ısı iletkenlik ölçümlerine göre en iyi termal performansı gösteren 316L tozu ile üretilen plakalar olmuştur. Bu sebeple ısı transferi deneyleri için üretilen biyomimetik ağaç benzeri yapılar 316L tozundan SLM ile üretilmiştir. Bu yapılarda en iyi termal performansı 500 µm başlangıç kanal çapına, 0,65 dallanma oranına ve çapın 6 katı olacak şekilde kanal kopyalama mesafesine sahip olan N7 numunesi (30×30×30 mm) göstermiştir. Bu numune üzerinde, parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) yöntemi kullanılarak vektör haritaları da elde edilmiştir. En iyi ısı transferi sonuçlarının kanal çapının artması ve dallanma oranı ile kopyalama mesafesinin azalmasıyla elde edildiği görülmüştür.

2025, 132 sayfa.

Anahtar Kelimeler: Seçici Lazer Ergitme, Eklemeli İmalat, Biyomimetik, Terlemeli Soğutma, PIV.

ABSTRACT

Ph.D Thesis

INVESTIGATION OF STRUCTURAL, THERMAL, AND FLOW PROPERTIES OF POROUS AND BIOMIMETIC TREE-LIKE STRUCTURE PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Yeşim Zeynep MANDEV

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

In this study, the structural and thermal properties of porous plate specimens produced via the SLM method were investigated, along with the transpiration cooling performance of biomimetic tree-like structures fabricated using the same method. These structures were specifically analyzed to evaluate the effectiveness of the transpiration cooling method for components exposed to high temperatures, such as aircraft engines. Thermal conductivity experiments, surface roughness assessments, and microhardness measurements conducted on porous plates produced from CoCrW, 316L, and Ti6Al4V powders via SLM revealed that the physical, mechanical, thermal, and surface properties of the materials are significantly influenced by SLM process parameters. For porous plate specimens produced from all three materials, an increase in material density resulted in higher hardness values. Among the most notable differences observed in specimens fabricated under varying energy densities was the porosity. Higher energy densities led to a decrease in porosity across all three materials. While 316L and CoCrW specimens exhibited similar porosity levels at comparable energy densities, Ti6Al4V specimens required relatively higher energy densities to achieve lower porosity levels. As a result, it was concluded that process parameters play a critical role in designing products for heat and flow applications in additive manufacturing. Among the porous plate specimens produced via SLM, those made with 316L powder demonstrated the best thermal performance in thermal conductivity measurements. Consequently, biomimetic tree-like structures for heat transfer experiments were fabricated using 316L powder via the SLM process. Among these structures, the N7 sample (30×30×30 mm), which featured an initial channel diameter of 500 μm , a branching ratio of 0.65, and a channel duplication distance six times the diameter, exhibited the best thermal performance. Particle Image Velocimetry (PIV) was also employed on this sample to obtain vector maps. The study showed that optimal heat transfer results were achieved by increasing the channel diameter while decreasing the branching ratio and duplication distance.

2025, 132 pages.

Keywords: Selective Laser Melting, Additive Manufacturing, Transpiration Cooling, Biomimetic, PIV.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına derinlik kazandıran saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Ali Fatih YETİM'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Sadece akademik rehberliği değil, aynı zamanda her zaman sabırla destek vererek, karşılaştığım zorlukları aşmamda bana büyük bir güven ve motivasyon kaynağı olmuştur. Görüşleri ve yapıcı eleştirileri sayesinde, çalışmalarımı daha ileri düzeye taşımama olanak sağlamıştır. Bana kazandırdığı disiplin, bilimsel bakış açısı ve araştırma becerileri, yalnızca bu tez sürecinde değil, gelecekteki tüm çalışmalarımda da bana rehber olacaktır. Hayatıma kattıkları için sonsuz minnettarım.

Bu tez çalışması, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Bursu Programı tarafından desteklenmiştir. Yükseköğretim Kurulu (YÖK)'na teşekkürlerimi sunarım.

Değerli Tez İzleme Komitesi hocalarım, Prof. Dr. Ayhan ÇELİK ve Prof. Dr. Güven TURGUT' a ve değerli tez savunma jürisi hocalarım, Doç. Dr. Halim KOVACI ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZICI' ya teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimim süresince yardımını esirgemeyen ve arkadaşlığı ile destek olan Dr. Öğr. Üyesi Hilmi TEKDIR'e teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitimim süresince verdiği destek ve sağladığı kolaylıklardan ötürü Sayın Koordinatörüm başta olmak üzere tüm TSE Doğu Anadolu Bölge Koordinatörlüğündeki mesai arkadaşlarıma en içten şükranlarımı sunarım.

Yalnızca beni değil küçük oğlumu da sevgisi ve merhametiyle sarıp, yetiştiren canım annem Hatice SEYHAN'a, çalışma hayatımda daima desteğini hissettiğim, çalışma disiplinini ve bilgisini örnek aldığım babam İbrahim SEYHAN'a, pozitifliği ve yaşının çok üzerindeki olgunluğu ile beni destekleyen canım kardeşim Hayrunnisa SEYHAN'a, her zor anımda verdikleri desteklerle hayatımı kolaylaştıran ablam Naime SEYHAN KAYA ve kardeşim Büşra ÖZKARA'ya, doğumuyla hayata bakışımı değiştiren küçük oğlum Ömer MANDEV'e ve yakında doğacak oğluma, manevi destekleri ile beni hiç yalnız bırakmayan annem Melek MANDEV ve babam Selim MANDEV'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu tezin hazırlanma sürecinde verdiği manevi desteğin yanı sıra, ısı transferi ve akış görüntüleme deneylerinde de bilgi ve tecrübesiyle destek olarak deneylerin başarılı bir şekilde tamamlanmasına yardımcı olan eşim, Dr. Öğr. Üyesi Emre MANDEV'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Yeşim Zeynep MANDEV

Ocak-2025

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu ve Kapsam	1
1.2. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing).....	3
1.2.1. Havuz Fotopolimerizasyonu (<i>Vat Photopolymerization (VPP)</i>).....	7
1.2.3. Malzeme Püskürtme (<i>Material Jetting (MJ)</i>)	8
1.2.3. Yapıştırıcı Püskürtme (<i>Binder Jetting (BJ)</i>)	10
1.2.4. Malzeme Ekstrüzyonu (<i>Material Extrusion (MEX)</i>).....	10
1.2.5. Toz Yataklı Birleştirme (<i>Powder Bed Fusion (PBF)</i>)	11
1.2.6. Plaka Tabakalaştırma (<i>Sheet Lamination (SL)</i>).....	16
1.2.7. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (<i>Directed Energy Deposition (DED)</i>)	17
1.2.8. İmalat Sürecinde Kullanılan Toz Malzemeler	18
1.3. Biyomimetik.....	20
1.4. Terlemeli Soğutma	25
1.5. Yüzey Gerilimi ve Kılcallık Etkisi.....	28
2. KAYNAK ÖZETLERİ	31
2.1. İmalat Sürecinde Kullanılan Toz Malzemeler ve SLM Üretim Parametrelerine Yönelik Çalışmalar	31
2.2. Terlemeli Soğutma Sistemlerinde Isı Transferi Çalışmaları	43
2.3. Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Bileşenlerde Isı Transferine Yönelik Çalışmalar	48
2.4. Biyomimetik ve Ağaç Benzeri Yapılarda Akış ve Isı Transferi Çalışmaları.....	53
3. MATERYAL ve YÖNTEM	61
3.1. Materyal	61
3.2. Yöntem	63
3.2.1. Numunelerin Üretilmesi.....	63
3.2.2. Porozitenin Belirlenmesi	73
3.2.3. Isıl İletkenlik Ölçümleri	74

3.2.4. Mikro Sertlik Ölçümleri.....	76
3.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	77
3.2.6. XRD Analizleri	78
3.2.7. Ağaç Benzeri Yapılarda Isı Transferi ve Akış Görüntüleme Deneyleri	78
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	83
4.1. Mikro Yapı Analizi	83
4.2. XRD Analizleri	85
4.3. Yüzey Haritaları ve Yüzey Pürüzlülük Durumları.....	86
4.5. Porozite ve Isıl iletkenlik Sonuçları	90
4.6. Isı Transferi ve Akış Görüntüleme Deney Sonuçları	97
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	117
5.1. Sonuçlar	117
5.2. Öneriler	120
KAYNAKLAR	121

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$^{\circ}$	Derece
A	Alan (m^2)
h	Kayma Mesafesi (mm)
k	Isıl İletkenlik ($W/m.^{\circ}C$)
L	Kalınlık (m)
m	Kütle (kg)
P	Lazer Gücü (W)
P_t	Porozite
R	Isıl Direnç ($^{\circ}C/W$)
r	Yarıçap (m)
S_a	Ortalama Pürüzlülük (μm)
t	Katman Kalınlığı (mm)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_i	Zaman (s)
v	Tarama Hızı (mm/s)
V	Hacim (m^3)
W	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
γ	Yüzey Gerilimi (J/m^2)
θ	Temas Açısı (rad)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
3D	3 Boyutlu
AM	Eklemeli İmalat
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJT	Yapıştırıcı Püskürtme
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DED	Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
DMD	Doğrudan Metal Biriktirme
DMLE	Direkt Metal Lazer Ergitme
DMLS	Direkt Metal Lazer Sinterleme
DY	Dikey Yüzey
LOM	Lamine Nesne İmalatı
MEX	Malzeme Ekstrüzyonu
MJ	Malzeme Püskürtme
PBF	Toz Yataklı Birleştirme
PIV	Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
SL	Stereolitografi
SLM	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
STL	Standard Triangle Language
UAM	Ultrasonik Eklemeli İmalat
UV	Ultraviyole
VPP	Havuz Fotopolimerizasyonu
XRD	X-Işını Kırınım Ölçer
YÜTAM	Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
YY	Yatay Yüzey

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. (a) Havuz fotopolimerizasyon yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a) (b) Havuz fotopolimerizasyon ile üretilmiş bir kafes örneği (Anonymous 2024e).....	8
Şekil 1. 2. (a) Malzeme püskürtme yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a) (b) Malzeme püskürtme yöntemi ile Audi için imal edilmiş bir araç arka far kapağı prototipi (Anonymous 2024f).	9
Şekil 1. 3. (a) Yapıştırıcı püskürtme yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a). (b) Yapıştırıcı püskürtme yöntemi ile imal edilmiş yakıt valfleri (Anonymous 2024f).	10
Şekil 1. 4. (a) Malzeme ekstrüzyonu yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a) (b) Malzeme ekstrüzyonu yöntemi imalat süreci (Anonymous 2024c).....	11
Şekil 1. 5. (a) Toz yataklı birleştirme yöntemi şematik gösterimi (Mandev et al. 2024) (b) Toz yataklı birleştirme yöntemi ile imal edilmiş bir fan (Anonymous 2024g).	12
Şekil 1. 6. Seçici lazer sinterleme şematik görünümü (Anonymous 2024h).	13
Şekil 1. 7. SLM üretim aşamasından bir kesit görüntüsü (Anonymous 2024d).	14
Şekil 1. 8. SLM üretim aşamasından bir kesit görüntüsü (Anonymous 2024d).	14
Şekil 1. 9. EBM yöntemi şematik gösterimi (Özkan 2019).	15
Şekil 1. 10. SHS yöntemi şematik gösterimi (Milward 2020).	16
Şekil 1. 11. Plaka tabakalaştırma yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a).	17
Şekil 1. 12. Direkt enerji biriktirme yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a). .	18
Şekil 1. 13. Yusufçuk böceğinden ilham alınarak tasarlanan helikopter (Anonymous 2024h).....	21
Şekil 1. 14. Kutu balıkları ve ağaçların büyümesinden esinlenerek tasarlanan otomobil (Gökmen 2024).	22
Şekil 1. 15. Leonardo Da Vinci'nin kaplumbağadan esinlendiği tank tasarımı (Sevencan ve Üreyen 2020).	22
Şekil 1. 16. Yalıçapkını kuşundan ilham alınarak tasarlanmış Japon yüksek hızlı treni (Sevencan ve Üreyen 2020).	23
Şekil 1. 17. Ağaç benzeri yapı olarak tasarlanmış ısı alıcı (Ho et al. 2021).	24

Şekil 1. 18. Uzay aracı burun kısmı için ağaç benzeri yapılı kendinden pompalamalı terlemeli soğutma tasarımı (Huang et al. 2019).	25
Şekil 1. 19. Kendi kendine pompalamalı terlemeli soğutma sistemi (Huang et al. 2019).	26
Şekil 1. 20. Terlemeli soğutma şematik gösterim (Jiang et al. 2017).	26
Şekil 1. 21. (a) Biyomimetik terlemeli soğutma şematik gösterim, (b) Biyomimetik terlemeli soğutma ekipmanları şematik gösterim (Jiang et al. 2017).	27
Şekil 1. 22. Yüzey gerilimine ait örnekler (Anonymous 2024k).	28
Şekil 1. 23. Kılcallık etkisi şematik gösterim (Anonymous 2024j).	29
Şekil 1. 24. Ağaçlarda kapılar olay (Anonymous 2024m).	30
Şekil 3. 1. Metal Tozların SEM Görüntüleri (250x ve 2000x Büyütme).	62
Şekil 3. 2. Tez İş Akış Şeması.	63
Şekil 3. 3. SLM cihazı şematik görünümü (Mandev et al. 2024).	64
Şekil 3. 4. Concept Laser markalı MLab Cusing R model SLM cihazı.	64
Şekil 3. 5. Poroz plaka numunelerin CAD modeli.	68
Şekil 3. 6. N1 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	68
Şekil 3. 7. N2 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	68
Şekil 3. 8. N3 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	69
Şekil 3. 9. N4 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	69
Şekil 3. 10. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	69
Şekil 3. 11. N6 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	69
Şekil 3. 12. N7 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	70
Şekil 3. 13. N8 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.	70
Şekil 3. 14. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin 3D model yan görünüşü.	71
Şekil 3. 15. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin 3D model üst ve alt görünüşü.	71
Şekil 3. 16. Üretimi tamamlanmış poroz plaka numuneler (Mandev et al. 2024).	72
Şekil 3. 17. SLM yöntemiyle üretimi tamamlanmış tabla üzerine bağlı destek elemanlarından ayrılmamış numuneler.	72
Şekil 3. 18. Üretimi tamamlanmış ağaç benzeri yapı numuneler.	73
Şekil 3. 19. AXIS marka hassas terazi.	74
Şekil 3. 20. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı şematik gösterimi (Hacısalıhoğlu et al. 2021). ..	75
Şekil 3. 21. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı.	75
Şekil 3. 22. Shimadzu HVM G20 mikro sertlik ölçüm cihazı.	76
Şekil 3. 23. Bruker Contour GTK 3D optik profilometre cihazı.	77

Şekil 3. 24. X-Işını kırınım (XRD) ölçer cihazı.....	78
Şekil 3. 25. Ağaç benzeri yapılarda ısı transferi ölçümleri deney sistemi.	79
Şekil 3. 26. (a) Ağaç benzeri yapılarda ısı transferi ölçüm deneyleri test bölgesi (b) Test bölgesi şematik resmi.	80
Şekil 3. 27. Test bölgesi şematik görünüm.	80
Şekil 3. 28. Akış görüntüleme deney düzeneği.	82
Şekil 4. 1. SLM ile üretim sonrası numunelerin yüzeylerinin EDS analizleri (a) 316L (b) CoCrW (c) Ti6Al4V	84
Şekil 4. 2. SLM yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V, CoCrW ve 316L poroz plaka numunelerin XRD analizleri.	85
Şekil 4. 3. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük sonuçları.	87
Şekil 4. 4. SLM ile üretilmiş poroz plakaların yüzey haitaları (a) 316L (b) CrCoW (c) Ti6Al4V.	89
Şekil 4. 5. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve bağıl yoğunluk değişimi.	90
Şekil 4. 6. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin bağıl gözeneklilik (porozite) değerleri.	92
Şekil 4. 7. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin ısı iletkenlik değerleri.	93
Şekil 4. 8. Isıl iletkenlik ile bağıl gözeneklilik (porozite) değişimi.	94
Şekil 4. 9. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin sertlik değerleri.	95
Şekil 4. 10. SLM ile üretilmiş 316L poroz plaka numunelerin optik mikroskop görüntüleri (a-b) S1, (c-d) S2, (e-f) S3.	96
Şekil 4. 11. N1 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	98
Şekil 4. 12. N2 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	98
Şekil 4. 13. N3 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	99
Şekil 4. 14. N4 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	99
Şekil 4. 15. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	100
Şekil 4. 16. N6 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	100
Şekil 4. 17. N7 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	101
Şekil 4. 18. N1 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.	101
Şekil 4. 19. N1-N2-N5-N6 nolu ağaç benzeri yapı numunelerinin sıcaklık zaman grafiği.	103

Şekil 4. 20. N3-N4-N7-N8 nolu ağaç benzeri yapı numunelerin sıcaklık zaman grafiği.	104
Şekil 4. 21. Ağaç benzeri yapı numunelerden 20. saniyede alınan termal kamera.....	106
Şekil 4. 22. Ağaç benzeri yapı numunelerden 300. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.	107
Şekil 4. 23. Ağaç benzeri yapı numunelerden 600. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.	108
Şekil 4. 24. Ağaç benzeri yapı numunelerden 750. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.	110
Şekil 4. 25. Ağaç benzeri yapı numunelerden 900. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.	111
Şekil 4. 26. N7 numunesine ait anlık akış alanı görselleri.....	113
Şekil 4. 27. N7 numunesine ait PIV ölçüm sonuçları ve vektör haritaları.....	114
Şekil 4. 28. N7 numunesine ait hız vektörleri dağılım histogramı.	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1	ISO/ASTM 52900:2021'e göre eklemeli imalat kategorileri.	6
Çizelge 2. 1	SLM ile üretilen 316L Tozunun Üretim Parametrelerine Göre Bağlı Yoğunluk Değişimini İçeren Literatür Özeti (Barrionuevo et al. 2024).	39
Çizelge 2. 2	SLM ile üretilen 316L malzemede yüksek bağl yoğunluk elde etmek için gerekli üretim parametreleri (Ahmed et al. 2022).	40
Çizelge 2. 3	Fraktal Yapılardaki Mikrokanallara ait çalışmaların özeti (Narendran et al. 2018).	58
Çizelge 3. 1.	316L, CoCrW ve Ti6Al4V tozlarının kimyasal bileşimi ve geometrik yapıları.	61
Çizelge 3. 2.	SLM Üretim Parametreleri..	67
Çizelge 3. 3.	Ağaç benzeri yapı numunelerin geometrik özellikleri.	65
Çizelge 4. 1.	SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6Al4V numunelerinin yoğunlukları. .	91

1. GİRİŞ

1.1. Konu ve Kapsam

Günümüzde imalat sektörü, malzeme bilimi, mühendislik yazılımları ve lazer teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde, farklı teknolojilerin bir araya getirildiği, üç boyutlu (3D) dijital tasarımlara dayanan bir üretim yöntemiyle tanışmıştır. “Eklemeli imalat” olarak literatüre geçen bu yöntem, polimer, metal ve seramik gibi malzemelerin katman katman birleştirilmesiyle işlevsel mühendislik parçalarının üretilmesini sağlamaktadır. Bu teknoloji, başta medikal alan olmak üzere otomotiv, uzay ve havacılık, bilgisayar ve ev aletleri gibi sektörlerde, karmaşık geometrilere sahip prototiplerin veya nihai mühendislik parçalarının üretimine olanak tanımıştır (Yalçın ve Ergene 2017).

Tasarım serbestliği sağlaması, poroz materyallerin ve karmaşık geometrilerin üretimine olanak tanınması eklemeli imalat yönteminin (Additive Manufacturing) belli başlı avantajlarından. Bahsedilen bu avantajlar eklemeli üretim yöntemi ile üretilen ürünlerin geniş bir kullanım alanına yayılmasına olanak sağlamıştır. Son yıllarda eklemeli üretim ürünlerinin sıklıkla kullanıldığı alanlardan biri de termal uygulamalar olmuştur. Karmaşık katı-akışkan ara yüzey etkileşimleri barındıran termal uygulamalarda, katıların termal ve yüzey özellikleri, ısı-akış etkileşimleri üzerinde kritik öneme sahiptir. Özellikle ısı değiştiricilerde, bu teknoloji geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşarak optimize edilmiş ısı akışı sağlar. Eklemeli imalat, düşük malzeme israfı ve hızlı prototipleme ile enerji verimliliğini artırır. Özellikle ısı yönetimi gerektiren elektrik makinelerinde, ısı boruları ve soğutma kanalları gibi yenilikçi çözümlerle termal performansı artırır (Tiismus et al. 2022). Eklemeli imalat ile üretilen ısı değiştiriciler, yüksek sıcaklık uygulamalarında termal performansı maksimize etmek için tasarlanabilir. Nikel süper alaşımları ve titanyum gibi malzemelerin eklemeli imalatı, gaz türbinleri ve roket motorlarında termal dayanıklılığı artırır. Ayrıca, mikro kanallar ve karmaşık soğutma kanalları tasarımları, sıvı soğutma sistemlerinde akışkanın daha etkin yönetimini sağlar. Bu özellikler, çoğunlukla havacılık ve otomotiv endüstrilerinde geniş uygulama alanları bulur.

Son olarak, eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğü ve optimize edilebilir malzeme kullanımı, termal yönetim gerektiren uygulamalarda sürdürülebilir çözümler sağlar. Bu, özellikle enerji tüketimini azaltmak için kritik öneme sahiptir. Eklemeli üretim ile yapılan soğutma sistemleri, enerji verimliliğini artırarak endüstriyel uygulamalarda büyük avantajlar sunar (Thompson et al. 2016).

Bu çalışmada seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak 316L, CoCrW ve Ti6Al4V alaşımlarından poroz plaka numuneler ve 316L alaşımından biyomimetik ağaç benzeri yapı numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde boşluk oranı, termal ve yüzey özellikleri analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı lazer üretim parametrelerinin bahsedilen özellikler üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında numuneler termal uygulamalar yönüyle değerlendirilmiştir. Çalışmaya konu olan üç farklı alaşım içerisinde nispeten yüksek ısı iletkenlik, iyi akışkan tutuş ve orta seviyede yüzey pürüzlülüğü özellikleri sebebiyle genişletilmiş yüzey, terlemeli soğutma vb. termal uygulamalar için 316L alaşımının daha kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca 316L paslanmaz çelik alaşımı düşük enerji yoğunluğunda üretime olanak tanınması ve nispeten uygun malzeme maliyeti yönüyle daha ekonomiktir ve 316L alaşımı SLM üretimlerinde boşluk oranının kontrolü ve poroz yapıların üretimi için daha elverişli olması, termal uygulamalar için kritik bir malzemedir. 316L alaşımı termal uygulamalar için belirlendikten sonra, bu alaşım ile ağaçların köklerinden yapraklarına su iletim mekanizmasından ilham alınarak ağaç benzeri kanallar barındıran soğutucular tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu soğutucu tasarımı, soğutma suyunun kapılar (kılcallık) kuvvet ile ağaç benzeri yapı içerisinde hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Kendi kendine pompalama (self-pumping) süreci, bu soğutucu tasarımının terlemeli soğutma proseslerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ağaç benzeri yapı soğutuculardaki geometrik modifikasyonların termal performansa etkisi de bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

1.2. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing)

Günümüzde 3D baskı terimi herkes tarafından bilinse de 3D baskının aslında eklemeli imalat süreçlerinden biri olduğu bilinmiyor. 3D baskı ya da eklemeli imalat olarak da bilinen yöntem, genellikle bir malzemenin birçok ardışık ince katmanının üç boyutlu dijital bir modelinden fiziksel bir nesne yapma tekniğidir. Malzemelerin ardışık olarak katmanlanması, eklemeli (katmanlı) imalat tekniğini oluşturur (Badiru et al. 2017). Eklemeli imalat teknolojisinde, ilk olarak 1980'li yıllarda SL (Stereolitografi) diye adlandırılan plastik işleme tekniği kullanılmıştır. Bu teknik, dünyada ticari olarak üretilen ilk eklemeli imalat sistemi olmuştur. Eklemeli imalat teknolojileri, dünyada ticari olarak üretilen ilk sistemle önemli bir başlangıç yapmış ve özellikle 1990'lı yıllarda hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. 1991 yılı, Fused Deposition Modelling (FDM), Solid Ground Curing (SGC) ve Laminated Object Manufacturing (LOM) gibi yöntemlerin ticarileştiği bir dönüm noktası olmuştur. Bu yenilikleri takiben, Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi geliştirilmiş ve 1994 yılında Alman EOS firması, Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) teknolojisine dayalı M160 makinesini tanıtmış, 1995 yılında ise M250 modelini piyasaya sürmüştür (Özer 2020).

Son 20 yılda eklemeli imalat alanındaki gelişmeler ivme kazanmış, mevcut teknolojiler gelişirken Direkt Metal Lazer Ergitme (DMLE) gibi yeni teknolojiler de ticarileşmiştir. 2002 yılında Doğrudan Metal Biriktirme (DMD) sistemlerinin satışına başlanmış, 2016 yılı itibarıyla neredeyse her hafta yeni bir teknoloji, malzeme veya uygulama tanıtılmıştır. Günümüzde bu sistemler, artan malzeme çeşitliliğiyle birlikte daha güvenilir ve verimli hale gelmiştir (Özer 2020).

Eklemeli imalat süreci kısaca, ilk olarak basılacak nesnenin 3 boyutlu modelinin oluşturulmasıdır. Bu model, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı ile tasarlanabilir veya örneğin bir nesne lazer tarayıcı kullanılarak ters mühendislik teknikleriyle oluşturulabilir. CAD dosyası daha sonra genellikle bir STL dosyası olan standart bir katı madde imalat dosya formatına dönüştürülür. Sonraki adımda, sadece bir bilgisayar tarafından kontrol edilen makine, modeli katman katman oluşturur. Parçayı oluşturduktan ve soğuma, sertleşme süreçlerinden sonra, model makineden çıkarılır. Temizleme,

1. GİRİŞ

parlatma, boyama ve yüzeyin istenen standarda getirilmesi gibi üretim sonrası ek işlemleri içerebilir.

Eklemeli imalat yöntemlerinin geleneksel yöntemlere göre bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Avantajları;

- Eklemeli imalat teknolojileri, üretim aşamasında özel master/kalıp benzeri gereçler gerektirmemesi nedeniyle kalıp, tasarım ve üretim faaliyetlerinden işçilik ve maliyet kazancı sağlar.
- Karmaşık geometriye sahip, kritik öneme sahip parçalar eklemeli imalat yöntemi ile kolayca üretilebilir.
- Gözenekli ve hafif parçaların, diğer yöntemlerle üretimi zorken, eklemeli imalat bu tür parçaların üretimini mümkün kılar.
- Tamir, bakım ve onarım süreçlerinde hızlı yedek parça üretimi sağlanabilir.
- Eklemeli imalat teknolojileri, artık malzeme oranını azaltarak çevre dostu üretime katkıda bulunur (Anonim, 2024b).

Dezavantajları;

- Bu yönteminde kullanılan malzemelerin maliyeti yüksektir.
- Üretilen parçaların mekanik özellikleri, kullanılan malzemeden farklılık gösterebilir.
- Yüksek sarf giderleri (gaz, toz malzeme, yakıt vb.) bulunur.
- İşlemin yavaş olması ve inşa hacminin düşük olması, seri üretim için uygun olmamasına yol açar.
- CNC makinelerine kıyasla üretim maliyetleri (ham malzeme, araç-gereç, gaz vb.) daha yüksektir.
- Üretim sürecinde mikro gözenek ve kılcal çatlak oluşumu gözlemlenebilir.
- Üretilen parçalar, son işlem (ısıl işlem, parlatma vb.) gerektirebilir (Anonim, 2024b).

Genel olarak eklemeli imalat olarak adlandırılan bu üretim yönteminde pek çok farklı parametre ve proses bulunmaktadır. 2010 yılında ASTM Eklemeli imalat yöntemlerini 7 ayrı kategoriye ayırmış ve bununla alakalı ASTM F42 standardını

yayımlamıştır (Annual Book of ASTM Standards 2012). Bu standart incelendiğinde, eklemeli imalat genel olarak besleme malzemesinin formuna göre (toz, tel, sac ve eriyik), besleme malzemesine göre (plastik, metal, seramik, kâğıt, mum, kompozit vs), kullanılan ışının tipine göre (lazer, ultraviyole, elektron gibi) ve yapılan işleme göre (ergitmeli/sinterlemeli/yapıştırırmalı gibi) sınıflandırılmıştır. ASTM'ye göre eklemeli imalat kategorileri şunlardır;

1. Havuz Fotopolimerizasyonu (*Vat Photopolymerization (VPP)*),
2. Malzeme Püskürtme (*Material Jetting (MJ)*),
3. Yapıştırıcı Püskürtme (*Binder Jetting (BJ)*),
4. Malzeme Ekstrüzyonu (*Material Extrusion (ME)*),
5. Toz Yataklı Birleştirme (*Powder Bed Fusion (PBF)*),
6. Plaka Tabakalaştırma (*Sheet Lamination (SL)*),
7. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (*Directed Energy Deposition (DED)*).

ASTM' ye göre sınıflandırılan Eklemeli İmalat kategorileri Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. 1 ISO/ASTM 52900:2021'e göre eklemeli imalat kategorileri.

EKLEMELİ İMALAT		
ASTM Kategorisi	Alt Kategoriler	Malzeme
Havuz Fotopolimerizasyonu (VPP)	– Stereolitografi (SLA) – Dijital Işık İşleme (DLP) – LCD Işık İşleme (CLIP)	– Polimer ve Seramik
Toz Yataklı Birleştirme (PBF)	– Seçici Lazer Sinterleme (SLS) – Seçici Lazer Ergitme (SLM) – Direkt Metal Lazer Sinterleme (SMLS) – Elektron Işınlı Ergitme (EBM) – Çoklu Jet Füzyon (MJF) – Yüksek Hızlı Sinterleme (HSS) – Seçici Isıl Sinterleme (SHS)	– Metal ve Seramik
Malzeme Püskürtme (MJT)	– PolyJet – Nanopartikül Püskürtme (NPJ) – Drop on Demand (DOD)	– Polimer, Seramik ve Kompozit
Yapıştırıcı Püskürtme (BJT)	– Renkli Baskı – Metal veya Seramik Malzeme Kullanılan Sistemler – Kum Kalıp Yapan Sistemler	– Polimer ve Seramik
Malzeme Ekstrüzyonu (MEX)	– Ergiyik Yığma Modelleme (FDM) – Ergiyik Yığma Fabrikasyonu (FFF)	– Polimer ve Kompozit
Plaka Tabakalaştırma	– Lamine Nesne İmalatı (LOM) – SLCOM – CAM-LEM – SDL – CBAM – Ultrasonik Eklemeli İmalat (UC/UAM) – CF	– Polimer, Seramik ve Metal
Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED)	– Lazer Yöntemi (LENS) – Elektron Işını Yöntemi (EBAM) – WAAM	– Metal

Eklemeli imalat yöntemlerinin her birinin farklı kullanım alanı ve kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Havuz fotopolimerizasyon yöntemleri en iyi yüzey kalitesi veren metottur (Bhushan and Caspers 2017; Mitchell et al. 2018). Genellikle sıvı fotopolimer malzemeler kullanılsa da metal ve seramik tozlar içeren farklı ticari fotopolimer reçinelerde bulunmaktadır (Tethon3D 2020). Metal veya seramik toz içeren fotopolimer reçinelerle ilgili farklı akademik çalışmalar mevcuttur (Bartolo and Gaspar 2008; Hafkamp et al. 2018; Bae and Halloran 2018; Deng et al. 2020). Malzeme ekstrüzyonu yöntemi, en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Özellikle malzeme ekstrüzyonu yöntemlerinden eriyik yığma fabrikasyonu (Fused Filament Fabrication – FFF) en yaygın ve en ucuz olan eklemeli imalat yöntemidir (Di Angelo et al. 2017).

Doğrudan enerji biriktirme yöntemleri metal parçaların yapımında kullanılmakta olup üretilen parçaların kopma dayanımı diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha üstündür. Bununla birlikte toz yatak füzyon yöntemleri ile elde edilen parçaların kopma dayanımları doğrudan enerji biriktirme yöntemlerine yakındır (Zhang et al. 2018). Ancak kompleks geometrilerin basılmasında toz yatak birleştirme yöntemleri daha üstündür. Toz yatak birleştirme yöntemlerinde metal malzemenin dışında seramik ve plastik malzemeler de kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerde de termal gerilmeden kaynaklı problemler yaşanabilmektedir. Plaka tabakalaştırma yöntemi genellikle prototip üretim amaçlı kullanılmakta olup nihai ürün için kullanımı sınırlıdır. Malzeme püskürtme yönteminde ise yüksek çözünürlükte ve renkli prototipler elde etmek mümkündür.

Yukarıda kısaca birbirlerine göre avantajları/dezavantajlarından bahsedilen eklemeli imalat yöntemleri aşağıda detaylarıyla açıklanmıştır.

1.2.1. Havuz Fotopolimerizasyonu (*Vat Photopolymerization (VPP)*)

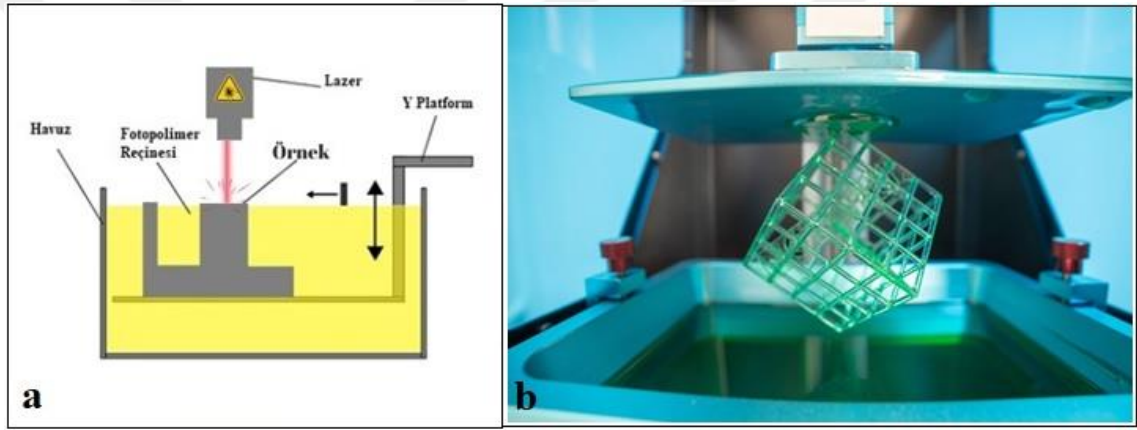
SLA, DLP ve CLIP teknolojilerinin genel ismi olan havuz fotopolimerizasyonu (VPP), eklemeli imalat yöntemlerinin içinde önemli bir yere sahiptir. SLA yöntemi, keşfedilen ilk eklemeli imalat yöntemi olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu yöntem ilk olarak prototip imalatı ve ürün geliştirme için kullanılmıştır. Daha sonra, Digital Light Processing (DLP) ve Continuous Light Interphase Printing (CLIP) gibi teknolojilerin geliştirilmesiyle birlikte, az sayıda plastik parça üretiminde de tercih edilmeye başlanmıştır.

VPP teknolojileri, diğer plastik eklemeli imalat tekniklerine kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek boyutsal hassasiyet sunar. Bu özellikleri sayesinde, havacılık, uzay, otomotiv, sağlık, dişçilik, kuyumculuk gibi çeşitli endüstrilerde kullanımı giderek artmaktadır. Özel olarak geliştirilmiş malzemelerin kullanımıyla, VPP teknolojileri hassas döküm, üretim ekipmanları, ortodonti diş kalıpları ve implant delme aparatları gibi çeşitli uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. SL teknolojisinin ticari patentinin süresinin dolmasıyla birlikte, açık kaynaklı ve ekonomik masaüstü yazıcıların piyasaya sürülmesi, VPP teknolojisinin ev kullanımını da mümkün kılmıştır.

1. GİRİŞ

(Başçı ve Yamanoğlu 2022). Şekil 1.1.'de şematik resmi verilen yöntemin üretim basamakları aşağıdaki gibidir (Anonymous 2024a);

1. İmalat platformu, katman kalınlığına göre yukarıdan reçine tankının altına doğru indirilir.
2. Bir UV ışığı, reçine katmanını katman katman iyileştirir. Platform aşağı doğru hareket etmeye devam eder ve ek katmanlar öncekinin üstüne inşa edilir.
3. Bazı makineler, bir sonraki katmanı oluşturmak için pürüzsüz bir reçine tabanı sağlamak amacıyla katmanlar arasında hareket eden bir bıçak kullanır.
4. Tamamlandıktan sonra, tanktaki reçine boşaltılır ve nesne çıkarılır.



Şekil 1. 1. (a) Havuz fotopolimerizasyon yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a)
(b) Havuz fotopolimerizasyon ile üretilmiş bir kafes örneği (Anonymous 2024e).

Yöntem, yüksek doğruluk seviyesine sahip olması ve iyi bir bitiş kalitesi sağlaması, sürecin nispeten hızlı olması ve büyük parçaların üretimine izin vermesi gibi avantajları olsa da görece pahalı olması, uzun son işleme ve reçineden çıkarma aşaması ve foto reçinelerin sınırlı malzeme kullanımı olması gibi dezavantajlara da sahiptir.

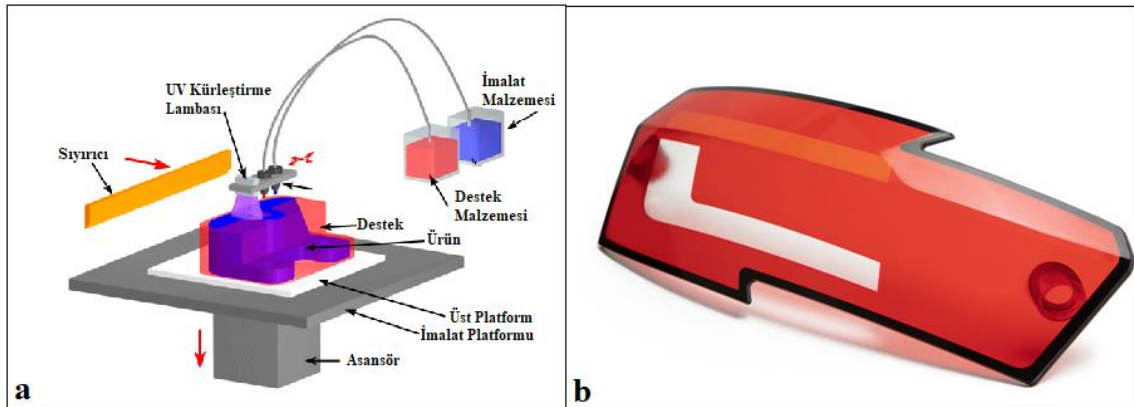
1.2.3. Malzeme Püskürtme (*Material Jetting (MJ)*)

Malzeme püskürtme, iki boyutlu mürekkep püskürtmeli yazıcıya benzer bir yöntemle nesnelerin oluşturulmasını sağlar. Malzeme, bir inşa platformuna ya sürekli ya

1. GİRİŞ

da Damla İsteğe Bağlı (DOD) yaklaşımı kullanılarak püskürtülür. Malzeme, inşa yüzeyine veya platformuna püskürtülür ve burada katman katman sertleşerek model oluşturulur. Malzeme, inşa platformu boyunca yatay olarak hareket eden bir nozuldan biriktirilir. Makineler, malzemenin yatırılması sürecini kontrol etme yöntemleri ve karmaşıklığı açısından farklılık gösterir. Malzeme katmanları daha sonra ultraviyole (UV) ışığı kullanılarak sertleştirilir veya katılaştırılır. Malzemenin damla şeklinde biriktirilmesi gerektiğinden, kullanılabilir malzeme çeşitliliği sınırlıdır. Polimerler ve balmumları, viskoz yapısı ve damla oluşturma yetenekleri nedeniyle uygun ve yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Şekil 1.2.'de şematik resmi verilen yöntemin üretim basamakları aşağıdaki gibidir (Anonymous 2024a);

1. Baskı kafası, inşa platformunun üstüne konumlandırılır.
2. Gerekli yüzeye termal ya da piezoelektrik yöntemle, baskı kafasından malzeme damlacıkları bırakılır.
3. Malzeme damlacıkları katılaşır ve ilk katmanı oluşturur.
4. Daha fazla katman, öncekine benzer şekilde üst üste inşa edilir.
5. Katmanlar, soğuması ve sertleşmesi için bırakılır veya UV ışığı ile kür edilir. Son işlem olarak destek malzemesinin çıkarılır.

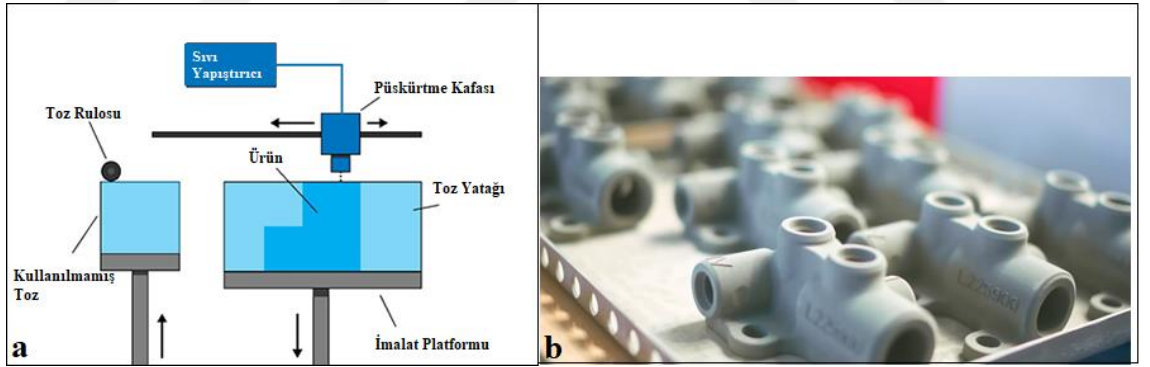


Şekil 1. 2. (a) Malzeme püskürtme yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a)
(b) Malzeme püskürtme yöntemi ile Audi için imal edilmiş bir araç arka far kapağı prototipi (Anonymous 2024f).

1.2.3. Yapıştırıcı Püskürtme (*Binder Jetting (BJ)*)

Şekil 1.3'te şematik resmi verilen yapıştırıcı püskürtme işleminde, iki malzeme kullanılır; toz bazlı bir malzeme ve bir bağlayıcı. Bağlayıcı, toz katmanları arasında bir yapıştırıcı görevi görür. Yapıştırıcı genellikle sıvı formda, yapı malzemesi ise toz formdadır. Bir püskürtme kafası, makinenin x ve y eksenleri boyunca yatay olarak hareket eder ve yapı malzemesi ile yapıştırıcı malzemenin dönüşümlü katmanlarını biriktirir. Her katmandan sonra, basılan nesne yapı platformu üzerine indirilir. Diğer toz bazlı üretim yöntemlerinde olduğu gibi, basılan nesne toz yatağı içinde kendi kendine desteklenir ve tamamlandığında bağlanmamış tozdan çıkarılır. Bu teknoloji genellikle 3DP (3 Boyutlu Baskı) teknolojisi olarak adlandırılır (Anonymous 2024a).

Parçaların farklı renkte üretimine olanak sağlaması, diğer yöntemlere göre kısa sürede üretim sağlanabilmesi, metal, polimer ve seramikler gibi çeşitli malzeme gruplarının üretiminin yapılabilmesi yöntemin avantajlarındandır. Yapıştırıcı malzeme kullanıldığından her türlü yapısal parçanın üretimine uygun değildir.



Şekil 1. 3. (a) Yapıştırıcı püskürtme yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a).
(b) Yapıştırıcı püskürtme yöntemi ile imal edilmiş yakıt valfleri (Anonymous 2024f).

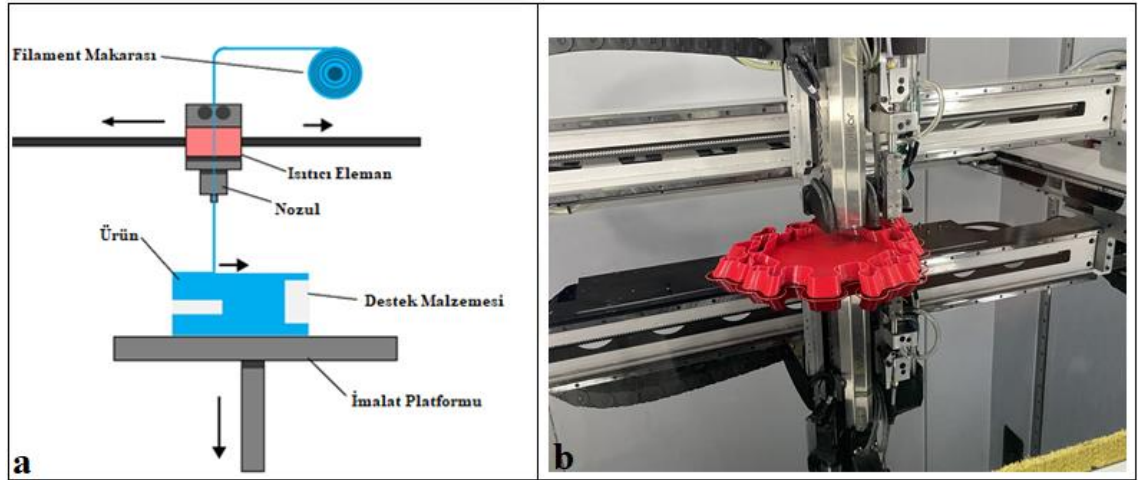
1.2.4. Malzeme Ekstrüzyonu (*Material Extrusion (MEX)*)

Malzeme ekstrüzyonu yönteminde, malzeme bir nozuldan geçirilir, burada ısıtılır ve ardından katman katman biriktirilir. Nozul yatay olarak hareket edebilir ve her yeni katman biriktirildikten sonra bir platform dikey olarak yukarı ve aşağı hareket eder. Bu,

1. GİRİŞ

birçok ucuz, ev tipi ve hobi amaçlı üretilen 3D yazıcıda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu süreçte, son model kalitesini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır, ancak bu faktörler başarılı bir şekilde kontrol edildiğinde büyük potansiyele ve uygulanabilirliğe sahiptir. MEX, diğer tüm 3D baskı süreçlerine benzerdir, çünkü katman katman oluşturulur, ancak malzeme sürekli bir akış halinde ve sabit bir basınç altında bir nozuldan eklenir. Bu basınç, doğru sonuçları elde etmek için sabit ve düzenli bir hızda tutulmalıdır. Malzeme katmanları, sıcaklık kontrolü veya kimyasal maddeler kullanılarak birbirine bağlanabilir. Malzeme, genellikle Şekil 1.4'te gösterildiği gibi makineye makara şeklinde eklenir (Anonymous 2024a).

Yaygın ve ucuz bir işlem olması, tedarik edilmesi kolay olan ve yapısal olarak iyi özelliklere sahip ABS plastiği kullanılabilir olması gibi avantajlarının yanında yöntemin, nozul yarıçapının sınırlı olması sebebiyle son kalitenin düşmesi, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında düşük hassasiyet ve hızda olması ve kalitenin artırılması için sabit bir basınca ihtiyaç duyulması gibi dezavantajları vardır.



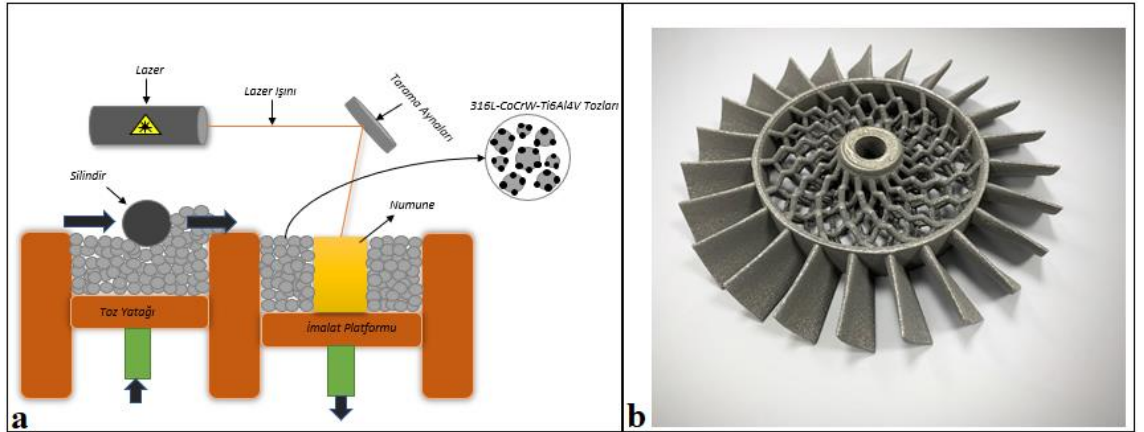
Şekil 1. 4. (a) Malzeme ekstrüzyonu yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a)
(b) Malzeme ekstrüzyonu yöntemi imalat süreci (Anonymous 2024c).

1.2.5. Toz Yataklı Birleştirme (*Powder Bed Fusion (PBF)*)

Genel çalışma mekanizması Şekil 1.5'te verilen, toz yataklı birleştirme (PBF) teknolojisi, mikron seviyesindeki toz parçacıklarını, lazer veya elektron ışını gibi termal enerji kullanarak bir araya getirip karmaşık geometrik parçalar oluşturur. Bu teknik,

1. GİRİŞ

üreticilere yüksek hassasiyetli parçaları üretme olanağı sağlar. PBF yönteminde, polimer ve seramik objeler seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisiyle oluşturulurken; doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışını ergitme (EBM) teknolojileri ise sadece metal tozlarıyla kullanılır ve bunları tamamen eriterek daha yüksek mekanik direnç ve üretim için uygun daha saf numuneler elde eder. Polimer bazlı PBF teknolojileri, destek malzemesi gerektirmediği için tasarım özgürlüğü sunar ve karmaşık geometrilerin imalatına olanak tanır (Casini 2022). PBF işlemleri, lazer veya ışın gücü, leke boyutu, yuva deseni, katman yüksekliği, toz kalitesi ve daha fazlası dahil olmak üzere geniş bir değişken yelpazesine bağlıdır. Tarihsel olarak, bu sistemlerle işlem geliştirme, özellikle metaller için, büyük miktarda deneme yanılma gerektirmiştir. Ancak yapay zeka, makine öğrenimi, simülasyon, sensörler ve daha fazlasındaki yeni gelişmeler, toz yataklı birleştirmeyi daha öngörülebilir ve uygulanması daha hızlı hale getirmeye yardımcı olmaktadır (Anonymous 2024c).

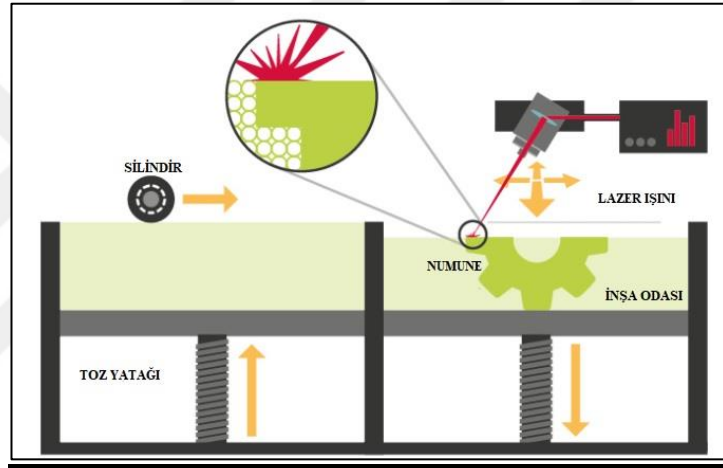


Şekil 1. 5. (a) Toz yataklı birleştirme yöntemi şematik gösterimi (Mandev et al. 2024)
(b) Toz yataklı birleştirme yöntemi ile imal edilmiş bir fan (Anonymous 2024g).

- **Seçici Lazer Sinterleme (SLS):**

Seçici lazer sinterleme (SLS) makineleri üç bileşenden oluşur; Malzemeyi eritmek için bir ısı kaynağı, bu ısı kaynağını kontrol etmek için bir yöntem ve önceki katmanların üzerine yeni malzeme eklemek için bir mekanizma (Gibson et al. 2010). SLS işlemi, toz malzemenin yapı sürecinin tamamında yeterli model

desteği sağladığı için ek destek yapıları gerektirmez. İmalat platformu, malzemenin erime noktasının genellikle birkaç derece altında olan bir sıcaklık kontrollü odanın içindedir, bu da lazerin katmanlarını birleştirmek için olan bağımlılığını azaltır. Odanın genellikle nitrojen ile doldurulması, oksidasyonu ve modelin son kalitesini artırmak içindir. Modellerin yüksek tolerans ve birleşim kalitesini sağlamak için soğuma süresi gereklidir. Bazı makineler, katman katman sıcaklığı izler ve sırasıyla lazerin gücünü ve elektrik gücünü ayarlayarak kaliteyi artırır (Anonymus 2024a). SLS yöntemi, üretim tekniği ve enerji girdisi açısından SLM ile oldukça benzerlik gösterir. SLS prosesinin en belirgin farkı, toz malzemenin tamamen erimek yerine sinterlenerek birleştirilmesidir (Tekdir 2019).



Şekil 1. 6. Seçici lazer sinterleme şematik görünümü (Anonymous 2024h).

- **Seçici Lazer Ergitme (SLM/L-PBF):**

Bu tezde de kullanılan ve Lazerle Toz Yatak Birleştirme (L-PBF) olarak da adlandırılan yöntem, geleneksel imalat yöntemlerine göre zor, maliyetli ve karmaşık geometrilerin imalatına olanak sağlar. SLM süreci bir imalat platformuna ince bir metal toz tabakasının yayılmasıyla başlar. Devamında lazer, üretilecek olan nesnenin 3D modeline göre toz yatağını tarayarak ilerler. Lazer ışınına maruz kalan alanlar birleşir ve katılarak nihai parçanın kesitini oluştururlar. Her katman tamamlandıktan sonra yeni bir toz tabakası uygulanır ve işlem, nesnenin tamamı oluşturulana kadar katman katman ilerleyerek devam eder (Kaya et al. 2023).

1. GİRİŞ

SLM, geleneksel imalat yöntemlerine göre pek çok avantaja sahiptir. Bunlar; üretim sürecinin kolaylaşması, yüksek derecede esneklik sağlama, malzeme kullanımını optimize etmek ve parçanın nihai versiyonunun doğrudan imalatını mümkün kılmasıdır.



Şekil 1. 7. SLM üretim aşamasından bir kesit görüntüsü (Anonymous 2024d).



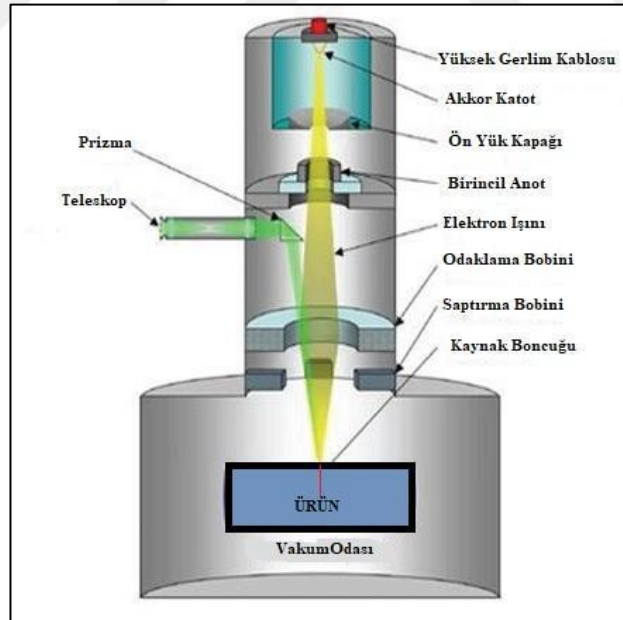
Şekil 1. 8. SLM üretim aşamasından bir kesit görüntüsü (Anonymous 2024d).

- **Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS):**

Üretim mekanizması SLS yöntemi ile aynıdır yalnızca DMLS yönteminde yalnızca metal tozlar kullanılır. İşlem, yalnızca metal tozlarını katman katman sinterler.

- **Elektron Işını Ergitme (EBM):**

Şekil 1.9’da şematik görünümü verilen EBM, diğer toz yataklı birleştirme yöntemleri gibi toz halindeki malzemenin ısıtılıp eritilerek katman katman birleştirilmesi ile nihai ürünün elde edilmesi prensibine dayanır. Diğer toz yataklı birleştirme yöntemlerinden ayıran en temel fark ise eritmenin lazer ışını yerine elektron ışını ile yapılmasıdır. Metal tozları ile üretim gerçekleştiğinden üretimde inert gaz bulunmaz, işlem vakum ortamında gerçekleşir. SLM ile kıyaslandığında üretim sonunda elde edilen ürünler daha yoğun ve gözeneksiz yapıya sahip ürünlerdir (Özkan 2019). Fakat üretim sonunda elde edilen ürünlerin yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksektir (Harrysson et al. 2008).

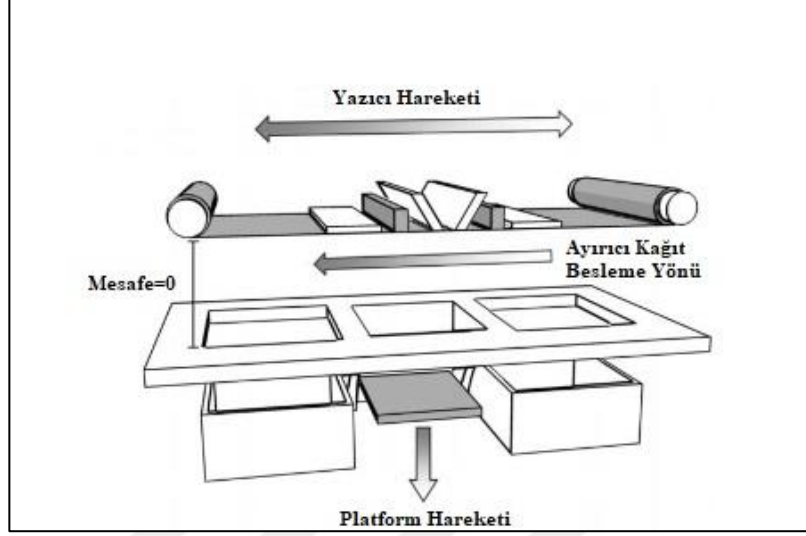


Şekil 1. 9. EBM yöntemi şematik gösterimi (Özkan 2019).

- **Seçici Isıl Sinterleme (SHS):**

Şekil 1.10.’de şematik görünümü SHS yöntemi, toz katmanlara termal ısı uygulanarak ürünün elde edildiği bir toz yatak füzyon yöntemidir. Yöntemde

kullanılan cihazlar, tek üreticisi olan Blueprinter şirketi tarafından patentlidir ve şirket 2016 yılında iflasını ilan etmiştir (Milward 2020).



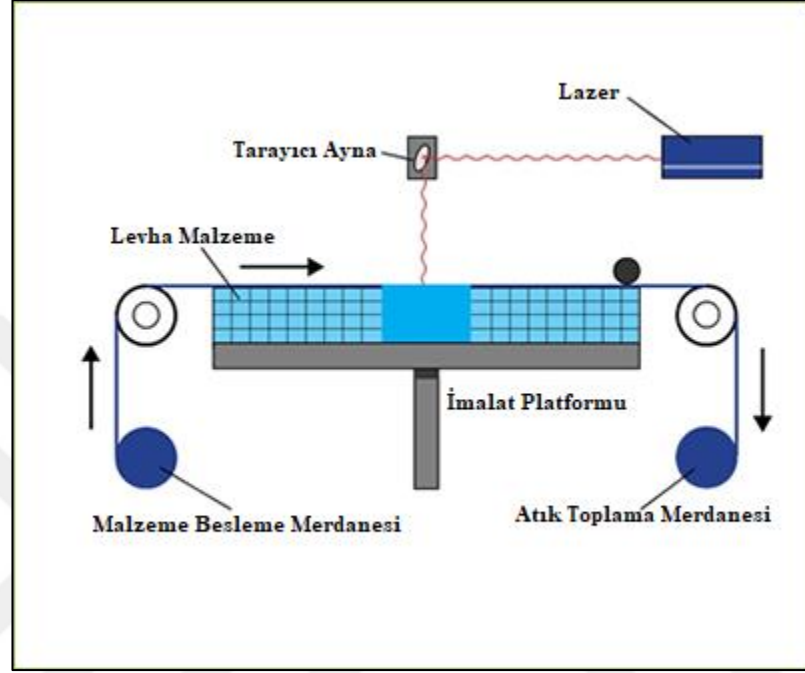
Şekil 1. 10. SHS yöntemi şematik gösterimi (Milward 2020).

1.2.6. Plaka Tabakalaştırma (Sheet Lamination (SL))

Plaka tabakalaştırma, malzeme levhalarının birbirine yapıştırılmasıyla bir parçanın oluşturulduğu bir eklemeli imalat işlemidir. Şekil 1.11'de şematik görünümü verilen yöntemde genel olarak, lamine malzemeler (tabaka halinde bulunan bileşenler) kesilir ve yapıştırılarak parça üretilir. Besleme merdanesinden gelen malzeme, ısıtılmış silindir yardımıyla önceki katmanın üstüne yapıştırılır. Her katmanda, parçanın dış hatları lazer ile kesilir. Fazla malzeme çıkarıldığında, bir sonraki tabaka üstüne yüklenir ve işlem devam eder. Kâğıt, metal, plastik gibi çeşitli malzemeler kullanılabilir ve her tabaka öncekine yapıştırıcılar ile bağlanır. Bu işlem, 3D parça oluşturulana kadar tekrarlanır (Özer 2020). Plaka tabakalaştırma işlemleri arasında ultrasonik eklemeli imalat (UAM) ve lamine nesne imalatı (LOM) bulunmaktadır. Ultrasonik Eklemeli İmalat işlemi, metal levhaların veya şeritlerin ultrasonik kaynak kullanılarak birleştirildiği bir süreçtir. Bu işlem, genellikle kaynak işlemi sırasında bağlanmamış metalin ek olarak CNC işlemeye ve çıkarılmasına ihtiyaç duyar. Lamine nesne imalatı (LOM) ise benzer bir katman katman yaklaşımını kullanır, ancak kaynak yerine kâğıt ve yapışkan kullanır. LOM işlemi, baskı işlemi sırasında yapı sonrası kolay çıkarılabilmesi için bir çapraz çizme yöntemi kullanır. Lamine nesneler genellikle estetik ve görsel modeller için kullanılır ve yapısal kullanım için uygun değildir. UAM, alüminyum, bakır, paslanmaz çelik ve

1. GİRİŞ

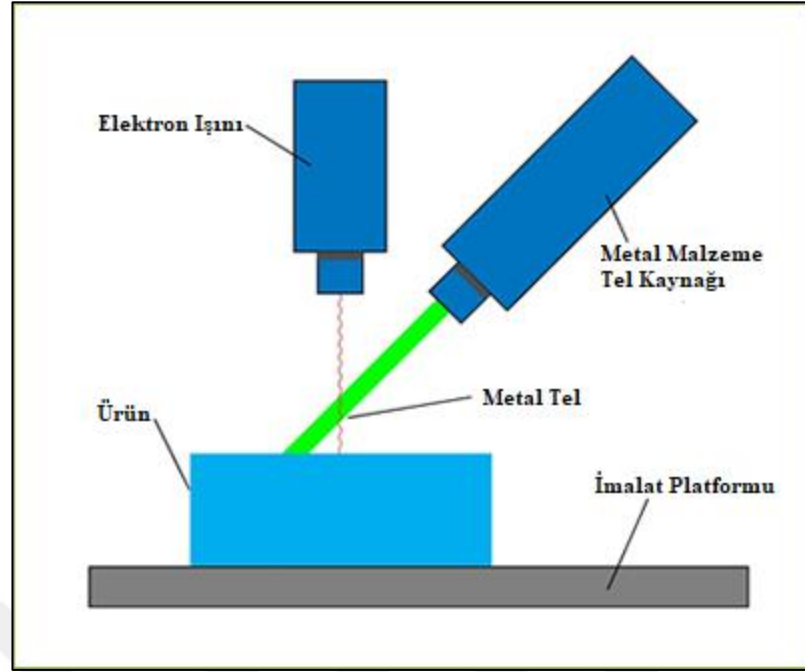
titanyum gibi metalleri içeren metalleri kullanır. İşlem düşük sıcaklıkta gerçekleşir ve iç geometrilerin oluşturulmasına olanak tanır. İşlem, metalin eritilmediği için farklı malzemeleri birleştirebilir ve nispeten az enerji gerektirir. Bu yöntemle büyük boyutlu parçalar üretilabilir ve çevre dostu bir yöntemdir (Anonymous 2024a).



Şekil 1. 11. Plaka tabakalaştırma yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a).

1.2.7. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (*Directed Energy Deposition (DED)*)

Bu yöntem, lazerle mühendislik net şekillendirme, yönlendirilmiş ışık imalatı, doğrudan metal biriktirme, 3D lazer kaplama gibi pek çok terminoloji ile adlandırılır. Şekil 1.12’de şematik görünümü verilen yöntemde, metal tozu veya teli bir lazer ya da elektron ışınıyla oluşturulan bir erime havuzuna besleyerek malzemeye uygulanır. Yöntem çalışma prensibi itibariyle kaynak yapma işlemine benzemektedir. DED yöntemi, mevcut parçaların onarılması ya da onlara yeni özellikler eklemek için kullanılabileceği gibi sıfırdan yeni parçalar oluşturmak için de kullanılabilir.



Şekil 1. 12. Direkt enerji biriktirme yöntemi şematik gösterimi (Anonymous 2024a).

1.2.8. İmalat Sürecinde Kullanılan Toz Malzemeler

Bu tez çalışması kapsamında SLM ile üretimi gerçekleştirilen poroz plaka numuneler ve ağaç benzeri yapı numunelerin üretiminde 3 farklı alaşım kullanılmıştır. Kullanılan alaşımlarla ilgili bilgi kısaca aşağıda verilmiştir.

- **316L:**

316L paslanmaz çelik, SLM süreçlerinde mükemmel termal özellikleri ile bilinir. Bu çelik türü, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek ısı iletkenliği ile dikkat çeker, bu da parçaların homojen bir şekilde ısınmasını ve soğumasını sağlar. Isı akışının homojenliği, termal gerilmeleri azaltarak, çatlak oluşumunu ve şekil bozukluklarını minimize eder (Mertens et al. 2014).

SLM sürecinde kullanılan 316L paslanmaz çelik tozu, yüksek enerji yoğunluklarına maruz kaldığında bile stabil kalır (DebRoy et al. 2018). Bu, lazerin yüksek ısı enerjisi altında toz partiküllerinin hızlı ve eşit bir şekilde ergimesini sağlar. Ergime sırasında

oluşan düzgün termal akış, mikro yapının homojen olmasına katkıda bulunur ve bu da mekanik özellikleri iyileştirir (Herzog et al. 2016).

316L paslanmaz çeliğin termal özellikleri, ısı iletkenliğinin önemli olduğu uygulamalarda büyük avantaj sağlar. Özellikle ısı değiştiriciler ve termal yönetim sistemleri gibi endüstriyel uygulamalarda, bu malzeme, ısının etkin bir şekilde transfer edilmesini sağlayarak sistem verimliliğini artırır (Hanzl et al. 2015).

- **CoCrW:**

CoCrW (kobalt-krom-volfram) alaşımı, yüksek sıcaklık dayanımı ve termal stabilitesi ile bilinir. Bu alaşım, özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında üstün performans gösterir ve termal genleşme katsayısının düşük olması nedeniyle, ısı akışının düzgün bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu özellikler, SLM sürecinde lazer enerjisinin etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar (Mumtaz et al. 2008).

SLM yöntemi ile üretilen CoCrW parçaları, yüksek sıcaklıklarda bile mükemmel mekanik ve termal özellikler sergiler. Alaşım, yüksek enerji yoğunluklarına maruz kaldığında bile yapı bütünlüğünü korur, bu da ısı işlem sırasında oluşabilecek çatlakları ve deformasyonları minimize eder. Ergime ve katılaşma sırasında homojen ısı dağılımı, malzemenin iç yapısının homojen olmasını sağlar ve bu da mekanik performansı artırır (Popovich et al. 2017).

CoCrW alaşımı, termal yönetim gerektiren uygulamalarda da yaygın olarak kullanılır. Özellikle motor bileşenleri, türbin kanatları ve diğer yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal olan bu alaşım, ısıya dayanıklı ve termal olarak kararlı parçalar üretmek için kullanılır (Mumtaz et al. 2008).

- **Ti6Al4V:**

Ti6Al4V, titanyum, alüminyum ve vanadyum içeren bir alaşım olup, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve mükemmel termal özellikleri ile dikkat çeker (Thomas 2009).

SLM süreçlerinde kullanılan bu alaşım, yüksek termal iletkenlik ve düşük termal genleşme katsayısı ile üstün performans sergiler (Attar et al. 2018). Bu özellikler, ısı akışının etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayarak, termal gerilmeleri azaltır ve parça kalitesini artırır (Kruth et al. 2005).

SLM sürecinde Ti6Al4V tozunun kullanımı, yüksek sıcaklık altında bile kararlı mikro yapılar elde edilmesini sağlar (Baufeld et al. 2010). Alaşım, lazer enerjisinin yüksek yoğunluklarına dayanıklıdır ve ergime sırasında homojen bir ısı dağılımı sağlar. Bu, malzemenin iç yapısının tutarlı olmasını ve istenen mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlar (Eshawish et al. 2021).

Ti6Al4V'nin termal özellikleri, özellikle havacılık ve savunma sanayilerinde kritik öneme sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda bile yapısal bütünlüğünü koruyan bu alaşım, termal yönetimin kritik olduğu uygulamalarda, ısının etkili bir şekilde transfer edilmesini ve sistemin güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar (Attar et al. 2018).

1.3. Biyomimetik

Teknoloji ve bilimdeki gelişmelerin önemli bir kısmı doğadan esinlenme ile birlikte gerçekleşmektedir. Karmaşık problemlerin çözümü için mühendisler, mimarlar, sanatçılar doğadan esinlenerek, doğaya uyumlu ve uygulanabilir çözümler üretmişlerdir (Jiang et al. 2017). Doğadan esinlenerek doğaya uyumlu ve uygulanabilir çözümler üretilen bu bilim dalı *Biyomimetik* olarak adlandırılmaktadır. Biyomimetik kavramı literatürde biyomimikri, biyonik, biyomimesis adları ile de karşımıza çıkmaktadır. Biomimesis, Yunanca yaşam anlamına gelen 'bios' ve taklit anlamına gelen 'mimesis' kelimelerinden oluşmaktadır. Biyomimesis literatüre eklenen yeni bir kavram gibi görünse de insanoğlunun geçmişini incelediğimizde kuş gibi uçuşma, balık gibi yüzme hayallerinin eskiye dayandığı görülmektedir. Biyomimetik; doğadaki bir canlının renk, doku, işlev veya bilimsel olarak tam anlamıyla ya da kısmen taklit edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Huang et al. 2018). Biyomimetik kavramı 1950'lerin sonlarından itibaren popüler hale gelmiştir. Sıklıkla kullanılan diğer terim olan 'biyonik' ise Jack Steele tarafından 1960'larda dile getirilmiştir. Biyomimetik kelime olarak 1974 yılında Webster'in sözlüğünde 'biyolojik olarak üretilen maddelerin ve materyallerin oluşumu,

1. GİRİŞ

yapısı ve işlevi ile biyolojik mekanizmalar ve süreçlerin incelenmesi’ olarak tanımlanmıştır (Huang et al. 2019).

Tarih boyunca insanoğlu doğadan ilham almış, yapmış oldukları ve yapacakları tasarımlarda doğadaki doğal mekanizmaların çalışma prensiplerini araştırmalarına aktarmışlardır. Tasarımı yapılan ve günlük hayatta kullandığımız birçok aracın geliştirilmesi esnasında doğada bulunan yapılardan yararlanılmıştır. Halk dilinde helikopter böceği olarak anılan yusufçuk ilk gördüğümüzde bize helikopterleri anımsatmaktadır. Şekil 1.13.’de yusufçuk böceğinin kanat yapısı ve gövdesinin görüntüsü helikopter firmalarına tasarım aşamasında ilham kaynağı olmuştur (Anonymous 2024h).



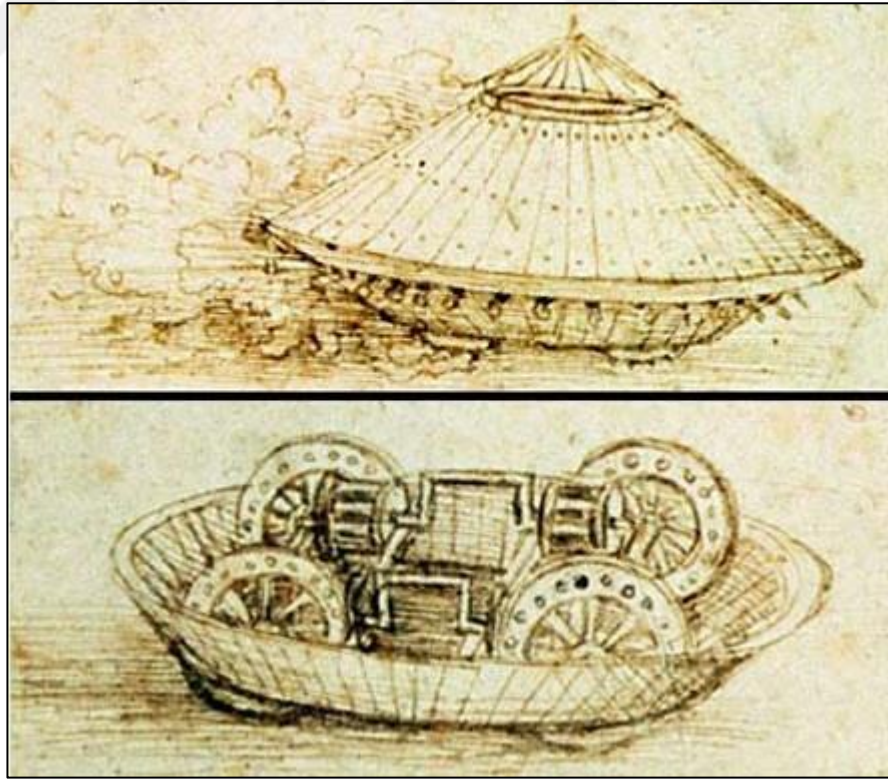
Şekil 1. 13. Yusufçuk böceğinden ilham alınarak tasarlanan helikopter (Anonymous 2024h).

Şekil 1.14’de DaimlerChrysler firması tarafından tasarlanan Biyonik Araba prototipi de mühendislikte biyomimetik çalışmasına bir örnek sunulabilir. Büyük hacimli, küçük tekerlek tabanlı bir otomobilin tasarım aşaması, kutu benzeri şekli göz önüne alındığında aerodinamik bir balık olan kutu balığına (ostracion meleagris) dayanmaktadır. Otomobilin şasisi ve yapısı da biyomimetiktir ve ağaçların stres konsantrasyonlarını en aza indirecek şekilde nasıl büyüyebildiklerini temel alan bir bilgisayar modelleme yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. (Vincent vd. 2006).



Şekil 1. 14. Kutu balıkları ve ağaçların büyümesinden esinlenerek tasarlanan otomobil (Gökmen 2024).

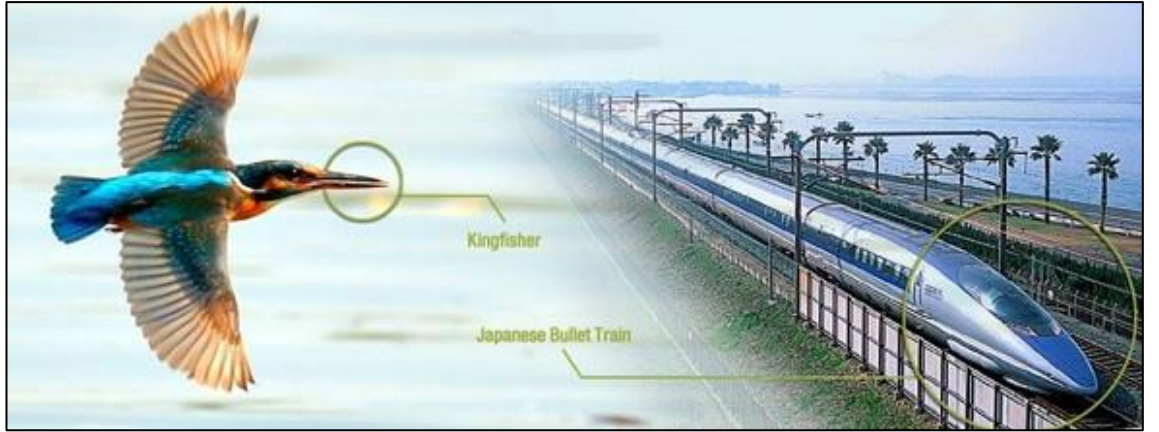
Leonardo Da Vinci, Şekil 1.15'te gösterilen zırhlı araç tasarımında, kaplumbağaların savunma mekanizmasından ve savaşçıların ok saldırılarına karşı kalkanlarını başlarının üzerine yerleştirerek oluşturdukları koruma düzeninden ilham almıştır. Da Vinci, hem hayvanlardan hem de insanlardan esinlenerek tankların ilk örneğini ortaya koymuştur (Sevencan ve Üreyen 2020).



Şekil 1. 15. Leonardo Da Vinci'nin kaplumbağadan esinlendiği tank tasarımı (Sevencan ve Üreyen 2020).

1. GİRİŞ

Hayvanların hareket ve davranışlarından ilham alınarak geliştirilen birçok makine ve aksesuar bulunmaktadır. Örneğin, hızlı trenlerin tünellerde yüksek hızda ilerlerken oluşturdukları mikro basınç dalgaları, patlama sesi ve gürültü gibi sorunlara yol açmaktadır. Şekil 1.16'da verilen Japon Demiryolları Teknik Araştırma Enstitüsü ve Kyushu Üniversitesi araştırmacıları, bu sorunu çözmek için yalıçapkını kuşunun avlanırken suya zarif bir şekilde dalma biçiminden esinlenmiştir. Yalıçapkını kuşunun gagasının şekli, yeni bir hızlı tren tasarımına uygulanmış ve bu sayede trende oluşan ses problemi ortadan kaldırılmıştır. Sonuç olarak, daha sessiz, hızlı ve verimli bir yolculuk sağlanmıştır. Havacılık araştırmalarında ve uçak tasarımlarında da kuşların kanat yapıları ve uçuş tekniklerinden önemli ölçüde faydalanılmıştır. Wright kardeşler, geliştirdikleri ilk uçak olan Kitty Hawk'ın kanatlarını akbabaların kanatlarından ilham alarak tasarlamışlardır. Tırtılların hareket mekanizmalarından yola çıkılarak doğrusal motorlar geliştirilmiştir. Yunusların ağız yapısındaki çıkıntılar ve derilerinin yapısı denizaltı tasarımlarında kullanılmıştır. Ayrıca, tavuğun baş hareketlerinden esinlenen Mercedes, otomobil süspansiyonlarında Magic Body Control teknolojisini geliştirmiştir. Nike ise bukalemunların göz hareketlerinden esinlenerek geliştirdiği merceklerle %25 daha geniş görüş açısı sunan gözlükler üretmiştir (Sevencan ve Üreyen 2020).



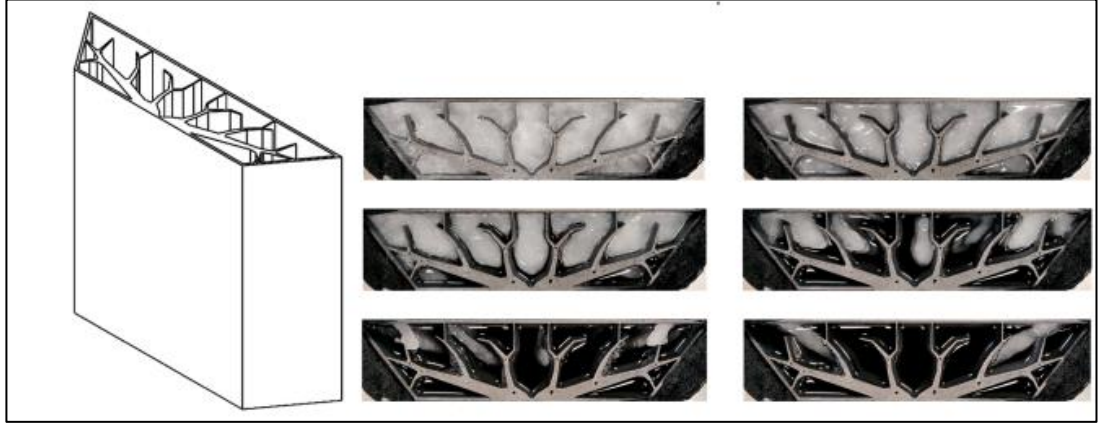
Şekil 1. 16. Yalıçapkını kuşundan ilham alınarak tasarlanmış Japon yüksek hızlı treni (Sevencan ve Üreyen 2020).

Biyomimetik tasarım süreçlerinde hem tabiat hem de insan faktörleri önemli rol oynar. Bu süreç, belirli teknik aşamaları kapsar ve biyoloji ile mühendislik gibi iki farklı uzmanlık alanından yararlanır. Tasarım sürecine iki farklı yaklaşımla yaklaşılabilir.

1. GİRİŞ

İlkinde, biyologlar canlılarda keşfettikleri bir özelliği mühendislerle paylaşır ve bu özelliğin hangi endüstri alanında kullanılabileceğini araştırırlar. İkinci yaklaşımda ise, endüstride ortaya çıkan bir ihtiyaç veya boşluk doğrultusunda biyologların daha önce keşfettikleri özelliklerden nasıl faydalanılabileceği incelenir. Sonuç olarak, biyomimetik tasarımda temel amaç, mevcut tasarımlarla doğadaki çözümleri birleştirerek tasarım problemini daha üst düzeyde bir çözüme ulaştırmaktır (Eren 2024).

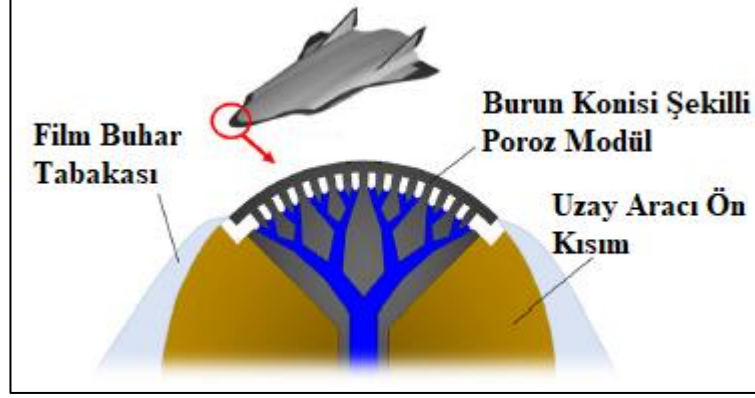
Şekil 1.17’de verilen görselde, elektronik soğutma için kullanılan ısı bataryalarının içine topoloji optimizasyonu ile geliştirilmiş ağaç benzeri bir yapıya sahip ısı alıcı tasarlanmıştır. Ağaç benzeri yapı kısmı SLM ile üretilmiş ve tasarımın termal performansı iyileştirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 1. 17. Ağaç benzeri yapı olarak tasarlanmış ısı alıcı (Ho et al. 2021).

Şekil 1. 18’de hipersonik uzay aracının burun kısmını korumak için tasarlanmış biyomimetik bir yapıyı göstermektedir. Hipersonik uzay araçları ciddi bir aerodinamik ısınmaya maruz kalır ve bu da etkili bir termal koruma gerektirir. Burada burun konisi şeklindeki gözenekli modül, aracın ön kenarına yerleştirilir ve su takviye tankına bağlanır. Su, herhangi bir pompaya ihtiyaç duymadan sürekli olarak su tankından mikro delikli yüzeye akar. Daha sonra sıvı su buharlaşarak büyük miktarda ısıyı uzaklaştırır ve durma noktası yakınındaki bölgeyi soğutur. Buhar, yüzeydeki aralıklardan dışarı çıkar ve akış aşağıdaki kısımları daha fazla koruyan bir buhar filmi tabakası oluşturur. Uçuş hızı değiştiğinde suyun kütleli akış hızı, ısı akışı değişimine otomatik olarak uyum sağlar. Burun konisi şeklindeki gözenekli modül için kullanılan bu kendi kendine pompalanan

terlemeli soğutma sistemi oldukça basittir. Bu biyomimetik terlemeli soğutma sistemi için pompa ve kontrol sistemine ihtiyaç duyulmaz (Huang et al. 2019).



Şekil 1. 18. Uzay aracı burun kısmı için ağaç benzeri yapılı kendinden pompalamalı terlemeli soğutma tasarımı (Huang et al. 2019).

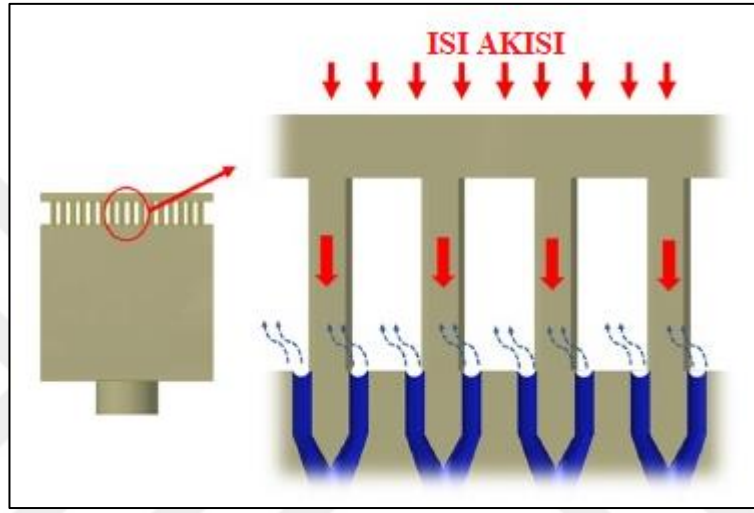
1.4. Terlemeli Soğutma

Terlemeli soğutma ilk olarak 1950’lerde gündeme gelmiş ve o yıllardan itibaren burun konileri, roket yanma odaları, scramjet yakıt enjektörleri ve gaz türbini kanatları gibi yüksek ısı akışı olan bileşenleri ablasyondan korumak için etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Huang et al. 2019).

Terleme, yüzeylerin soğutulması için kullanılan etkili bir yöntemdir. Özellikle uçak motorlarında (türbin kanatları ve roket motorları gibi) yakıtın yanması sonucunda yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçalar için terleme soğutma yöntemi yaygın olarak tercih edilir. Bu yöntemde, yüzeyin altındaki bir soğutucu akışkan kaynama noktasının altında kullanılır. Gözenekli bir malzemeden yapılan ısıtılmış bir yüzey, soğutucu bir akışkanın bu malzeme içinden geçmesine izin verir. Bu akışkan, konveksiyon yoluyla ısı emer ve böylece yüzeyi soğutur. Genellikle gazlar soğutucu olarak tercih edilir; ancak, sıvılar kullanıldığında buharlaşma ısısından yararlanma olasılığı vardır. Su, tüm sıvılar arasında en yüksek buharlaşma ısısına sahip olduğundan, terlemeli soğutma için en uygun sıvıdır.

1. GİRİŞ

Terlemeli soğutma, birçok araştırmacı tarafından etkili bir ısı dağıtma mekanizması olarak kanıtlanmıştır. Araştırmalar genellikle yüksek ısı akısına maruz kalan yüzeylerde soğutma etkinliği, termal sınır koşulları, gözenekli matris içindeki sıcaklık dağılımı ve yüzeye yakın sıcaklık gradyanı gibi konuları ele alır. Ancak, gerçek uygulamalarda, terlemeli soğutma kontrolü ve ablasyon önleme için ısı akısının belirlenmesi son derece önemlidir. Bu tür analizler genellikle sayısal yöntemlerle gerçekleştirilir.



Şekil 1. 19. Kendi kendine pompalamalı terlemeli soğutma sistemi (Huang et al. 2019).

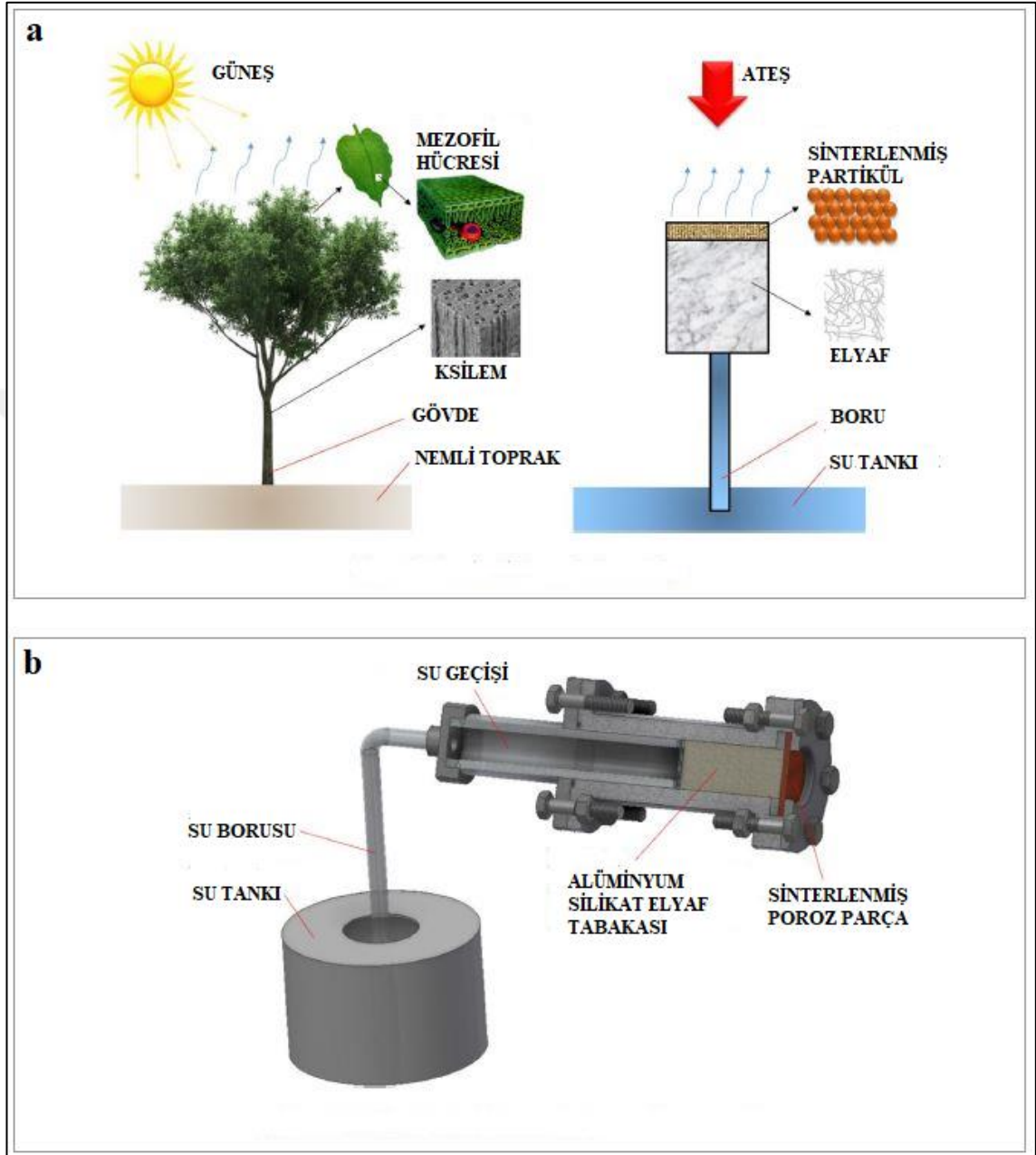


Şekil 1. 20. Terlemeli soğutma şematik gösterim (Jiang et al. 2017).

Terlemeli soğutma, bir cismin duvarından geçerken soğutma gereksinimi olan cismin iç enerjisinin bir kısmını emer ve aynı anda çevresel alandan giren konvektif ısı

1. GİRİŞ

akısını etkileyen aktif bir ısı koruma yöntemidir. Bu soğutma yöntemi, gözenekli, delikli, film veya engelleyici soğutma şeklinde uygulanabilir.



Şekil 1. 21. (a) Biyomimetik terlemeli soğutma şematik gösterim, (b) Biyomimetik terlemeli soğutma ekipmanları şematik gösterim (Jiang et al. 2017).

1.5. Yüzey Gerilimi ve Kılcallık Etkisi

Yüzey gerilimi, sıvının yüzeyinde oluşan kuvvetlerin, sıvının mümkün olan en küçük yüzey alanını oluşturmasını sağlamasıdır ve bu olay sıvı molekülleri arasındaki çekim kuvvetlerinden kaynaklanır. Makine mühendisliğinde, yüzey gerilimi birçok uygulamada önemli bir rol oynar. Örneğin, mikro akışkan sistemlerde sıvının küçük kanallarda nasıl hareket ettiği, ısı borularında sıvının buharlaşma ve yoğunlaşma süreçleri ya da yakıt enjeksiyon sistemlerinde yakıtın atomize edilerek püskürtülmesi gibi olaylar yüzey gerilimine bağlıdır. Ayrıca, yağlama sistemlerinde ince yağ filmlerinin oluşması ve malzeme yüzeylerinde sıvıların ıslanması, yüzey geriliminin etkili olduğu diğer alanlardır. Yüzey gerilimi fenomeninin kontrolü, akışkan dinamiği ve termodinamik gibi disiplinlerde mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir (Gennes et al. 2004).

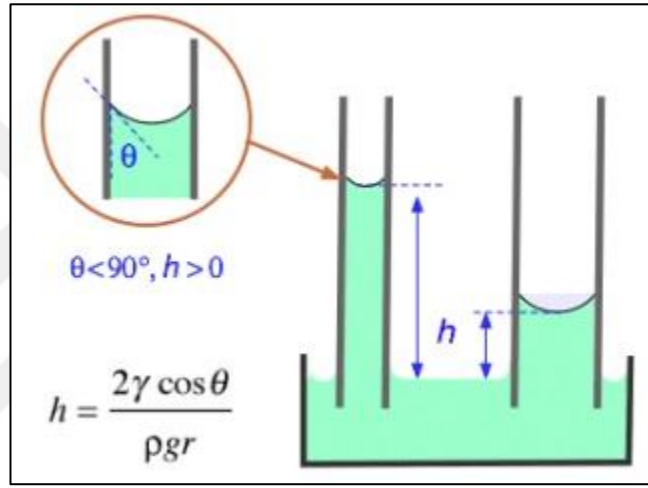


Şekil 1. 22. Yüzey gerilimine ait örnekler (Anonymous 2024k).

Yüzey geriliminin ilginç bir sonucu da sıvıya daldırılan küçük çaplı bir borudaki sıvı yükselmesi veya alçalması olarak bilinen kılcallık etkisidir (Çengel 2012). Kılcallık etkisi ya da kapilarite, bir bitkinin iletim sisteminde veya pürüzlü kâğıtla kolayca gözlemlenebilir. Kılcallık etkisi ayrıca suyun ağaçların tepesine yükselmesinde de önemli rol oynar (Çengel 2012). Bir sıvı ile başka bir maddenin moleküler seviyedeki çekiminin, sıvının kendi molekülleri arasındaki çekim kuvvetinden daha kuvvetli olması sonucunda meydana gelir. Bu etki sıvının dik bir yüzeye dokunduğu kısımda sıvı yüzeyinin menisküs denilen içbükey bir hâl almasına sebep olur. Aynı etki sünger gibi maddelerin suyu emmesinde de görülür (Batchelor 2000).

1. GİRİŞ

Kılcallığı gözlemlemek için en çok kullanılan deney düzeneği kılcal borulardır. Cam bir borunun, dikey vaziyette, su gibi bir sıvının içine batırılması sonucunda konkav bir menisküs oluşur. Yüzey gerilimi, sıvı kolonunu, yer çekimi ile moleküller arası kuvvetler dengeye gelene kadar yukarı çeker. Sıvı kolonunun ağırlığı borunun yarıçapının karesiyle, sıvı ve boru arasındaki temas uzaklığı borunun yarıçapıyla orantılı olduğundan dar bir boru, sıvıyı geniş bir borudan daha yukarı taşır. Bazı madde çiftlerinde, mesela cam ve cıva ikilisinde, atomlar arasındaki kuvvetler, sıvı ile katı arasındaki çekim kuvvetinden güçlüdür. Bu yüzden konveks bir menisküs oluşur ve kılcallık tersine işler (Batchelor 2000).



Şekil 1. 23. Kılcallık etkisi şematik gösterim (Anonymous 2024j).

Şekil 1.22’de gösterildiği gibi sıvı kolonunun yüksekliği h , Eşitlik (1.1)’de verilen formülle bulunur:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad (1.1)$$

Burada:

- γ sıvı yüzey gerilimi (J/m^2 ya da N/m)
- θ temas açısını
- ρ sıvının yoğunluğunu (kg/m^3)
- r tüpün yarıçapını (m)
- g yer çekimi ivmesini (m/s^2), belirtir.

1. GİRİŞ

Deniz seviyesinde, su ve cam boru kullanıldığında;

γ , 20 °C'de 0,0728 J/m²

θ , 20° (0,35 rad)

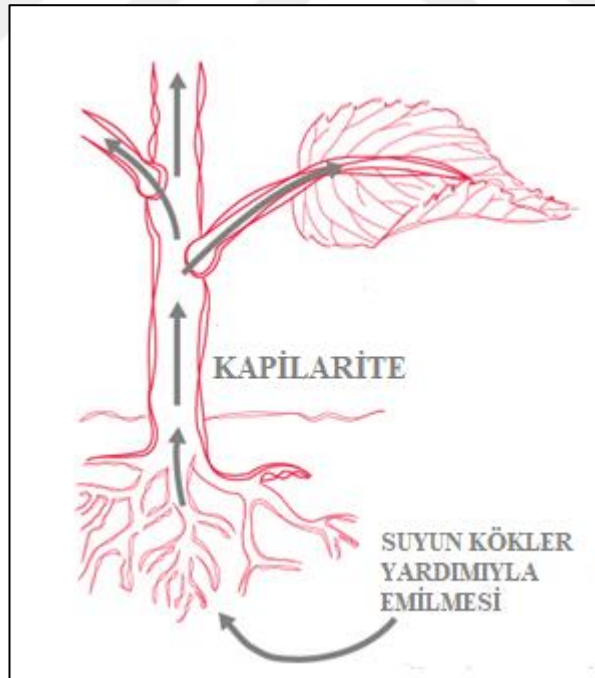
ρ , 1000 kg/m³

g , 9,8 m/s²'dir.

Bu veriler göz önüne alınarak h 'yi veren formül, Eşitlik (1.2)'de ki gibi düzenlenebilir.

$$h \approx \frac{1.4 \times 10^{-5}}{r} \quad (1.2)$$

Yani su, 2 metre çapında bir boruda, 0,014 mm gibi fark edilmeyecek bir birimde yükselirken, 2 cm çapındaki bir boruda sonuç 1,4 mm olmakta ve 0,2 mm çapındaki bir boruda ise su 140 mm yükselmektedir.



Şekil 1. 24. Ağaçlarda kapilar olay (Anonymous 2024m).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışması kapsamında SLM ile üretimi gerçekleştirilmiş poroz plakalar ve biyomimetik ağaç benzeri yapıların termal, yapısal ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Bu sebeple aşağıda başlıklar halinde verilen konulara yönelik literatür araştırması verilmiştir.

2.1. İmalat Sürecinde Kullanılan Toz Malzemeler ve SLM Üretim Parametrelerine Yönelik Çalışmaları

Aboulkhair et al. (2014), çalışmalarında AlSi10Mg alaşımından üretilen parçaların SLM sürecinde gözenekliliği azaltma amacıyla işlem parametrelerinin etkilerini derinlemesine incelemişlerdir. Çalışma, SLM işlemi sırasında oluşabilecek gözeneklerin kaynağını ve bu gözeneklerin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkilerini ele alarak, optimum işlem parametrelerini belirlemeyi hedeflemiştir. Araştırma kapsamında, farklı tarama hızları (200 mm/s ile 1600 mm/s arasında), lazer gücü (150 W ile 350 W arasında) ve katman kalınlıkları (30 µm ile 50 µm arasında) gibi parametreler test edilmiş ve tarama stratejilerinin gözenek oluşumuna etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre, yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızının, daha büyük eriyik havuzları oluşturarak gözenekliliği azalttığını göstermiştir. Ancak, çok yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızlarının, malzemedeki faz ayrışmalarına ve dolayısıyla mekanik özelliklerde bozulmalara yol açabileceği de tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, farklı tarama stratejilerinin (örneğin, çapraz tarama ve paralel tarama) gözenek dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmış ve çapraz tarama stratejisinin, homojen bir eriyik havuzu oluşturarak gözenekliliği en aza indirdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, %99,8'e varan yüksek yoğunluklu AlSi10Mg parçalar elde edilebilmiş, bu da bu alaşımın SLM yöntemiyle üretilmesinde ideal işlem parametrelerinin belirlenmesinin ne denli önemli olduğunu göstermiştir.

Pupo et al. (2015), yaptıkları çalışmalarında, SLM yöntemiyle CoCrMo alaşımından üretilen parçaların yüzey kalitesi üzerindeki işlem parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın amacı, SLM sırasında yüzey pürüzlülüğünü, katman

örtüşmesini ve genel yüzey kalitesini iyileştirmek için optimum işlem parametrelerini belirlemektir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğünün özellikle lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı tarafından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. En iyi yüzey kalitesi, 300-400 W lazer gücü ve 450-600 µm tarama aralığında elde edilmiştir. Ayrıca, lazer gücü arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ancak tarama hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Çalışma, katmanlar arasında uygun bir örtüşme sağlamak için tarama aralığının optimize edilmesi gerektiğini ve bu optimizasyonun yüzey kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, lazer gücünün ve tarama hızının doğru bir şekilde ayarlanmasının, elde edilen ürünün yüzey pürüzlülüğü ve genel kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Ali et al. (2018), çalışmalarında seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının artık gerilme ve mekanik özellikleri üzerindeki işleme parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, katman kalınlığı gibi parametrelerin değiştirilmesiyle artık gerilmenin ve mekanik özelliklerin nasıl etkilendiğini belirlenmiştir. Sonuç olarak, düşük lazer gücü ve uzun maruz kalma süresinin, soğuma hızını azaltarak daha düşük artık gerilmelere ve daha yüksek uzama yüzdesine yol açtığını göstermiştir. Katman kalınlığının artırılması, mekanik özelliklerin zararına da olsa artık gerilmeleri azaltmaktadır. Ayrıca, daha büyük katman kalınlıkları, daha büyük eriyik havuzu boyutlarına ve dolayısıyla daha düşük soğuma hızlarına yol açmıştır, bu da artık gerilmenin azalmasına katkıda bulunmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada, SLM ile üretilen Ti6Al4V numunelerinde kalıntı gerilmeleri ve mekanik özellikleri kontrol etmek için işlem parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Pragana et al. (2020) gerçekleştirdikleri çalışmalarında, seçici lazer ergitme (SLM) ile üretilen 316L paslanmaz çelik parçaların yoğunluğunu etkileyen proses parametrelerini incelemişlerdir. Çalışma, farklı proses parametrelerinin yoğunluk üzerindeki etkisini değerlendirerek, %99'un üzerinde yoğunluğa sahip parçalar üretmek için optimum bir parametre aralığı tanımlamayı amaçlamışlardır. Elde edilen sonuçlar, lazer gücü, tarama hızı, kayma mesafesi ve gaz atmosferi gibi parametrelerin parça yoğunluğu üzerindeki etkilerini göstermiştir. Özellikle, Azot atmosferinde yapılan

üretimlerde maksimum %99,87'lik bir yoğunluk elde edilmiş ve bu durum, lazer yeniden ergitme işlemi olmadan neredeyse tam yoğun parçalar üretmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

Ikeda et al. (2021) çalışmalarında, CoCrFeNiTi bazlı yüksek entropi alaşımının (HEA) seçici lazer ergitme (SLM) sürecinde işlem parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, lazer gücü ve tarama hızı gibi temel işlem parametreleri kullanılarak bir süreç haritası oluşturulmuş ve bu parametrelerin yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, optimum üretim parametreleri ile üretilen numuneler, %99,8'den daha yüksek bir bağıl yoğunluğa ulaşmıştır. Mikro yapısal analizler, numunelerin yapı yönünde anizotropi sergilediğini ve tanelerin büyüme yönlerinin, kullanılan enerji yoğunluğuna bağlı olarak yapı yönünde hizalandığını göstermiştir.

Eshkabilov et al. (2022) çalışmalarında, 316L paslanmaz çelik için seçici lazer ergitme (SLM) proses parametrelerinin optimizasyonunda makine öğreniminin uygulanmasını araştıran kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırma, SLM ile üretilen parçaların yoğunluğu, sertliği, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti gibi fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde işlem parametrelerinin etkilerini karakterize etmek için çeşitli makine öğrenimi algoritmalarını incelemiştir. 67 farklı literatür kaynağından elde edilen büyük veri setlerini kullanarak, işlem parametreleri ile parçaların nihai özellikleri arasındaki ilişkileri modelleyen altı farklı sınıflandırma modeli ve beş destek vektör makinesi regresyon modeli test edilmiştir. Sonuç olarak, makine öğrenimi algoritmalarının yüksek doğrulukla işlem parametrelerini optimize edebildiğini ve tahmin edilen değerlerin, üretilen 316L numunelerinin gerçek ölçümleri ile büyük bir uyum içinde olduğunu görülmüştür.

Xu et al. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmalarında, 316L paslanmaz çelikten yapılmış gözenekli kemik iskeletlerinin seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretimi sırasında yapısal ve proses parametrelerinin optimizasyonunu ele almışlardır. Çalışmanın ana amacı, kemik iskeletlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için hacim merkezli kübik yapının (HMK) üretimi sırasında ortaya çıkan artık gerilmeleri ve kusurları

minimize etmektir. Elde edilen bulgular, HMK yapıların optimum proses parametreleri kullanılarak üretildiğinde, kemik iskeletlerinin uzun vadeli işlevselliğini artırabileceğini göstermiştir.

Hsu et al. (2022), yaptıkları bu çalışmada, çeşitli proses parametreleri altında seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliğin mikro yapısını ve özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmada, lazer gücü, tarama hızı ve enerji yoğunluğu gibi işlem parametrelerinin 316L paslanmaz çelik numunelerinin performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. 190 W ile 325 W arasında değişen lazer gücü ve 1200 mm/s ile 3900 mm/s arasında değişen tarama hızları kullanılarak 28 farklı 316L numunesi üretilmiştir. Sonuçlar, 250 W lazer gücü ve 2400 mm/s tarama hızında en küçük gözeneklerin ($< 8 \mu\text{m}$) elde edildiğini ve bu koşullarda en yüksek bağıl yoğunluğun (%99.1) sağlandığını göstermiştir. Bu çalışma, 316L paslanmaz çelik bileşenlerinin SLM yöntemiyle üretiminde uygun işlem parametrelerinin seçilmesinin, malzemenin mekanik özelliklerini ve yoğunluğunu iyileştirebileceğini ortaya koymuştur.

Ahmed et al. (2022), çalışmalarında, 316L paslanmaz çelik için seçici lazer ergitme (SLM) proses parametre seçimi ve optimizasyonu üzerine kapsamlı bir derleme gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, lazer gücü, tarama hızı, kayma mesafesi ve katman kalınlığı gibi proses parametrelerinin, nihai parçaların kalitesini, mikro yapısını ve mekanik özelliklerini belirlemedeki rolünü vurgulamışlardır. Bu derleme çalışması, 316L numunelerinde yüksek yoğunluk ve optimum mikro yapı morfolojilerini elde etmenin zorluklarını ele almış; bunların mekanik özellikleri en üst düzeye çıkarmak ve gözeneklilik gibi kusurları en aza indirmek için hayati öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bu parametrelerin optimizasyonu için sayısal modelleme yaklaşımlarını da içeren çalışma, SLM süreci içindeki karmaşık etkileşimlerin parça kalitesini nasıl etkilediğine dair önemli bulgular sunmuştur. Sonuç olarak, 316L paslanmaz çeliğin SLM ile üretiminde istenen sonuçlara ulaşmak için proses parametrelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve optimize edilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Panahizadeh et al. (2022), yaptıkları çalışmalarında seçici lazer ergitme (SLM) sürecinde Ti6Al4V numunelerinin bağıl yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü için en uygun işlem parametrelerini belirlemek amacıyla çok amaçlı bir genetik algoritma (NSGA-II)

kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, lazer gücü, tarama hızı, kayma mesafesi, tarama açısı ve ısı işlemi sıcaklığı gibi parametrelerin bağıl yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, lazer gücü 102-105 watt, tarama hızı 623-630 mm/s, hat aralığı 73-76 μm ve ısı işlemi sıcaklığı 638-640°C aralıklarında en iyi bağıl yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılabilceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, özellikle havacılık ve tıbbi uygulamalar için karmaşık geometrilere sahip yüksek mukavemetli Ti6Al4V parçalarının üretiminde SLM sürecinin verimliliğini artırmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bartolomeu et al. (2022) yaptıkları bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının SLM yöntemiyle üretimi sırasında ortaya çıkan mekanik özelliklerini incelemektedirler. Çalışmada, işleme ve mikro yapısal parametrelerin nihai mekanik özellikler üzerindeki etkileri ele alınmıştır. SLM ile üretilen Ti6Al4V parçaların mikro yapısı, soğuma hızı ve lazer gücü gibi parametrelerin etkisi altında gelişir ve bu mikro yapısal özellikler, çekme mukavemeti, çekme gerilimi, yorulma direnci, sertlik ve aşınma performansı gibi nihai mekanik özellikleri belirler. Bu derleme çalışması, SLM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V parçaların geleneksel üretim yöntemleriyle (döküm veya dövme) üretilen parçalara kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ve daha düşük süneklik sergilediğini ortaya koymuştur. Ancak, SLM ile üretilen bu parçaların mekanik performansı için uygun işlem parametrelerinin seçimi son derece önemlidir. Ayrıca, çalışmada SLM ile üretilen Ti6Al4V parçalarındaki tipik hatalar (gözeneklilik, mikro çatlaklar vb.) ve bu hataların mekanik performans üzerindeki etkileri de ele alınmıştır.

Theeda et al. (2023) gerçekleştirdikleri çalışmalarında, SLM ile 316L paslanmaz çelik parçaların üretiminde işlem parametrelerinin optimizasyonunu amaçlamaktadır. Bu çalışmada, çoklu parça özelliklerini optimize etmek için tek bir yapay sinir ağı geliştirilmiştir. Model, lazer gücü, tarama hızı ve hat aralığı gibi parametreleri optimize ederek yüzey pürüzlülüğü, bağıl yoğunluk, mikro sertlik ve boyutsal doğruluk gibi özellikleri optimize etmeyi hedeflemektedir. Sonuç olarak, yapay sinir ağının, kullanıcı gereksinimlerini karşılayan işlem parametrelerini belirlemede yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir. Model, SLM sürecinde ön işleme süresini ve maliyetlerini önemli ölçüde azaltarak zaman ve kaynak tasarrufu sağlamaya katkı sunmaktadır.

Bu çalışmada, Miao et al. (2023), AlSi10Mg ve 316L paslanmaz çelikten yapılmış çok malzemeli parçaların SLM ile üretimi için işlem parametrelerini optimize etmek amacıyla makine öğrenimi yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada, farklı işlem parametrelerinde üretilen çok malzemeli numunelerin özellikleri ölçülmüş ve bu veriler, makine öğrenimi modeli ile tahmin ve doğrulama için kullanılmıştır. Tahmin edilen verilere dayanarak işlem parametre haritaları oluşturulmuş ve farklı kompozisyonlar için optimal işlem parametreleri bu haritalardan seçilmiştir. Sonuç olarak, lazer gücü, tarama hızı ve kayma mesafesinin numunelerin yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu görülmüştür.

Chepiga et al. (2023), çalışmalarında 316L paslanmaz çelik üretiminde SLM sürecini optimize etmek için çok amaçlı Bayesian optimizasyon algoritması kullanarak işlem parametrelerinin seçimini incelemiştir. Çalışmanın amacı, SLM sürecinde yüksek sertlik ve düşük gözeneklilik gibi istenen özelliklere sahip parçalar üretmek için en uygun işlem parametrelerini belirlemektir. Çalışmanın sonucunda, 58 W lazer gücü, 257 mm/s tarama hızı ve 45 µm kayma mesafesi gibi parametrelerin yüksek kaliteli parçalar üretmek için en uygun parametreler olduğunu göstermiştir. Üretilen parçaların sertliği 224–235 HV arasında değişirken, gözeneklilik %0,2–0,37 aralığında bulunmuştur. Bu yöntem, geleneksel deneme yanılma yöntemlerine göre deney sayısını önemli ölçüde azaltarak zaman ve kaynak tasarrufu sağlamaya katkı sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca, bu optimizasyon yaklaşımının, üretim sırasında ortaya çıkabilecek hataları en aza indirmede etkili olduğu ve yüksek kaliteli metal parçalar üretmede önemli bir adım olduğu sonucuna varılmıştır.

Dutt et al. (2023), 316L seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle işlem parametrelerini optimize etmek amacıyla Taguchi optimizasyon yöntemi kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı ve kayma mesafesi gibi kontrol edilebilir işlem parametreleri seçilmiş ve bu parametrelerin bağlı yoğunluk, çekme mukavemeti ve uzama üzerindeki etkileri incelenmiştir. Taguchi yöntemi ile yapılan sinyal-gürültü oranı (S/N) analizi, SLM süreci için en uygun işlem parametrelerini belirlemiş, tarama hızının bağlı yoğunluğu önemli ölçüde etkilediğini (42,38% katkı oranı) ortaya koymuştur. Lazer gücünün ise çekme mukavemeti (%31,17) ve uzama (%45,67) üzerinde daha yüksek bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Liu et al. (2023) bu çalışmalarında, SLM yöntemiyle üretilen CoCr alaşımlarının üretim parametrelerinin optimizasyonunu, lazer hacim enerji yoğunluğuna (VED) dayalı olarak araştırmaktadır. Çalışmada, lazer gücü ve tarama hızı gibi üretim parametrelerinin sıcaklık dağılımı, eriyik havuzu büyüklüğü, faz dönüşümü, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda; lazer gücü ve tarama hızı aynı lazer hacim enerji yoğunluğu altında artırıldığında, eriyik havuzunun en yüksek sıcaklığı ve soğuma hızı önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu, daha ince bir kristal yapı elde edilmesine katkıda sunmuştur. CoCr alaşımlarında γ -fazı (fcc) ve ϵ -fazı (hcp) gözlemlenmiştir. Soğuma hızı arttıkça, yüksek sıcaklıktaki γ -fazı korunmuş ve malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaratmıştır. Optimal lazer gücü ve tarama hızı kombinasyonu olarak 160 W ve 750 mm/s tespit edilmiştir. Bu koşullar altında üretilen numunelerde eriyik havuzları düzenli bir şekilde yerleşmiş ve malzemenin mikro sertliği ve mekanik dayanımı en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu bulgular, lazer hacim enerji yoğunluğunun işleme parametrelerini optimize etmek için tek başına yeterli olmadığını, diğer yöntemlerle birlikte kullanılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, lazer gücü ve tarama hızının malzeme özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve bu parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanmasının gerekli olduğu sonucuna varmışlardır.

Barrionuevo et al. (2024) yaptıkları çalışmalarında, SLM ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki işleme parametrelerinin etkisini incelemektedirler. Çalışmanın temel amacı, lazer gücü, tarama hızı ve kayma mesafesi gibi parametrelerin bağıl yoğunluk, mikro sertlik ve mikro yapı üzerindeki etkilerini anlamaktır. Sonuçlar incelendiğinde, tarama hızının yoğunlaşma ve mikro sertlik üzerinde en önemli istatistiksel etkiye sahip parametre olduğunu görülmüştür. Özellikle, maksimum yoğunlaşma (%99,7), yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı ile elde edilmiştir. Bununla birlikte, kayma mesafesinin bu özellikler üzerinde önemli bir etkisi olmadığı bulunmuştur. Çalışma, 316L paslanmaz çeliğin SLM ile üretiminde üretim parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini ve bunun nihai ürünün mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Bakhtiarian et al. (2024) yaptıkları çalışmalarında, 316L paslanmaz çeliğin seçici lazer ergitme (SLM) ile üretimi sırasında oluşan mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki işlem parametrelerinin etkilerini incelemektedir. Çalışmaya göre en iyi sonuçlar, 180 W lazer gücü, 1200 mm/s tarama hızı ve 0,03 mm katman kalınlığıyla elde edilmiştir; bu parametreler, 125 J/mm³ enerji yoğunluğu ve 220 HV sertlik değeri sağlamıştır. Çalışma, tarama hızının yoğunluk üzerindeki en önemli etkene sahip olduğunu (%45,51), ardından katman kalınlığı (%23,60) ve lazer gücünün (%27,49) geldiğini göstermektedir. Ayrıca, enerji yoğunluğu azaldıkça dar ve sık eriyik havuzları oluşmakta ve mikro çatlaklar ve ergime kusurları meydana gelmektedir. Çalışmanın sonuçları, tarama hızının sertlik üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğunu, lazer gücü ve katman kalınlığının daha az önemli olduğunu göstermiştir. Çalışma, 316L paslanmaz çeliğin SLM ile üretiminde en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesinin, malzemenin nihai özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve bu optimizasyonun, üretilen parçaların mekanik dayanıklılığını ve mikro yapısını iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır.

Mansoura et al. (2024) tarafından yapılan bu çalışma, seçici lazer eritme (SLM) işlemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliğin yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özellikleri üzerindeki işlem parametrelerinin etkilerini araştırmıştır. Çalışmanın ana amacı, lazer gücü, tarama hızı ve hat aralığı gibi parametrelerin malzeme özelliklerine olan etkilerini sistematik bir yaklaşımla optimize etmektir. Bu amaçla, Taguchi tasarımı ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak SLM işlemi optimize edilmiştir. Çalışmada, lazer gücü, tarama hızı ve hat aralığı giriş değişkenleri olarak seçilmiş ve her biri üç farklı seviyede test edilmiştir. Optik mikroskopi kullanılarak mikro yapı ve gözeneklilik analiz edilmiş; bağıl yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve çekme özellikleri gibi yanıt değişkenleri ölçülmüştür. Sonuçlar, yüksek yoğunluk seviyeleri (%99,97'ye kadar) ve mükemmel mekanik özellikler gösteren numuneler üretildiğini ortaya koymuştur. En yüksek çekme özellikleri, 170 W lazer gücü, 0,08 mm hat aralığı ve 1000 mm/s tarama hızında elde edilmiştir. ANOVA sonuçları, hat aralığının bağıl yoğunluk ve mekanik özellikler üzerinde en önemli parametre olduğunu göstermiştir. Tarama hızı ve hat aralığındaki artışın, düşük yoğunlaşma nedeniyle tüm özellikleri olumsuz etkilediği bulunmuştur. Artan lazer gücünün ise tozları daha iyi eriterek daha az gözeneklilik oluşturduğu ve böylece yüzey pürüzlülüğü ve süneklilik üzerinde olumlu bir etki sağladığı

2. KAYNAK ÖZETLERİ

gözlemlenmiştir. Bu çalışma, SLM ile 316L paslanmaz çelik üretiminde işlem parametrelerinin optimizasyonunun, malzeme kalitesini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Barrionuevo et al. (2024) tarafından hazırlanan (Çizelge 2.1) ve Ahmed et al. (2022) tarafından hazırlanan (Çizelge 2.2) derleme çalışmalarında, SLM ile üretimi gerçekleştirilmiş 316L malzemenin farklı üretim parametrelerine göre elde edilen bağlı yoğunluk değerlerine ait literatür özeti aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 2. 1. SLM ile üretilen 316L Tozunun Üretim Parametrelerine Göre Bağlı Yoğunluk Değişimini İçeren Literatür Özeti (Barrionuevo et al. 2024).

Güç (W)	Hız (mm/s)	Kayma Mesafesi (µm)	Katman Kalınlığı (µm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)	Makine/ Model	Bağlı Yoğunluk (%)	Kaynak
200	750-1000	50	110	35-50	-	97.97	Peng and Chen (2018)
120-160	800-1200	60-80	20-40	32-130	Concept Laser Mlab200	96.6	Perdomo et al. (2022)
150	400-800	40	80	60-120	Self-developed 500W	96.82	Lin et al. (2019)
80-100	300-1700	20	40-120	20-400	EP-M100T	98.77	Huang et al. (2019)
150-300	700-1300	20	60-120	36-350	FS271M	98.52	Deng et al. (2020)
100	111-250	50	110-120	66-400	SLM 125	96.00	Larimian et al. (2020)
150-200	446-1667	30	80-140	20-180	SLM 280HL	98.59	Tucho et al. (2018)
125-175	180-260	40	20-60	200-1200	RENISHAW AM 400	98.62	Ramirez-Cedillo et al. (2020)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2. 2 SLM ile üretilen 316L malzemede yüksek bağıl yoğunluk elde etmek için gerekli üretim parametreleri (Ahmed et al. 2022).

Yazar	Makine /Model	Toz Boyutu (μm)	Güç (W)	Hız (mm/s)	Kayma Mesafesi (μm)	Katman Kalınlığı (mm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)	Bağıl Yoğunluk (%)
Tucho et al. (2018)	SLM 280-HL	–	150	781	80	30	80	99.86
Yakout et al. (2019)	EOSIN T M280 SLM	75	250	800	100	40	78	98
Kamath et al. (2014)	Concept Laser M2	–	400	1900	105	30	67	99.5
Cherry et al. (2014)	Renisha w AM250	15–45	180	400	124	50	104.5	99.62
Liverani et al. (2017)	SISMA MYSIN T 100	–	150	700	70	20	153	99.9
Sun et al. (2016)	SLM 250 HL	–	380	2000	35	50	109	99.87
Shi et al. (2020)	AM400 Renisha w plc	5–41	400	125	240	250	53	99.99
Wang et al. (2012)	In-house Dimetal -280	25	150	300	60	35	238	98.5
Salman et al. (2019)	SLM 250 HL-SLM Solution	36	175	668	120	30	73	99.9
Yusuf et al. (2017)	Concept Laser M2 SLM	15–40	200	1600	–	50	–	99.18
Yasa et al. (2011)	Concept Laser M3	–	85	200	144	30	98	99.9
Krol et al. (2018)	Renisha w AM 125	15–45	125	480	10	50	174	99.95
Kurzyn-owski et al. (2018)	SLM Realizer II 250 (MPC-HEK)	20–63	200	220	–	50	–	99.8

Du et al. (2024) ortaya koydukları çalışmalarında, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerindeki işlem parametrelerinin optimizasyonunu incelemektedir. Araştırmanın temel amacı, lazer gücü, tarama hızı ve kayma mesafesi gibi parametrelerin Ti6Al4V numunelerinin kalitesi, bağıl yoğunluğu ve morfolojisi üzerindeki etkilerini belirlemek ve bu parametrelerin doğrusal enerji yoğunluğu ile olan ilişkisini araştırmaktır. Çalışmada, lazer gücünün 190-

250 W arasında, tarama hızının ise 600-720 mm/s arasında değiştiği koşullarda en yüksek bağıl yoğunluk değerlerine (%99,3) ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, doğrusal enerji yoğunluğu yüksek olduğunda numunelerde gözenekler ve diğer kusurların ortaya çıktığı, enerji yoğunluğu düşük olduğunda ise titanyum alaşımının yeterince erimediği ve bunun da şekillendirme sürecini zorlaştırdığı gözlemlenmiştir. Mekanik özellikler açısından, sertlik ve çekme mukavemeti testleri yapılmış ve en yüksek değerlerin sırasıyla 300 HV ve 1180 MPa olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, doğrusal enerji yoğunluğunun, eriyik havuzu morfolojisi ve numunelerin mekanik performansı üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu göstermektedir. Optimum lazer gücü ve tarama hızının belirlenmesiyle, numunelerin şekillendirme performansı iyileştirilmiş ve malzeme israfı azaltılmıştır.

Baskın and Yüce (2024) tarafından yapılan bu çalışma, SLM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki işlem parametrelerinin etkisini incelemektedir. Çalışmada, lazer gücü, tarama hızı, kayma mesafesi ve lazer vuruş açısı, çekme mukavemeti, darbe enerjisi, yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik seviyeleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, lazer gücünün çekme mukavemeti üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu ve lazer gücünün artışıyla birlikte çekme mukavemetinde artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Özellikle, 220 W lazer gücü, 900 mm/s tarama hızı ve 0.1 mm hat aralığı kullanıldığında en yüksek çekme mukavemeti olan 1161 MPa değerine ulaşılmıştır. Aynı zamanda, yüzey pürüzlülüğünün lazer gücü arttıkça azaldığı, ancak tarama hızı arttıkça arttığı belirlenmiştir. Gözeneklilik oranı en çok lazer gücü tarafından etkilenmiş olup, düşük lazer gücünde (160 W) % 0,48 gibi yüksek bir gözeneklilik oranı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, Ti6Al4V alaşımının SLM ile üretiminde, üretim parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini ve bu parametrelerin malzemenin mekanik performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgulamaktadır.

Agyapong et al. (2024) yaptıkları bu çalışmalarında, CoCrFeMnNi yüksek entropi alaşımının, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmesi sırasında işlem parametrelerinin mikro yapı ve kırılma tokluğu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın ana amacı, lazer gücü, tarama hızı ve enerji yoğunluğu gibi üretim parametrelerinin, mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamaktır. Bu çalışmanın sonucunda, SLM yöntemiyle üretilen CoCrFeMnNi alaşımının mikro yapısını

ve kırılma tokluğunu optimize etmek için üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiği görülmüştür. Bu bulgular, bu alaşımın çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanımı için potansiyel sunmaktadır.

Liu et al. (2024) yaptıkları bu çalışmada, SLM yöntemiyle üretilen CoCrNi orta entropi alaşımının, mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki lazer işleme parametrelerinin etkilerini sistematik olarak incelemektedir. Çalışmanın ana amacı, işleme parametrelerinin, özellikle lazer gücü ve tarama hızının, malzemenin yoğunluk, sertlik ve mekanik performans üzerindeki etkilerini optimize etmektir. Araştırma, lazer gücü ve tarama hızının bağıl yoğunluk, sertlik, mikro yapı ve çekme özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, 225 W lazer gücü ve 1000 mm/s tarama hızında %99,89 gibi yüksek bir bağıl yoğunluğa ulaşıldığını göstermiştir. Ancak, en yüksek bağıl yoğunluk değeri, en yüksek çekme mukavemeti ile örtüşmemiştir. Çekme testleri, lazer gücünün artmasıyla birlikte uzamada bir azalma olduğunu göstermiştir. Ayrıca, dislokasyon yapısının, akma dayanımının %50'sinden fazlasına katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, SLM sürecinin optimizasyonunda, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde ayarlanmasının önemini vurgulamaktadır.

Yukarıda özetlenen çalışmalar, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen ürünlerin kalitesinin, işlem parametrelerinin optimize edilmesiyle önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir. Lazer gücü, tarama hızı ve katman kalınlığı gibi parametrelerin doğru seçimi, malzemenin yoğunluğunu, mikro yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerin optimize edilmesi, daha yüksek yoğunluklu, dayanıklı ve yüksek kaliteli parçalar üretmek için kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, modern optimizasyon tekniklerinin, SLM sürecinin hızlandırılması ve üretim verimliliğinin artırılması konularında önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Genel olarak, bu çalışmalar, SLM yöntemindeki üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesinin ve optimize edilmesinin, istenen parça özelliklerinin elde edilmesinde belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

2.2. Terlemeli Soğutma Sistemlerinde Isı Transferi Çalışmaları

Gülhan and Braun (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yüksek hızdaki laminar ve türbülanslı hipersonik akışlarda terlemeli soğutma verimliliği incelenmektedir. Bu çalışmada, düşük termal iletkenliğe sahip PEEK malzemesinden yapılmış bir model kullanılmış ve gözenekli malzemeler ile soğutma sağlanmıştır. Deneylerde, iki farklı Reynolds sayısında hava, argon ve helyum gibi farklı soğutucu gazların soğutma verimliliği üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, helyumun aynı üfleme oranında diğer gazlara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek soğutma verimliliği sağladığını göstermektedir. Ancak, türbülanslı akışlarda terlemeli soğutmanın verimliliğinin laminar akışlara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, laminar akışlarda soğutma verimliliğinin daha homojen bir şekilde sağlanabilmesiyle açıklanmıştır. Sonuç olarak, farklı akış koşullarında terlemeli soğutmanın etkili bir şekilde kullanılabileceği, ancak bu etkinin akışın türbülanslı olup olmamasına bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceği belirtilmiştir.

Reimer et al. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise hipersonik uçuşlar sırasında ortaya çıkan aşırı ısı yüklerinin üstesinden gelmek için seramik matris kompozit (CMC) malzemelerin terlemeli soğutma yöntemiyle soğutulması incelenmektedir. Bu çalışma, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi tarafından geliştirilen SpaceLiner adlı konsept aracın kritik bölgelerinde (örneğin burun ve kanat ön kenarları) kullanılabilecek bir soğutma sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. SpaceLiner, yüksek hızda uzun mesafe yolcu taşımacılığı için tasarlanmış, hipersonik bir uzay aracı konseptidir. Çalışmada, SpaceLiner'in kritik bölgelerinde oluşan ısı yüklerinin, konvansiyonel ısı koruma sistemleriyle başa çıkılamayacak kadar yüksek olduğu ve bu nedenle aktif soğutma tekniklerinin gerekli olduğu vurgulanmıştır. Özellikle, küçük burun yarıçapları ve keskin kenarların aerodinamik performansı artırdığı ancak ısı yüklerini ciddi ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Terlemeli soğutma, bu tür aşırı koşullarda seramik yapıları kabul edilebilir sıcaklıklarda tutmak için bir çözüm olarak önerilmektedir. Sonuçlar, suyun terlemeli soğutma için etkili bir soğutucu olduğunu ve yüksek ısı akısı koşullarında bile seramik yüzeylerin sıcaklığını önemli ölçüde düşürebildiğini göstermiştir. Çalışma, hipersonik araçlar için terlemeli soğutmanın potansiyelini ortaya koyarken, bu teknolojinin

uygulanabilirliği konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır.

Zhao et al. (2014) ise sesüstü koşullarda burun konisi modeli kullanılarak terlemeli soğutma üzerine deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada hipersonik uçuş sırasında ortaya çıkan aerodinamik ısınmanın etkilerini azaltmak amacıyla terlemeli soğutma teknolojisinin etkinliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Burun konisi modelinin eşit olmayan kalınlıkta duvar yapısına sahip olması, soğutma etkisinin özellikle durma noktalarında daha etkili olmasını sağlamıştır. Deneylerde sıvı su soğutucu olarak kullanılmış ve burun konisinin yüzey sıcaklığı kızılötesi termal görüntüleme sistemi ile ölçülmüştür. Ayrıca, şok dalgası ve farklı bölgelerdeki soğutma etkinliği analiz edilmiştir. Düşük entalpili akış koşullarında burun konisinin yüzeyinde buz oluşumu gözlemlenmiş, ancak entalpi ve durma basıncı arttığında bu buz erimmiştir. Çalışmanın bulguları, terlemeli soğutmanın özellikle durma noktalarında etkin bir soğutma sağladığını göstermektedir. Ayrıca çalışma kapsamında şok dalgasının oluşumu ve soğutma etkileri de detaylı olarak ele alınmıştır.

Böhrk et al. (2014) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada ise hipersonik uçuşlarda terlemeli soğutma deneylerine dair bazı sonuçlar sunulmaktadır. Çalışmanın amacı, gözenekli bir seramik malzeme aracılığıyla bir soğutucu akışkanın yüzeyden geçişinin, yüksek entalpili ortamdan araca aktarılan ısıyı nasıl azaltabileceğini incelemektir. Deneyde, azot gazı soğutucu olarak kullanılmış ve panel yüzeyinde 87 K'lık bir maksimum sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. Aşağı akış bölgesinde ise, film soğutma etkisiyle sıcaklık 75 K kadar düşmüştür. Deney sonuçları, HEATS adlı yarı analitik bir araçla modellenmiş ve hesaplanan ısı akışları ile ölçülen sıcaklıklar arasında maksimum %14'lük bir sapma gözlemlenmiştir. Bu sonuçlarla HEATS modelinin terlemeli soğutma etkinliğini doğru bir şekilde tahmin edebildiği iddia edilmiştir. Ayrıca uçuş verileri, terlemeli soğutmanın atmosferik yeniden giriş sırasında etkili bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Bu bulguların yüksek ısı yüklerine maruz kalacak araçların tasarımında kullanılacak olan terlemeli soğutma sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

Huang et al. (2015) bir jet motorunda bulunan enjektörlerin aşırı aerodinamik ısınma koşullarında soğutulması için geliştirilen bir terlemeli soğutma yönteminin etkinliğini incelemektedirler. Çalışmada, gözenekli bir enjektör kullanılarak yapılan 60 saniyelik bir rüzgar tüneli testinde metan gazı soğutucu olarak seçilmiştir. Gözenekli yapı, metal enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiş ve yüksek erime sıcaklığına dayanabilen sinterlenmiş paslanmaz çelik parçacıklardan oluşmuştur. Deney sonuçlarına göre, yüzey sıcaklıkları, terlemeli soğutma sayesinde önemli ölçüde azaltılmıştır. Bununla birlikte, yapının üst kısmında bazı aşınmalar gözlemlenmiştir, bu da geometrinin daha da optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışma, jet motorları gibi hipersonik araçlarda kullanılan enjektörlerin termal koruması için terlemeli soğutmanın etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Huang et al. (2018) ise yüksek ısı akıllı yüzeylerin soğutulması amacıyla kendi kendine pompalamalı iç terlemeli soğutma yönteminin deneysel olarak incelendiği bir çalışma ortaya koymuşlardır. Çalışmanın amacı, maksimum $1,1 \text{ MW/m}^2$ ısı akısı altında, dış ortamla etkileşimi minimize eden ve karmaşık pompalama sistemlerine ihtiyaç duymadan etkin soğutma sağlayan bir sistem geliştirmektir. Deneylerde su soğutucusu ile gözenekli bir plaka yüzeyine herhangi bir pompa olmaksızın kendi kendine akış sağlanarak iç terlemeli soğutma gerçekleştirilmiştir. Isı akısı arttıkça, soğutucu kütle akış oranı otomatik olarak artmış ve gözenekli plaka yüzeyinin sıcaklığı 373 K civarında sabit kalmıştır. Bu özellik, sistemin kendini adapte edebilme kapasitesini ve dış ortam koşullarından bağımsız olarak stabil soğutma sağlayabilme yeteneğini göstermektedir. Çalışmada ayrıca, gözenekli plakadaki kanal çapının soğutma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiş ve daha küçük kanal çaplarının daha yüksek kritik ısı akılarına olanak tanıdığı belirtilmiştir. $50 \text{ }\mu\text{m}$ kanal çapına sahip gözenekli plakalar, $1,1 \text{ MW/m}^2$ ısı akısı altında yüzeyi etkili bir şekilde soğutabilmiştir.

Kılıç'ın (2018) gerçekleştirdiği çalışmada, gözenekli bir plaka üzerinden terlemeli soğutma yoluyla ısı transferinin sayısal olarak incelenmesine odaklanılmaktadır. Burada farklı Reynolds sayıları ($Re=3035, 3200, 3300, 3580$) ve su soğutucusu debilerinin ($0,000083, 0,000116, 0,000166, 0,000249 \text{ kg/s}$) yerel duvar sıcaklığı ve soğutma verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmakta olup, sonuçlar k - ϵ türbülans modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, Reynolds sayısının artmasının yüzey sıcaklığını

artırdığını ve gözenekli plakanın soğutma verimliliğini azalttığını göstermektedir. Örneğin, Reynolds sayısının 3035'ten 9430'a yükselmesi, sistemin verimliliğinde %13,7'lik bir düşüşe neden olmuştur. Öte yandan, su debisinin dokuz kat artırılması, yüzey sıcaklığında sadece %1,1'lik bir azalma sağlarken, gözenekli plakanın verimliliğinde %6,5'lik ve sistemin soğutma verimliliğinde %19,1'lik bir artışa yol açmıştır. Bu çalışma, özellikle havacılık ve savunma sanayi gibi yüksek ısı akısı ortamlarında, terlemeli soğutmanın etkinliğini artırmak için gözenekli plakaların kullanılabilirliğini vurgulamaktadır.

Kılıç (2019) bir diğer çalışmada ise, terlemeli soğutma yöntemiyle gözenekli bir plaka üzerinden gerçekleşen ısı transferini deneysel olarak incelemektedir. Sıcak gaz akışının Reynolds sayısı ve gözenekli plaka kanal çapının soğutma etkinliği üzerindeki etkilerini araştırılması çalışmanın temel amaçlarındandır. Yapılan deneylerde, sıcak gaz olarak hava ve soğutucu olarak su kullanılmıştır. Çalışmanın temel bulguları olarak, sıcak gaz akışının Reynolds sayısındaki %15,2'lik bir artış, soğutma sisteminin etkinliğinde %6,9'luk bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. Ayrıca gözenekli plaka kanal çapının azaltılması, yüzey sıcaklığında belirgin bir düşüşe ve soğutma etkinliğinde %12'lik bir artışa yol açmıştır. Bu bulgular, terlemeli soğutmanın, yüksek ısı akısı koşulları altında yüzeylerin etkin bir şekilde soğutulmasında önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Çalışma ayrıca, bu yöntemin optimizasyonu ile ilgili gelecekteki araştırmalar için önemli veriler sunmaktadır.

Cao et al. (2021) ise delik delme teknolojisi için geliştirilen kendi kendini soğutan bir matkap ucu tasarımı üzerine odaklanmışlardır. Çalışmanın temel amacı, delik delme sırasında matkap ucunun soğutulmasını sağlamak için terlemeli soğutma teknolojisini kullanmaktır. Matkap ucu, soğutucu odaları, kılcal borular ve terleme kanallarını içeren bir yapıya sahiptir. Bu yapı sayesinde, soğutucu sıvı matkap ucundaki deliklerden geçerek kesme ısını emmekte ve böylece matkap ucunun sıcaklığını azaltmaktadır. Çalışmada soğutma sisteminin etkinliğini değerlendirmek için sayısal simülasyonların da gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Simülasyon sonuçları, soğutucu akış hızının artmasının ve küçük boyutlu terleme kanallarının matkap ucu soğutmasında daha etkili olduğunu göstermiştir. Deneyler ise bu tasarımın matkap ucu sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğünü ve düşük bir seviyede koruduğunu ortaya koymuştur.

Han et al. (2024) heterojen gözenekli ortamlarda tepkimeye giren soğutucu kullanarak yapılan terlemeli soğutma sürecinin akış dağılımı ve soğutma performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışma kapsamında gözenekli ortamın mikro yapısının terlemeli soğutma performansı üzerindeki önemli etkileri incelenmiştir. Tepkimeye giren soğutucu kullanımı, soğutma verimliliğinde önemli bir artış sağlarken, akış dağılımında ise daha fazla düzensizlik gözlemlenmiştir. Gözeneklilik oranı %0,2'den %0,5'e yükseldiğinde, ortalama soğutma verimliliği %7,5 azalmıştır. Ayrıca, düşük ve orta üfleme oranları için gözenekliliğin terlemeli soğutma performansı üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Çalışmada, gözeneklilik değişiminin akış dağılımı ve soğutma performansı üzerindeki etkilerini optimize etmek amacıyla 6 farklı heterojen gözenekli yapıyı analiz edilmiş ve bu yapıların homojen gözenekli yapılara kıyasla daha iyi soğutma performansı sunduğunu belirtilmiştir. Bu çalışmanın bulguları, heterojen gözenekli ortamlarda tepkimeye giren soğutucu kullanarak yapılan terlemeli soğutma sürecine dair yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Yukarıda özetlenen çalışmalar, terlemeli soğutma sistemlerinin farklı uygulama alanlarında ve koşullarda etkin bir termal yönetim aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Terlemeli soğutma, hipersonik uçuşlar, jet motorları, delik delme teknolojileri ve yüksek ısı akıllı yüzeylerin korunması gibi kritik mühendislik uygulamalarında başarıyla test edilmiştir. Çalışmalar, kullanılan gözenekli yapıların, soğutucu tiplerinin ve akış koşullarının sistem performansı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu vurgulamaktadır. Örneğin, gözenekli plaka geometrisinin ve kanal çapının optimizasyonu, soğutma etkinliğini artırırken, türbülanslı akışlarda verimliliğin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, entalpi seviyeleri, Reynolds sayıları ve soğutucu türü gibi parametrelerin, terlemeli soğutma performansı üzerinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Genel olarak, bu yöntem, yüksek ısı yüklerinin etkin bir şekilde yönetilmesi için umut vaat eden bir teknoloji olarak öne çıkmakta, ancak daha geniş kapsamlı deneyler ve tasarım optimizasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

2.3. Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Bileşenlerde Isı Transferine Yönelik Çalışmalar

Kirsch and Thole (2018) tarafından yürütülen bir çalışmada, AM (eklemeli imalat) teknolojisinin sağladığı tasarım özgürlüğü kullanılarak optimize edilen dalgalı mikro kanalların deneysel olarak araştırılması ortaya konulmaktadır. Gaz türbini kanatçıklarının soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere dalgalı mikro kanalların geometrik olarak optimize edilmesi çalışmanın temel hedefi olarak gösterilmektedir. Bu optimizasyon, kanaldaki basınç kaybını en aza indirmek, kanal duvarlarındaki ısı transferini maksimize etmek ve ısı transferi ile basınç kaybı arasındaki oranı optimize etmek gibi üç temel hedefe dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, optimize edilen kanalların DMLS yöntemi kullanılarak başarıyla üretilebileceğini göstermektedir. Yapılan deneyler optimize edilen kanallarda basınç kaybının beklendiği gibi minimize edilemediğini, ancak ısı transferinin maksimize edilmesi hedefi doğrultusunda Nusselt sayısında önemli bir artış gözlemlendiğini göstermiştir. Bununla birlikte, optimize edilen geometrilerin yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması, basınç kaybı azaltılması hedefinin gerçekleştirilmesinde engelleyici bir faktör olmuştur. Bu çalışma, AM ve sayısal optimizasyon tekniklerinin bir araya gelmesiyle kompleks geometrik yapıların başarılı bir şekilde üretilebileceğini veya bu yapıların termal performansının artırılabilirliğini göstermektedir.

Min et al. (2018) yaptıkları çalışmalarında eklemeli imalat teknolojisini kullanarak ürettikleri terlemeli ve film soğutma yapılarının deneysel olarak incelenmesine odaklanmışlardır. Bu çalışmada Inconel 718 süper alaşımı kullanılarak beş farklı terlemeli soğutma yapısı ve bir adet de film soğutma yapısı SLS yöntemi ile üretilmiştir. Bu yapılar arasında, delikli plakalar, metal küre yığınları, metal tel örgüler ve kan damarı şeklinde tasarlanmış soğutma kanalları yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, terlemeli soğutma yapıların genel olarak film soğutma yapılarına göre daha yüksek soğutma etkinliği sağladığını göstermiştir. Özellikle, kan damarı şeklindeki terlemeli soğutma yapısının düşük, orta ve yüksek soğutucu enjeksiyon oranlarında (sırasıyla %1,2, %2,4 ve %3,6) sırasıyla 0,35, 0,5 ve 0,57 soğutma etkinliğine ulaştığı belirtilmiştir. Soğutma etkinliğini en çok etkileyen faktörün, terlemeli soğutma yapılarında iç katı-sıvı ara yüzey alanı oranı olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak

eklemeli imalat teknolojisinin karmaşık içyapıların üretiminde sunduğu olanaklar sayesinde terlemeli soğutmanın gaz türbini soğutma uygulamaları için umut vadeden bir alternatif olduğu vurgulanmıştır.

Huang et al. (2018) ise eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen bölmeli duvarlara sahip gözenekli plakalar için terlemeli soğutma performansının incelendiği bir çalışma ortaya koymaktadırlar. Burada SLM yöntemi kullanılarak metal gözenekli plakalar üretilmiş ve bu plakaların soğutma verimliliği ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Gözenekli plakalara eklenen bölme duvarlarının, mekanik dayanımı artırırken soğutma verimliliği üzerinde minimal bir etkiye sahip olduğu önemli bir sonuç olarak rapor edilmiştir. Ayrıca SLM ile üretilen gözenekli plakaların sinterlenmiş geleneksel gözenekli plakalara benzer bir soğutma verimliliği sağladığını ve %2 soğutucu üfleme oranında yaklaşık 0,7 soğutma verimliliğine ulaşıldığını belirlenmiştir. SLM ile üretilen gözenekli plakaların mekanik özelliklerinde, özellikle çekme dayanımında, sinterlenmiş malzemelere kıyasla %440 oranında bir iyileşme de sağlanmıştır. Bu bulgular, AM ve bölme duvarları kullanımının, terlemeli soğutma yapılarına hem mekanik dayanım kazandırabileceğini hem de soğutma verimliliğini koruyabileceğini göstermektedir.

Narendran et al. (2018) son yirmi yılda mikro kanal ısı alıcıları üzerinde yapılan araştırmaları gözden geçirerek, bu yapıların yüksek güçlü elektronik cihazların soğutulmasındaki rolü üzerine kapsamlı bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma, mikro kanalların farklı akış geometrilerinin, ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ele almaktadır. Bu çalışmada, mikro kanal soğutma sistemlerinin, özellikle 3D soğutma gereksinimlerini karşılamak için optimize edilmiş akışkan taşıma sistemleri ve etkili paketleme yöntemleri ile birlikte yüksek ısı yüklerini taşıma kapasitesine ulaştığı yönünde önemli bir çıkarım sunulmuştur. Ayrıca mikro kanal soğutma sistemlerinin performansını artırmak için yeni tasarım ve konfigürasyonlara duyulan ihtiyaç vurgulanmakta ve elektronik soğutma uygulamaları için daha yüksek ısı transfer verimliliği sağlayacak yenilikçi çözümler önerilmektedir. Ek olarak, mikro kanallarda çeşitli mikro yapılar ve dallanma yapılarının ısı transferini artırmak için kullanılabileceği ve bu yapıların performansının optimize edilebileceği ifade edilmektedir.

Calderon (2018) tarafından yürütülen bir başka çalışmada, eklemeli teknolojisiyle üretilen bir türbin bıçağı ön kenar segmentinin adyabatik film soğutma etkinliğini deneysel olarak incelenmiştir. Geleneksel film soğutma deliklerinin yerini alan ve gözenekli bölgeler içeren iki şerit kullanılarak terlemeli soğutmanın etkisi çalışma kapsamında simüle de edilmiştir. Araştırmanın amacı, terlemeli soğutmanın sağladığı daha homojen bir film ve daha yüksek adyabatik film soğutma etkinliğini değerlendirmektir. Deneylerde hava ana akış akışkanı, CO₂ ise ikincil akış akışkanı olarak kullanılmış ve basınç duyarlı boya tekniği ile analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, daha yüksek üfleme oranlarında daha yüksek film soğutma etkinliği sağlandığını, ancak bunun daha yüksek basınç düşüşü pahasına gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, deneysel sonuçlar, kararlı durum Reynolds Ortalama Navier-Stokes simülasyonları kullanılarak yapılan sayısal analizlerle de karşılaştırılmıştır.

Nafis et al. (2021) yılında yayımladıkları bir derleme makalede, eklemeli imalat teknolojilerinin soğutucu blok tasarımlarını optimize etme potansiyelini araştırmaktadırlar. Çalışma, elektronik soğutma uygulamalarında kullanılan 3D baskılı soğutucu blokların termal yönetim çözümlerini ele alarak, bu alandaki son gelişmeleri ve karşılaşılan zorlukları özetlemektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinin sağladığı tasarım özgürlüğü sayesinde, daha önce geleneksel yöntemlerle mümkün olmayan karmaşık geometrik yapıların üretilmesi ve bunların ısı transfer performansını artırma potansiyeli de ayrıca tartışılmıştır. Bununla birlikte, eklemeli imalat ile üretilen cihazların karşılaştığı sınırlamalar, özellikle malzeme çeşitliliğinin azlığı ve yüksek yüzey pürüzlülüğünün performans üzerindeki olumsuz etkileri gibi konular da ele alınmıştır. Sonuç olarak, gelecekteki ısı transferi çözümleri için eklemeli imalat ile üretilmiş ve optimize edilmiş yenilikçi tasarımlar önerilmiş ve bu teknolojinin potansiyelini ortaya konularak dikkate değer sonuçlar raporlanmıştır.

Xu et al. (2023) eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen gözenekli yapıların terlemeli soğutma sistemlerindeki kullanım prensiplerini ve bu alandaki son gelişmeleri kapsamlı bir şekilde inceledikleri bir çalışmayı ortaya koymuşlardır. Bu yapılar, modern hava ve uzay araçlarının yüksek hız, itki-ağırlık oranı ve manevra kabiliyeti gereksinimlerini karşılayabilmek için kritik öneme sahiptir. Araştırma, eklemeli imalat ile üretilen gözenekli yapıların termal performansı ve mekanik dayanımı üzerine

odaklanmaktadır. Gözenekli yapılar, SLM ve SLA gibi ileri eklemeli imalat teknikleri kullanılarak üretilmiş ve bu yapıların ısı transferi ile mukavemet performansları değerlendirilmiştir. Özellikle, eklemeli imalat teknolojisinin sağladığı mikro gözenekli yapılar, terlemeli soğutmanın ısı transfer performansını optimize etmek için kritik karakteristikler göstermiştir. Ayrıca, çalışmada tek fazlı ve kendi kendine pompalama gibi farklı soğutma rejimlerinde 3D baskılı gözenekli ortamların uygulamaları da incelenmiştir. Bu bağlamda eklemeli imalatın geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor ve karmaşık geometrik yapıların üretilmesine olanak sağladığı belirtilmiş ve bu şekilde soğutma performanslarının artırılacağı değerlendirilmiştir. Çalışmada, ayrıca gelecekteki eklemeli imalat destekli gözenekli yapıların terlemeli soğutma sistemlerindeki potansiyel kullanım alanları ve bu alanlardaki mevcut zorluklar ele alınmış, gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur. Bu sonuçlar, terlemeli soğutma sistemlerinin geliştirilmesinde eklemeli imalatın ne kadar önemli bir rol oynayabileceğini göstermekte ve bu teknolojinin sunduğu avantajların altını çizmektedir.

Zhang et al. (2023) ise çalışmalarında, eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen deterministik gözenekli yapıların, terlemeli soğutma uygulamalarındaki potansiyelini ele almaktadırlar. Çalışmanın amacı, eklemeli imalat ile üretilen bu yapıların terlemeli soğutma sistemlerinde nasıl optimize edilebileceğini anlamak olarak öne çıkarılmıştır. Bu doğrultuda, sayısal akışkanlar dinamiği simülasyonları kullanılarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünün ve geometrik sapmalarının akış dinamikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. İdeal geometri ile basılmış geometri arasında %14,8 oranında bir geçirgenlik farkı bulunmuş, bu farkın yüzey morfolojisinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Lattice Boltzmann metodu kullanılarak yapılan simülasyonlar, basılmış yapıların akış hızının ideal geometrilere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, eklemeli imalat süreci sırasında oluşan geometrik sapmaların sistem performansı üzerinde olumsuz etkileri olduğunu vurgulamakta ve bu sapmaların katmanlı üretim süreçlerinde dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir. Sonuçlar, eklemeli imalat ile üretilen yapılarının terlemeli soğutma sistemlerinde kullanımı için optimize edilebileceğine dair önemli ipuçları sunulmakta ve bu alandaki gelecekteki araştırmalara önemli katkılar sağlamaktadır.

Son dönemde gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada Poupinha et al. (2024) eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen gözenekli yapıların terlemeli soğutma performansını incelemektedirler. Araştırmanın ana amacı, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan gaz türbinleri ve roket motorları gibi sistemler için alternatif bir soğutma yöntemi olarak terlemeli soğutmayı değerlendirmektir. Çalışmada, eklemeli imalat ile üretilen gözenekli yapıların farklı kalınlıklarda ve üfleme oranlarında nasıl performans gösterdiği analiz edilmiştir. Deneyler sırasında termokromik sıvı kristaller kullanılarak film soğutma etkinliği ve ısı transfer katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Bu kristaller, yüzey sıcaklıklarını hassas bir şekilde ölçmek için kullanılmış ve gözenekli yapıların soğutma performansı bu yöntemle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, terlemeli soğutmanın, özellikle düşük üfleme oranlarında, geleneksel silindirik film soğutma deliklerine kıyasla çok daha yüksek bir soğutma etkinliği sağladığını göstermiştir. Bunun yanı sıra, eklemeli imalat süreci sırasında gözenekli yapıların üretim yönü ve eğim açılarının istenilen şekilde ayarlanamaması, akış alanında daha kaotik bir karışıma neden olmuş ve bu durum soğutma performansını olumsuz etkilemiştir. Özellikle, gözenekli yapıların üretiminde meydana gelen bu sapmalar, terlemeli soğutmanın verimliliğini azaltmıştır. Çalışma, bu tür yapıların üretim yönünün ve geometrik tasarımının optimize edilmesiyle, terlemeli soğutma performansının önemli ölçüde artırılabilirliğini ön görmektedir. Bu bulgular, eklemeli imalat teknolojisinin terlemeli soğutma uygulamalarında geniş bir potansiyele sahip olduğunu, ancak üretim süreçlerinde dikkat edilmesi gereken kritik faktörler bulunduğunu göstermektedir.

Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen bileşenlerin ısı transferi ve soğutma performansı üzerine yapılan çalışmalar, bu teknolojinin termal yönetim uygulamaları için sunduğu potansiyeli açıkça ortaya koymaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, eklemeli imalatın karmaşık geometrilerin tasarımına ve üretimine olanak sağladığını, bu sayede geleneksel yöntemlerin sınırlarının aşıldığını göstermektedir. Özellikle dalgalı mikro kanallar, terlemeli soğutma sistemleri ve gözenekli yapılar gibi yenilikçi çözümlerle ısı transferi artırılırken, mekanik dayanımın da optimize edilebildiği vurgulanmıştır. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğü, üretim sapmaları ve basınç kaybı gibi sorunlar, bu teknolojinin kullanımında dikkat edilmesi gereken zorluklar olarak öne çıkmaktadır. Eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü sayesinde yüksek performanslı soğutma çözümleri geliştirilmesi mümkün olsa da üretim süreçlerinin iyileştirilmesi ve

optimizasyonu gelecekteki araştırmaların odak noktası olmalıdır. Genel olarak, eklemeli imalat teknolojisinin, modern mühendislik uygulamalarında ısı transferi ve soğutma performansını artırma potansiyeline sahip olduğu, ancak bu alandaki mevcut teknik sınırlamaların (üretim parametreleri, sınırlı malzeme yelpazesi, vb.) göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husus olduğu göze çarpmaktadır.

2.4. Biyomimetik ve Ağaç Benzeri Yapılarda Akış ve Isı Transferi Çalışmaları

Mitropoulos 2009 yılında yaptığı çalışmasında, kapilaritenin temel ilkelerini ve mühendislikteki önemini ele almıştır. Kapilarite, sıvıların ince borularda yükselmesi veya düşmesi gibi olayları açıklar ve sıvı ile katı arasındaki kohezyon ve adezyon kuvvetlerine dayanır. Çalışmada, kapilaritenin matematiksel temelleri ve Young-Laplace denklemi kullanılarak sıvıların kılcal borularda nasıl davrandığını açıklamıştır. Çalışma, sıvının yüksekliğini etkileyen faktörleri (yoğunluk, yüzey gerilimi, boru çapı) inceler ve kapilarite olgusunun mühendislik ve bilimsel uygulamalardaki önemini vurgular.

Jiang et al. (2017) gerçekleştirdikleri bu çalışmada, biyomimetik (doğadan ilham alınan) kendinden pompalanan ve kendiliğinden uyarlanan bir terlemeli soğutma sistemini deneysel olarak incelemektedir. Bu sistem, yüksek ısı akısı yüzeylerini koruma amacıyla geliştirilmiş olup, pompa gerektirmeyen bir terlemeli soğutma süreci ile sıcak yüzeylerin etkin bir şekilde soğutulmasını sağlar. Araştırmada, ağaçların terlemeli soğutma sürecinden ilham alınarak, suyun tanktan 80 mm yüksekteki sıcak bir yüzeye, herhangi bir pompa kullanmadan, kendi kendine akışının sağlandığı bir sistem tasarlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, bu biyomimetik sistemin, alev sıcaklığı 1639 K ve ısı akısı 0,42 MW/m² olan bir ortamda, yüzey sıcaklığını 373 K civarında tutarak yüzeyin etkin bir şekilde soğutulduğunu göstermektedir. Ayrıca, soğutma verimliliği %94,5'e ulaşmıştır. Bu sistem, alevin ısı akısı arttıkça, soğutucu kütle akış hızını otomatik olarak artırarak yüzey sıcaklığını sabit tutma yeteneğine sahiptir. Bu araştırma, biyomimetik terlemeli soğutma sistemlerinin, yüksek ısı akılı yüzeylerin korunmasında potansiyel olarak etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Ek olarak, sistemin basitliği ve otomatik uyum sağlama kabiliyeti, bu tür soğutma yöntemlerinin havacılık ve uzay uygulamaları gibi zorlu ortamlar için uygun olduğunu göstermektedir.

Huang et al. (2019) gerçekleştirdikleri bu çalışmada, eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen, ağaç benzeri mikro kanallara sahip gözenekli bir modülün biyomimetik kendinden pompalanan terlemeli soğutma sistemini incelemektedir. Çalışmada, Inconel 718 metal alaşımı kullanılarak seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen bu gözenekli modülün soğutma performansı deneysel olarak test edilmiştir. Bu sistem, herhangi bir pompa veya kontrol sistemi olmadan, soğutucu suyun su tankından 90 mm yükseklikteki ısıtılmış yüzeye otomatik olarak akmasını sağlamaktadır. Deneyler, suyun bu gözenekli modül aracılığıyla mikro delik katmanına çekildiğini ve buharlaşarak yüzeyi etkin bir şekilde soğuttuğunu göstermiştir. Araştırmada, ısı akısı arttıkça soğutucu kütle akış hızının kendiliğinden arttığı ve böylece mikro delik katmanının sıcaklığının yaklaşık 373 K'de sabit kaldığı tespit edilmiştir. Sistem, farklı ısı akısı ve eğim açıları da stabil bir şekilde çalışmıştır. Özellikle, modülün çeşitli açılarda (0°, 45°, 90°, 135° ve 180°) test edilmesi, eğim açısının soğutma performansı üzerinde yalnızca çok az bir etki yarattığını ortaya koymuştur. Ayrıca, ağaç benzeri mikro kanalların kapılar kuvvet sağlama ve sıvının akışını düşük dirençle yönlendirme kabiliyeti, geleneksel sinterlenmiş gözenekli medyaların zayıf yönlerini gidermektedir. Bu özellikler, biyomimetik terlemeli soğutma sisteminin, yüksek sıcaklık bileşenlerinin soğutulmasında potansiyel bir çözüm olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Huang et al. (2019) gerçekleştirdikleri bu çalışmayla, sinterlenmiş gözenekli plakalar için faz değişimiyle kendinden pompalanan terlemeli soğutma sistemini deneysel olarak incelemektedir. Çalışma, yüksek sıcaklıklarda çalışan yüzeyler için etkin bir soğutma yöntemi olarak kendinden pompalanan terlemeli soğutmanın uygulanabilirliğini araştırmaktadır. Bu sistem, sıvı suyun su tankından herhangi bir pompa kullanmadan ısıtılmış gözenekli yüzeye otomatik ve sürekli olarak akmasını sağlamakta ve yüzeyde buharlaşarak büyük miktarda ısıyı dağıtmaktadır. Deneyler, sistemin sabit olduğunu ve yüzey sıcaklığını yaklaşık 373 K'de tutarak homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığını göstermiştir. Çalışmada, sinterlenmiş gözenekli plakaların partikül çapının soğutma performansı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Küçük gözenekli plakalarda sistem daha kararlı bulunmuş, ancak partikül çapı arttıkça sistemin kararlılığı azalmıştır. Özellikle, 600 µm çapındaki partiküllerle yapılan deneylerde, gözenekli yapının yeterli kılcal kuvvet üretememesi nedeniyle sistem başarısız olmuş ve yüzey sıcaklığının kontrol edilemez hale geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, akış hızındaki ve sıcaklıktaki değişikliklere

sistemin otomatik olarak hızlı bir şekilde yanıt verdiği, böylece gözenekli yüzeyin sıcaklığının sabit kaldığı tespit edilmiştir. Bu araştırma, kendinden pompalanan terlemeli soğutma sistemlerinin yüksek sıcaklık bileşenlerinin korunmasında potansiyel bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Çalışma, ayrıca, bu tür sistemlerin daha geniş alanlara uygulanabilmesi için partikül boyutlarının optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Huang et al. (2020) gerçekleştirdikleri bu çalışmayla, kendinden pompalanan bir terlemeli soğutma sisteminin performansını, özellikle koruyucu gözenekli bir zırh ile donatıldığında, derinlemesine incelemektedir. Bu yenilikçi soğutma sistemi, yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen ve herhangi bir pompa veya harici güç kaynağı gerektirmeyen bir tasarıma sahiptir. Çalışma, sistemin, özellikle hipersonik uçuşlar ve uzay giriş araçları gibi aşırı termal yüklerin bulunduğu ortamlar için nasıl optimize edilebileceğini araştırmaktadır. Araştırmada, sinterlenmiş gözenekli plaka ve koruyucu gözenekli zırhın kombinasyonu, soğutma sisteminin verimliliğini artıran kritik bir bileşen olarak ele alınmıştır. Koruyucu zırh, sinterlenmiş gözenekli plakayı koruyarak, suyun kılcal kuvvetlerle yüzeye çekilmesini sağlar ve bu da yüzey sıcaklığını etkili bir şekilde kontrol altında tutar. Gözenekli zırhın, dış yüzeydeki olası tıkanıklıklara rağmen soğutma etkinliğini koruduğu ve bu durumun, sistemin güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. Deneysel sonuçlar, koruyucu zırhın varlığında soğutucu akış hızının yaklaşık %39 oranında azaldığını, ancak buna rağmen sistemin soğutma verimliliğinin arttığını göstermektedir. Bu durum, gözenekli zırhın, sinterlenmiş gözenekli plakayı aşırı termal yüklerden korurken, aynı zamanda suyun yüzeye taşınmasını optimize eden bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, sistem, çevresel koşullardaki değişikliklere otomatik olarak uyum sağlayabilmekte ve böylece herhangi bir harici kontrol sistemine gerek kalmadan optimum soğutma performansı sunmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, özellikle hipersonik uçuşlar, roket motorları ve uzay araçlarının burun konileri gibi aşırı termal yüklerin bulunduğu ortamlarda, kendinden pompalanan terlemeli soğutma sistemlerinin kullanılabilirliğini desteklemektedir. Çalışma, bu tür sistemlerin, yüksek sıcaklık uygulamaları için hem etkin bir soğutma çözümü sunduğunu hem de güvenilirlik açısından önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır. Gelecekteki araştırmaların, bu tür sistemlerin performansını daha da artırmak için malzeme bilimi ve üretim teknikleri üzerinde odaklanması gerektiği önerilmektedir.

Huang et al. (2020) gerçekleştirdikleri bu çalışmada, biyomimetik yüzeyler kullanarak terlemeli soğutma verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Çalışma, özellikle aşırı yüksek sıcaklık ortamlarında bileşenleri ablasyondan koruma potansiyeli taşıyan terlemeli soğutma yöntemini incelemektedir. Araştırma, doğadaki canlıların uzun evrim süreçleri boyunca geliştirdiği optimal özelliklerden esinlenerek, solucanın pürüzlü cildinden ilham alan biyomimetik bir yüzey kullanmayı önermektedir. Bu yeni yüzey tasarımı, terlemeli soğutma verimliliğini artırmak amacıyla isosceles-trapez, dik açılı trapez ve paralelkenar oluklar içeren üç farklı biyomimetik yüzeyle sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal model, deneysel verilerle doğrulanmış olup, biyomimetik yüzeylerin terlemeli soğutma üzerindeki etkisini ayrıntılı bir şekilde analiz etmektedir. Çalışmanın bulgularına göre, biyomimetik yüzeylerin yapısı, terlemeli soğutma sırasında koruyucu film tabakasının kalınlığını ve yüzey ısı taşınım yoğunluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle paralelkenar biçimli pürüzlü yüzey, koruyucu film tabakasının kalınlığını %22,7 oranında artırarak, soğutma verimliliğini %12 oranında iyileştirmiştir. Bu yüzey tasarımı, sıcak ana akıştan yüzeye olan ısı transferini azaltarak, koruyucu filmin kalınlığını artırmış ve bu sayede soğutma performansını kayda değer ölçüde yükseltmiştir. Sonuç olarak, biyomimetik pürüzlü yüzeyler, terlemeli soğutma sistemlerinin verimliliğini artırmada etkili bir yaklaşım sunmakta olup, bu yaklaşımın optimize edilmesi durumunda yüksek sıcaklık uygulamaları için önemli avantajlar sağlayabileceği vurgulanmıştır.

Zhou et al. (2020) gerçekleştirdikleri bu çalışmada, biyomimetik kendinden pompalanan ve ölçeklenebilir bir sis toplama sistemini incelemektedir. Çalışmanın ana hedefi, kuru bölgelerde su kıtlığını hafifletmek için verimli ve sürdürülebilir bir su toplama yöntemi sunmaktır. Bu amaçla, doğal asimetric ıslanabilirlikten esinlenerek, delikli bir lotus yaprağının birleştirdiği tek yönlü sıvı hareketine dayanan bir sis toplayıcı geliştirilmiştir. Bu toplayıcı, rüzgar tarafından döndürülen bir yapıya sahip olup, sis damlacıklarını verimli bir şekilde toplar ve bu suyun buharlaşmasını minimize ederek uzun süreli depolama sağlar. Toplayıcı, süperhidrofobik bir dış yüzey, diod benzeri mikro delik dizisi ve hidrofil iç yüzey gibi birkaç ana yapıdan oluşmaktadır. Bu yapılar bir araya gelerek, sis damlacıklarının etkin bir şekilde toplanmasını ve düşük buharlaşma oranıyla uzun süre depolanmasını mümkün kılmaktadır. Teorik modellemeler ve deneysel analizlerle desteklenen çalışma, sisle yüklü rüzgar alanlarında toplayıcının 1 m/s hızında

dönmesi durumunda sis toplama oranının %49 oranında arttığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, gerçek çevre koşullarında yüksek verimli sis toplayıcılar tasarlamak için yeni bir yaklaşım sunmakta ve mevcut sis toplayıcıların optimizasyonu için stratejiler geliştirmektedir.

Ho et al. (2021) gerçekleştirdikleri bu çalışmayla, faz değişim malzemesi (PCM) ile doldurulmuş ve topoloji optimizasyonu ile geliştirilmiş ağaç benzeri bir yapıya sahip ısı bataryalarının deneysel incelemesini ele almaktadır. Çalışmanın amacı, elektronik soğutma için kullanılan bu tür ısı bataryalarının termal performansını iyileştirmektir. Çalışmada, seçici lazer eritme (SLM) tekniği kullanılarak üretilen bu ağaç benzeri yapıların, geleneksel fin yapılarıyla karşılaştırıldığında nasıl performans gösterdiği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, topoloji optimizasyonu ile geliştirilmiş ağaç benzeri yapıların, duvar sıcaklıklarını yaklaşık 4 °C düşürdüğünü ve fin yapısına göre %13 oranında daha uzun çalışma süresi sağladığını göstermiştir. Bu iyileştirilmiş performans, ağaç benzeri yapıların, ısıyı konsantre ısı kaynağından faz değişim malzemesine daha verimli bir şekilde yaymasına bağlanmıştır.

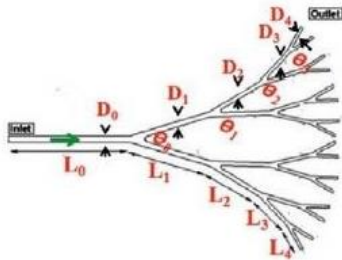
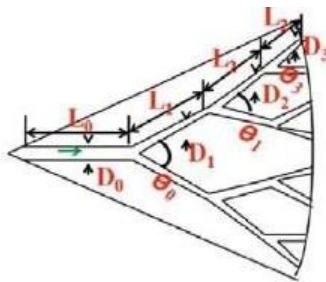
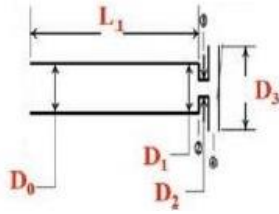
Hu et al. (2021) bu çalışmada, karmaşık mikro gözenekli yapılara sahip kaya matrislerinde gaz taşınımı ve ısı transferini anlamaya yönelik yeni modeller geliştirmektedirler. Özellikle, kaya gazı rezervuarlarında sıklıkla karşılaşılan dallanmış fraktal ağaç benzeri mikro gözenek ağlarının, geçirgenlik ve termal iletkenlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada geliştirilen geçirgenlik modeli, geleneksel modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Bu model, kaya matrisindeki gözenek ağlarının yapısal özelliklerini dikkate alarak, gaz taşınımının nasıl gerçekleştiğini daha iyi açıklamaktadır. Gözenek ağlarının dallanma seviyesi, uzunluk oranı ve çap oranı gibi yapısal parametrelerin hem geçirgenlik hem de termal iletkenlik üzerinde kritik etkiler yarattığı ortaya konmuştur. Özellikle, daha yüksek dallanma seviyelerinin ve uygun uzunluk/çap oranlarının, gaz akışını ve ısı transferini optimize ettiği bulunmuştur. Bununla birlikte, dallanma açısının geçirgenlik ve termal iletkenlik üzerindeki etkisinin nispeten önemsiz olduğu belirlenmiştir. Araştırma, kaya gazı rezervuarlarının verimli bir şekilde işletilmesi için önemli çıkarımlara sahiptir. Özellikle, geliştirilen model, kaya matrisindeki karmaşık gözenekli yapılar ve bu yapıların gaz taşınımı ve ısı transferi üzerindeki etkileri hakkında daha doğru tahminler sunarak, rezervuar mühendisliği ve gaz

2. KAYNAK ÖZETLERİ

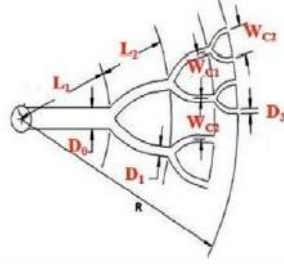
çıkarma süreçlerinde kullanılabilecek bir araç olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, çalışma, kaya matrislerindeki mikro gözenekli yapıların daha iyi anlaşılması ve bu bilgilerin rezervuar yönetimi için uygulanması konusunda yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Narendran et al. (2018), tarafından hazırlanan (Çizelge 2.3) derleme çalışmasında, biyomimetik ağaç benzeri yapılardaki dallanma açıları ile basınç değişimini gösteren özet literatür tablosu sunulmuştur.

Çizelge 2. 3 Fraktal Yapılardaki Mikrokanallara ait çalışmaların özeti (Narendran et al. 2018).

Kaynak	Hesaplama Alanları	Bulgular
Ghaedamini et al. (2011)		Fraktal ağaç yapısında, 30° dallanma açısı için düşük basınç düşüşü geliştirilmiş. Yüksek dallanma seviyelerine sahip kanallarda basınç düşüşü 180°'de daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.
Xu et al. (2015)		Fraktal ağaç modelinde, 10-20 Hz arasında titreşimli akış için daha iyi ısı transferi sağladığı görülmüş. Titreşimli akış 30-40 Hz'e çıkarıldığında, ısı transferi %40 artmış. Sabit ve titreşimli akış arasında çok az fark bulunduğu görülmüş.
Daniels et al. (2011)		Fraktal mikro kanallarda, 20-90 kPa arasında basınç düşüşü geliştirilmiş. Maksimum 225 g/dk debi ölçülmüş ve boşluk oranları %0,3-0,9 arasında gözlemlenmiştir.

Heymann et
al. (2010)



Optimize metotlar kullanılarak pompalama gücü azaltılmıştır.

Farklı ısı akışlarında düşük dallanma önerilmiştir.

Yukarıdaki çalışmalardan özetle, biyomimetik soğutma sistemleri, doğadaki doğal süreçlerden ilham alarak yüksek verimli ve sürdürülebilir soğutma çözümleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu sistemlerde, özellikle sıvı hareketi ve ısı transferi süreçlerinin optimize edilmesi, kapilarite, terlemeli soğutma ve faz değişimi gibi temel fiziksel prensipler üzerine odaklanılmaktadır. Kendi kendine pompalama (self-pumping) yapan sistemler, sıvıların düşük enerji tüketimiyle doğal yollarla hareket etmesini sağlarken, biyomimetik yüzey tasarımları da ısı transferini iyileştirmek ve soğutma verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır. Bu yöntemler, yüksek ısı akışlarının yönetilmesi, mikro yapılarla verimlilik sağlanması ve çevresel koşullara otomatik uyum sağlanması gibi özellikler sunarak, özellikle havacılık, uzay ve elektronik soğutma gibi zorlu alanlarda önemli potansiyel taşımaktadır.

Yapılan çalışmalar, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi, terlemeli soğutma sistemleri, eklemeli imalat teknolojisi ve biyomimetik soğutma çözümlerinin termal yönetim açısından sunduğu potansiyeli kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. SLM yöntemiyle üretilen malzemelerde lazer gücü, tarama hızı ve katman kalınlığı gibi parametrelerin optimizasyonu, malzeme yoğunluğu ve mekanik dayanımı açısından kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Terlemeli soğutma sistemleri, hipersonik uçuşlardan jet motorlarına kadar geniş bir uygulama alanında yüksek ısı yüklerinin yönetiminde etkin bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Eklemeli imalat, karmaşık geometriye sahip soğutma çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanıırken, üretim sürecinde yüzey pürüzlülüğü ve basınç kaybı gibi zorlukların dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Biyomimetik soğutma yaklaşımları ise doğadan ilham alarak enerji verimli ve sürdürülebilir çözümler sunmakta, özellikle mikro yapılar ve faz değişimi süreçleri ile soğutma etkinliğini artırmaktadır.

Bu tez çalışması, SLM yöntemiyle üretilen poroz plaka numunelerin yapısal ve termal özelliklerini analiz ederek, üretim parametrelerinin malzeme performansına etkisini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, biyomimetik ağaç benzeri mikrokanallar içeren soğutucuların terlemeli soğutma performansları incelenmiş ve bu yapıların termal etkinliğini artıran geometrik faktörler belirlenmiştir. Yapılan deneyler, 316L tozundan üretilen biyomimetik ağaç benzeri yapılar arasında en iyi performansı, belirli bir kanal çapı, dallanma oranı ve kopyalama mesafesine sahip numunenin gösterdiğini ortaya koymuştur. Literatürde, eklemeli imalatla üretilen biyomimetik ağaç benzeri soğutucuların terlemeli soğutma mekanizmasıyla ısı transferi performansının detaylı olarak incelendiği çalışmalar sınırlıdır. Bu sebeple çalışmamız, hem SLM yöntemiyle üretilen poroz plakaların termal ve mekanik performansına dair kapsamlı bir analiz sunarak hem de biyomimetik ağaç benzeri yapıların terlemeli soğutma açısından değerlendirilmesiyle literatürdeki bu eksikliği kapatmayı amaçlamaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, iki aşamalı üretim yapılmış olup ilk aşamada poroz plakalar ikinci aşamada ağaç benzeri yapı numuneler üretilmiştir. Tasarlanan poroz plaka numuneler prizmatik geometrilerde üretilmiştir. Prizmatik numunelerin boyutları 30×30×7.5 mm olarak seçilmiştir (S1-S2-S3). Ağaç benzeri yapı olarak üretilen numunelerin boyutları ise N1-N2-N5-N6 nolu numuneler için 30×39×39 mm ve N3-N4-N7-N8 nolu numuneler için 30x30x30 mm olarak seçilmiştir. Poroz plaka numune üretimleri, 316L, CoCrW ve Ti6Al4V alaşımlarından oluşan üç farklı malzeme grubu ile, ağaç benzeri yapı numunelerin üretimleri ise 316L alaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen alaşımlar, Concept Laser firmasından metal tozları olarak temin edilmiştir. Bu metal tozlarının kimyasal bileşimleri, partikül şekilleri ve boyutları Çizelge 3.1.'de sunulmuştur.

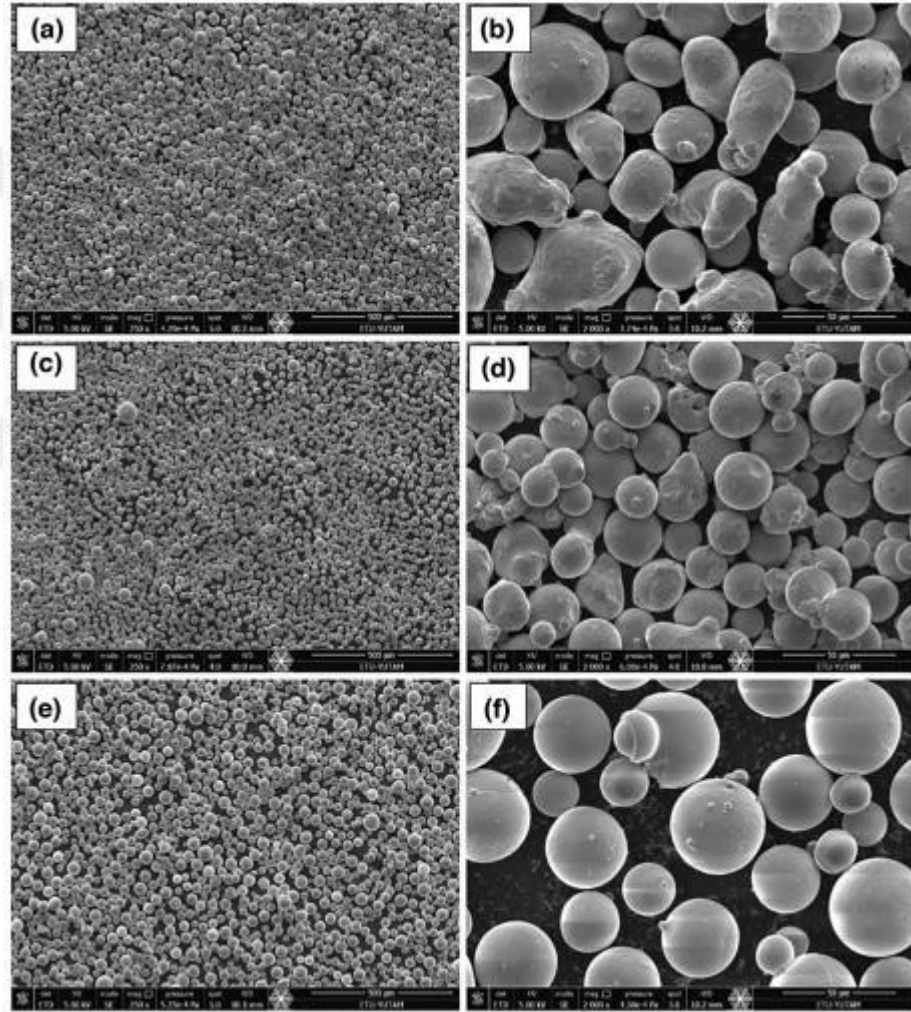
316L'nin ağaç benzeri yapıların üretim malzemesi olarak seçilmesi, ısı ve akış uygulamalarında yüksek korozyon direncine sahip malzemelere duyulan gereksinim ve nispeten düşük malzeme maliyeti ile ilişkilidir (Shieu et al. 1998). Ayrıca, CoCrW ve Ti6Al4V ise havacılık endüstrisi ve uzay araçlarında sıkça kullanıldıkları için seçilmiştir. Bu malzemeler, bu tür uygulamalar için yenilikçi ısı transfer bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır (Huang et al 2019).

Çizelge 3. 1. 316L, CoCrW ve Ti6Al4V tozlarının kimyasal bileşimi ve geometrik yapıları

316L	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S
Bileşim (wt%)	Bal.	16.5-18.5	10-13	2-2.5	0-2	0-1	0-0.045	0-0.03	0-0.03
Küresel 20-80 µm									
CoCrW	Co	Cr	W	Si	Mn	C	N	Fe	
Bileşim (wt%)	Bal.	28	9	1.5	≤0.01	≤0.05	≤0.002	≤0.05	
Küresel 20-45 µm									
Ti6Al4V	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H	
Bileşim (wt%)	Bal.	5.5-6.7	3.5-4.5	<30	<20	<0.08	<0.05	<0.015	
Küresel 20-45 µm									

Şekil 3.1'de, farklı büyütmelerdeki metal tozlarının SEM görüntüleri sunulmuştur.

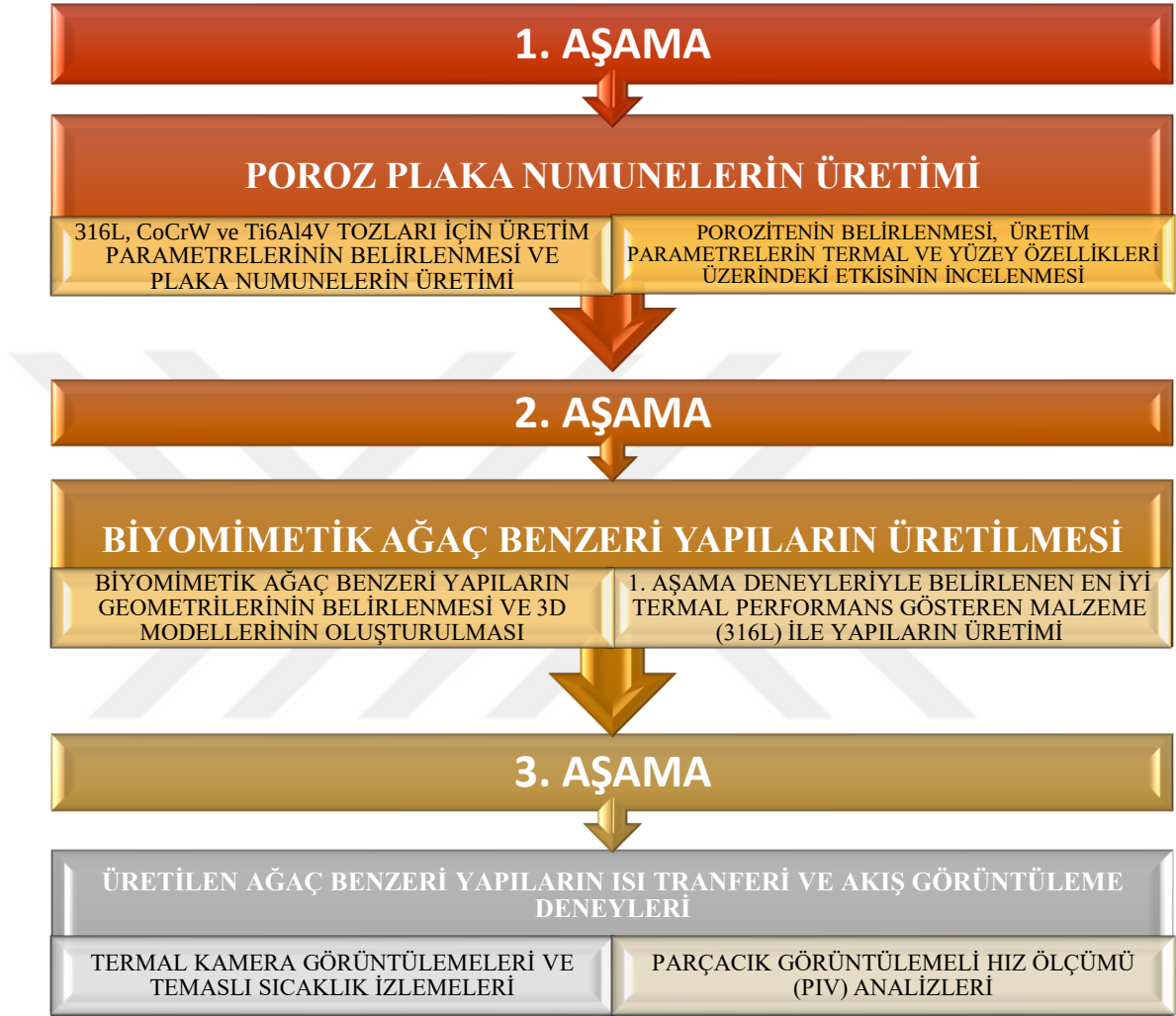
SLM süreci sırasında, tozların başarılı malzeme birikimi ve parça birleştirilmesi için yüksek akışkanlık ve paket yoğunluğu göstermesi arzu edilir. Mevcut tozlar arasında, gerekli özelliklere sahip oldukları için küresel parçacıklar en uygun seçimdir. Bu nedenle, SLM üretiminde, küresel geometriye sahip parçacıklar sıklıkla tercih edilmektedir (Tan et al. 2017). Şekil incelendiğinde, üç metal tozunun da küresel toz geometrisine ve tekdüze bir parçacık boyut dağılımına sahip olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 3. 1. Metal Tozların SEM Görüntüleri (250x ve 2000x Büyütme) (a), (b) 316L, (c), (d) CoCrW, (e), (f) Ti6Al4V (Mandev et al. 2024).

3.2. Yöntem

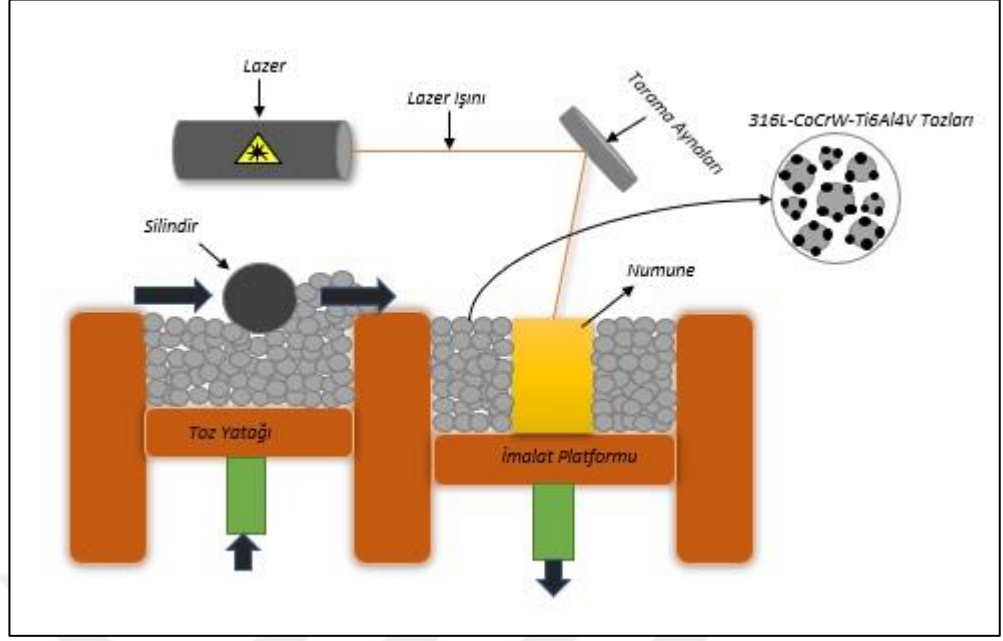
Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen işlemlere ait iş akış şeması Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3. 2. Tez İş Akış Şeması.

3.2.1. Numunelerin Üretilmesi

Bu tez çalışması kapsamında kullanılacak numunelerin üretimi Şekil 3.3’de şematik görünümü ve Şekil 3.4’de cihaz resmi verilen, Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM bünyesinde bulunan Concept Laser markalı MLab Cusing R model SLM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz 90*90*80 mm boyutlarında üretim tablasına ve fiber lazer 100 W lazer sistemine sahiptir.



Şekil 3. 3. SLM cihazı şematik görünümü (Mandev et al. 2024).



Şekil 3. 4. Concept Laser markalı MLab Cusing R model SLM cihazı.

Tez çalışması kapsamında SLM yöntemi ile üretilen poroz plakalar ve ağaç benzeri yapıların numuneleri SolidWorks yazılımı ile modellenmiştir. SLM üretim

parametrelerinin gözeneklilik, termal ve yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, her poroz plaka numunesi için dört farklı üretim parametresi ile üretimler gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler temel olarak lazer gücü ' P ' (W), tarama hızı ' v ' (mm/s), kayma mesafesi ' h ' (mm) ve katman kalınlığı ' t ' (mm) gibi değişkenleri içermektedir. Bu parametreler değiştirilerek, farklı enerji yoğunluklarında (J/mm^3) üretimler gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Enerji yoğunlukları, üretim parametrelerindeki değişiklikler eşitlik (3.1)'de verilen ifade kullanılarak hesaplanmıştır (Thijs et al. 2010).

$$W = \frac{P}{vth} \text{ (J/mm}^3\text{)} \quad (3.1)$$

Üretim parametrelerinin detayları ayrıca Çizelge 3.2'de sunulmuştur. Bu tez kapsamında ısı ve akış özellikleri araştırılacak olan biyomimetik ağaç benzeri yapılar, poroz plaka numunelerinde gerçekleştirilen karakterizasyon işleminden sonra üretilmiştir. Poroz plakaların karakterizasyonu sonucu elde edilen en yoğun ve dolayısıyla en yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip olan numune, 316L malzemesinden üretilmiş olan S3 numunesi olmuştur. Bu sebeple ağaç benzeri yapıların üretiminde 316L toz malzemesi ve $27 J/mm^3$ enerji yoğunluğu parametresi kullanılmıştır.

Çizelge 3. 2. SLM Üretim Parametreleri.

LAZER PARAMETRELERİ						
Toz Malzeme	Numune	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Kayma Mesafesi (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)
316L	S1	50	1500	0.10	0.025	13
	S2	75	1500	0.10	0.025	20
	S3	100	1500	0.10	0.025	27
CoCrW	S1	50	1000	0.10	0.025	20
	S2	90	1250	0.10	0.025	29
	S3	90	1000	0.10	0.025	36
Ti6Al4V	S1	60	1250	0.12	0.025	16
	S2	75	1250	0.075	0.025	32
	S3	90	1000	0.075	0.025	48

Tez çalışması kapsamında üretilen ağaç benzeri yapılar için başlangıçta 4'lü dallanma yapılarıyla elde edilen 6 katmanlı modeller oluşturulmuştur. Bu modeller için kritik bir boyut ise dallanma oranı olarak tanımlanan katmanlar arası çapların oranıdır. Üretilen ağaç benzeri yapıda dallanma oranı olarak 0,65-0,80 aralığı belirlenmiştir. Bu oran, insan ve bitki vasküler sistemindeki biyonomik fraktal kanallar göz önüne alınarak seçilmiştir (Huang et al. 2019). Biyonomik fraktal yapı, düşük akış direnci ile sıvıyı bir ana kanaldan geniş bir alana eşit olarak dağıtabilir. Ağaç benzeri yapının uçlarındaki mikro delikler, kapiler kuvvet oluşturarak soğutma suyunu terlemeli soğutma için mikro delik tabakasına yönlendirir. Geleneksel sinterlenmiş gözenekli malzemelere kıyasla, biyomimetik ağaç benzeri fraktal mikro kanallı yapı, kapiler kuvvet ve soğutma suyu akış direnci arasındaki çelişkiyi etkili bir şekilde ortadan kaldırabilir. Isıl iletkenlik ölçümlerinden sonra modelleri oluşturulan bu yapıların üretimi yapılmıştır. Ağaç benzeri yapıları modellerken kullanılan ölçüler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3. 3 Ağaç benzeri yapı numunelerinin geometrik özellikleri.

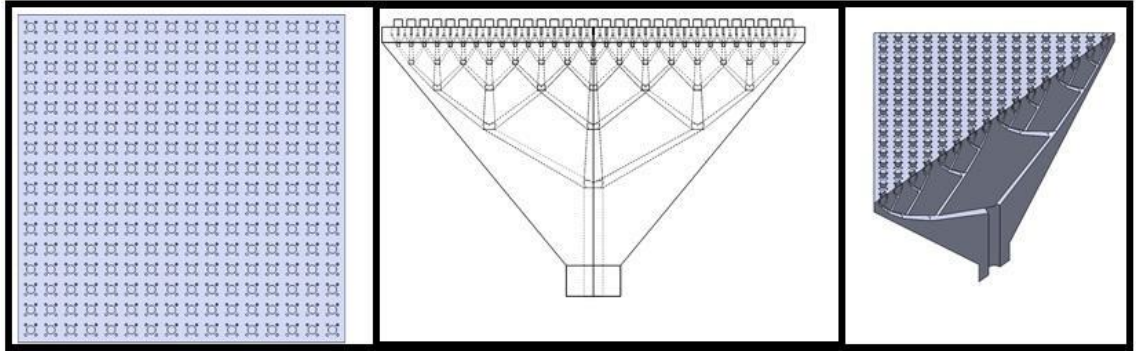
N1 (0,65 Dallanma Oranı)			N2 (0,80 Dallanma Oranı)		
Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma	Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma
Başlangıç: 0,30	1,5	Çapın 8 Katı ve 4 Dallanma	Başlangıç: 0,30	1,5	Çapın 8 Katı ve 4 Dallanma
1. Katman: 0,46	2,3		1. Katman: 0,38	2,3	
2. Katman: 0,71	3,4		2. Katman: 0,47	3,4	
3. Katman: 1,09	5,1		3. Katman: 0,59	5,1	
4. Katman: 1,68	7,6		4. Katman: 0,73	7,6	
5. Katman: 2,59	11,4		5. Katman: 0,92	11,4	
6. Katman: 3,98	8,7		6. Katman: 1,14	8,7	
N3 (0,65 Dallanma Oranı)			N4 (0,80 Dallanma Oranı)		
Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma	Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma
Başlangıç: 0,30	1,5	Çapın 6 Katı ve 4 Dallanma	Başlangıç: 0,30	1,5	Çapın 6 Katı ve 4 Dallanma
1. Katman: 0,46	2,3		1. Katman: 0,38	2,3	
2. Katman: 0,71	3,4		2. Katman: 0,47	3,4	
3. Katman: 1,09	5,1		3. Katman: 0,59	5,1	
4. Katman: 1,68	7,6		4. Katman: 0,73	7,6	
5. Katman: 2,59	11,4		5. Katman: 0,92	11,4	
6. Katman: 3,98	8,7		6. Katman: 1,14	8,7	
N5 (0,65 Dallanma Oranı)			N6 (0,80 Dallanma Oranı)		
Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma	Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma
Başlangıç: 0,50	1,5	Çapın 8 Katı ve 4 Dallanma	Başlangıç: 0,50	1,5	Çapın 8 Katı ve 4 Dallanma
1. Katman: 0,77	2,3		1. Katman: 0,63	2,3	
2. Katman: 1,18	3,4		2. Katman: 0,78	3,4	
3. Katman: 1,82	5,1		3. Katman: 0,98	5,1	
4. Katman: 2,80	7,6		4. Katman: 1,22	7,6	
5. Katman: 4,31	11,4		5. Katman: 1,53	11,4	
6. Katman: 6,63	8,7		6. Katman: 1,91	8,7	
N7 (0,65 Dallanma Oranı)			N8 (0,80 Dallanma Oranı)		
Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma	Çap (mm)	Katmanlar Arası Mesafe (mm)	Kanallar Arası Kopyalama Mesafesi ve Dallanma
Başlangıç: 0,50	1,5	Çapın 6 Katı ve 4 Dallanma	Başlangıç: 0,50	1,5	Çapın 6 Katı ve 4 Dallanma
1. Katman: 0,77	2,3		1. Katman: 0,63	2,3	
2. Katman: 1,18	3,4		2. Katman: 0,78	3,4	
3. Katman: 1,82	5,1		3. Katman: 0,98	5,1	
4. Katman: 2,80	7,6		4. Katman: 1,22	7,6	
5. Katman: 4,31	11,4		5. Katman: 1,53	11,4	
6. Katman: 6,63	8,7		6. Katman: 1,91	8,7	

3. MATERYAL ve YÖNTEM

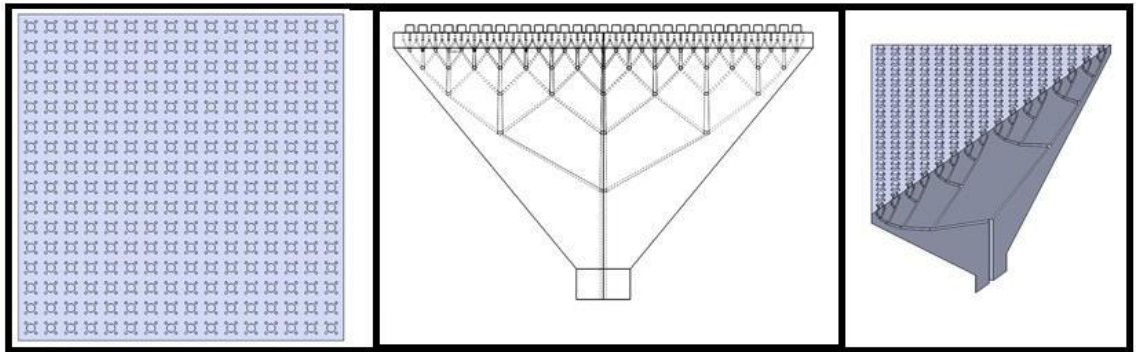
Modeller SLM cihazı ile üretim için STL dosya formatına dönüştürülmüş ve parçalara desteklik sağlama ve çarpılmaları engellemek için gerekli destek elemanları yerleştirilmiştir. Şekil 3.5-15 'da CAD ortamında modellenmiş numuneler gösterilmektedir.



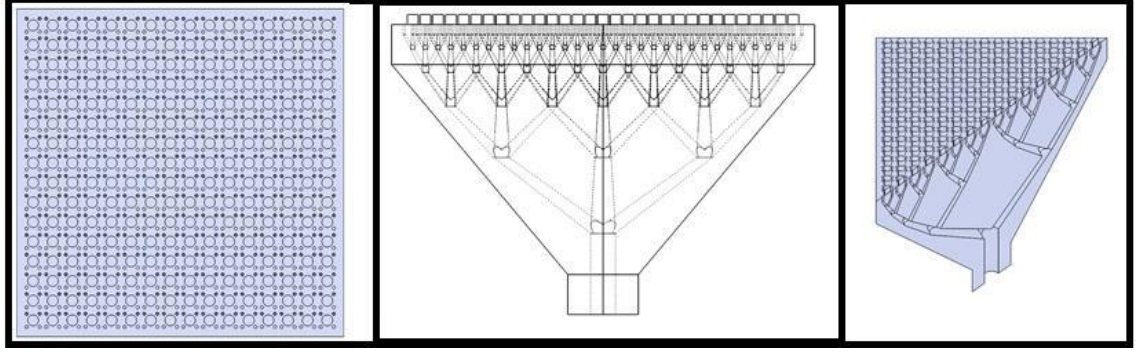
Şekil 3. 5. Poroz plaka numunelerin CAD modeli.



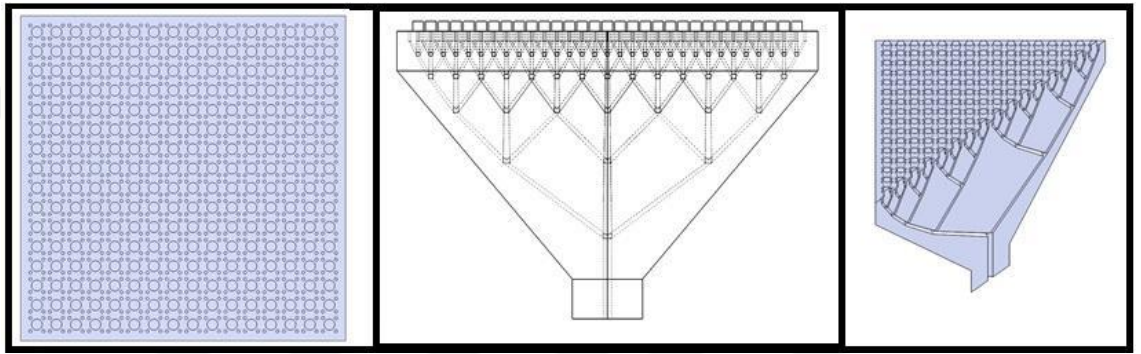
Şekil 3. 6. N1 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



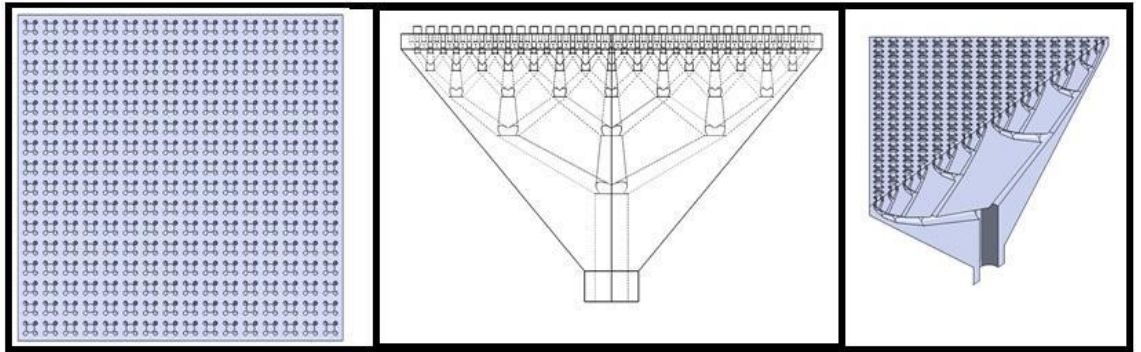
Şekil 3. 7. N2 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



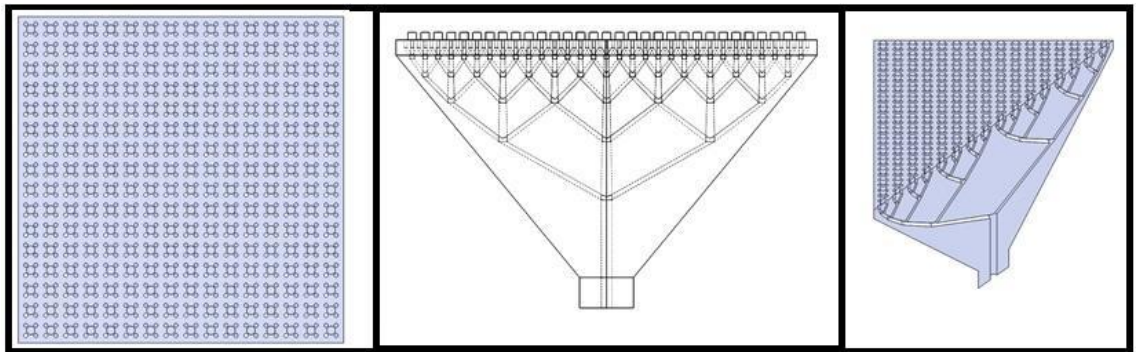
Şekil 3. 8. N3 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



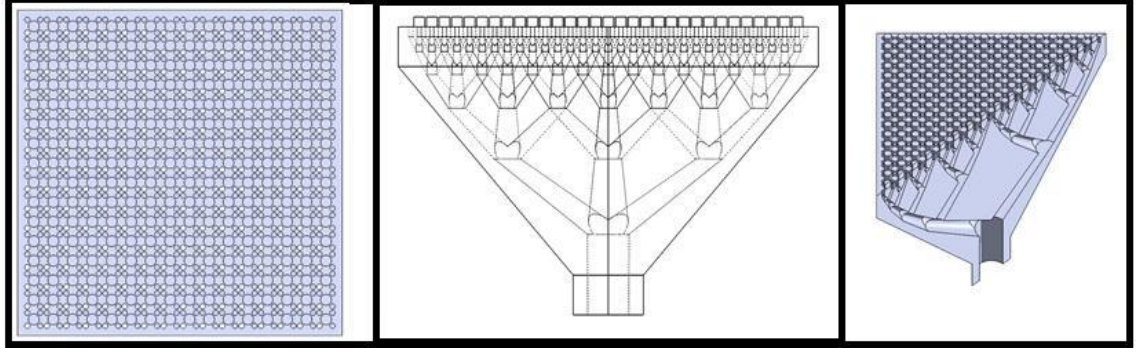
Şekil 3. 9. N4 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



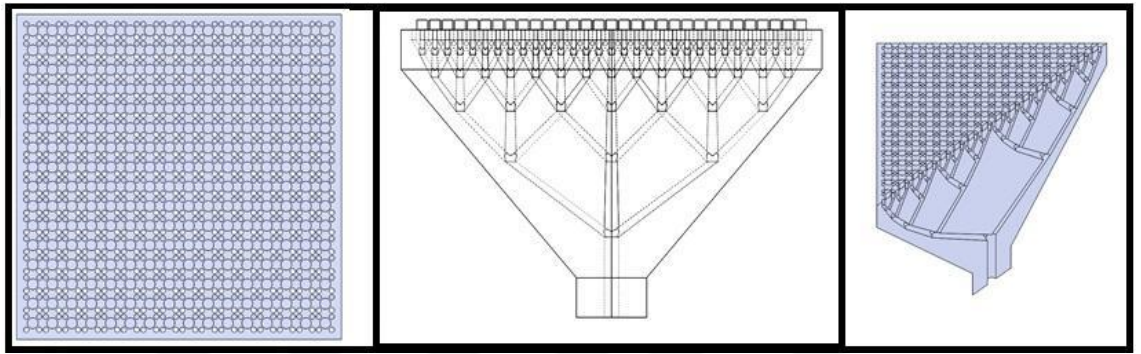
Şekil 3. 10. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



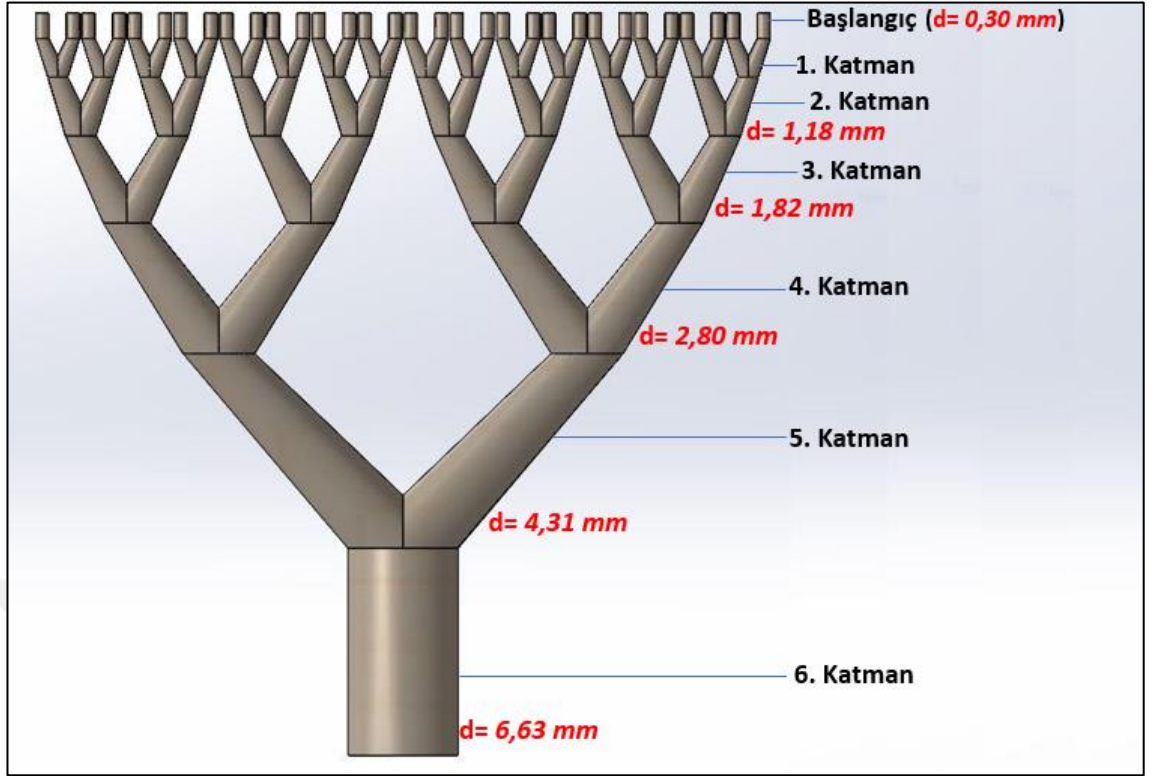
Şekil 3. 11. N6 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



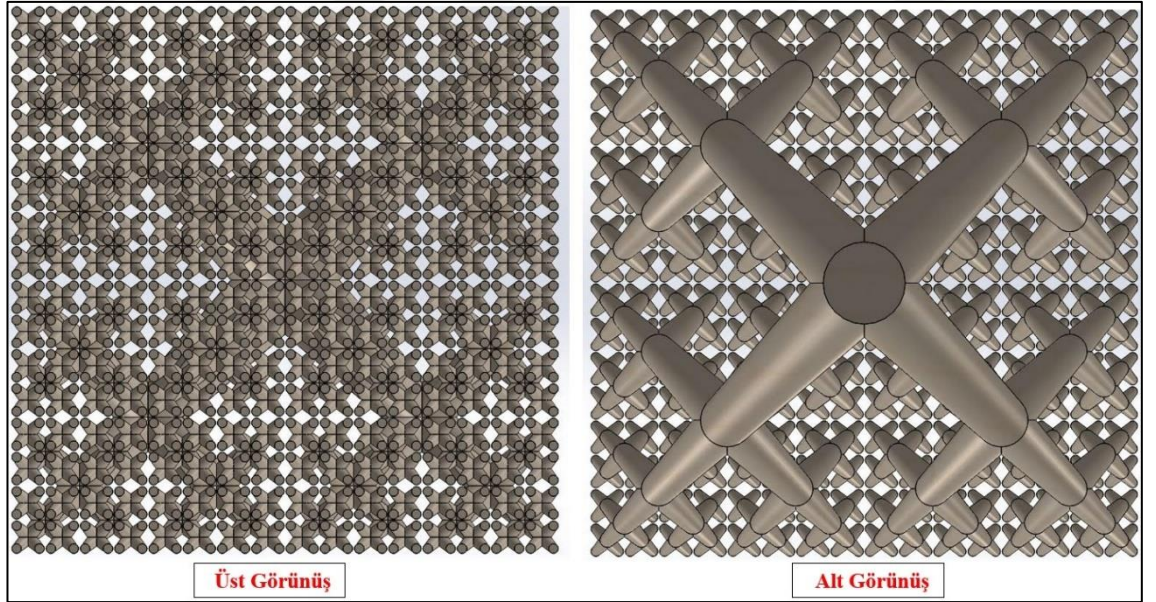
Şekil 3. 12. N7 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



Şekil 3. 13. N8 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin CAD modeli.



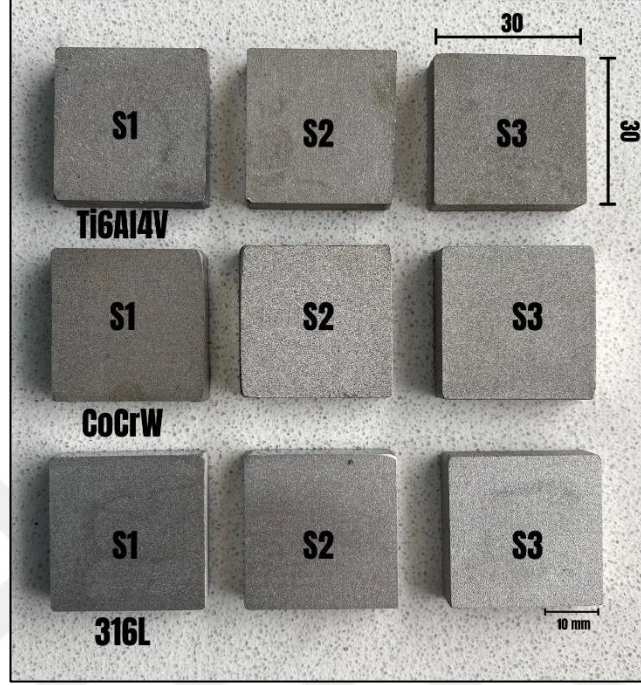
Şekil 3. 14. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin 3D model yan görünüşü.



Şekil 3. 15. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin 3D model üst ve alt görünüşü.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

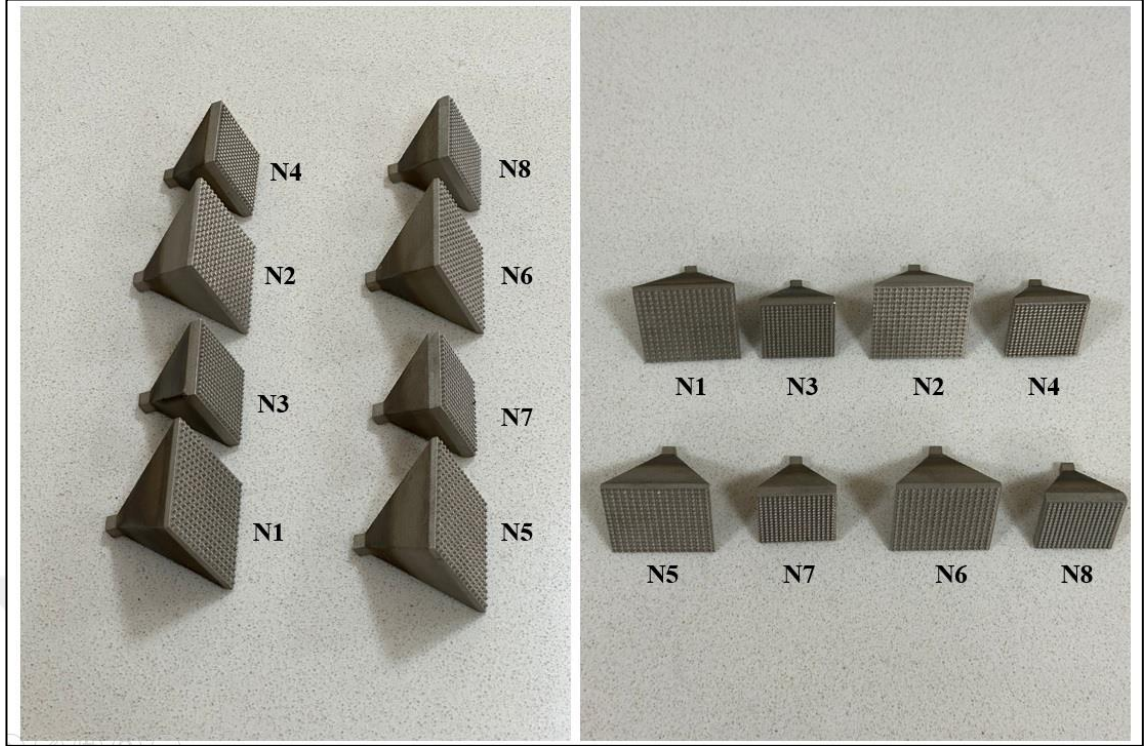
Üretilen poroz plaka numuneler ve ağaç benzeri yapı numuneleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17-18’de verilmiştir.



Şekil 3. 16. Üretimi tamamlanmış poroz plaka numuneler (Mandev et al. 2024).



Şekil 3. 17. SLM yöntemiyle üretilimi tamamlanmış tabla üzerine bağlı destek elemanlarından ayrılmamış numuneler.



Şekil 3. 18. Üretimi tamamlanmış ağaç benzeri yapı numuneler.

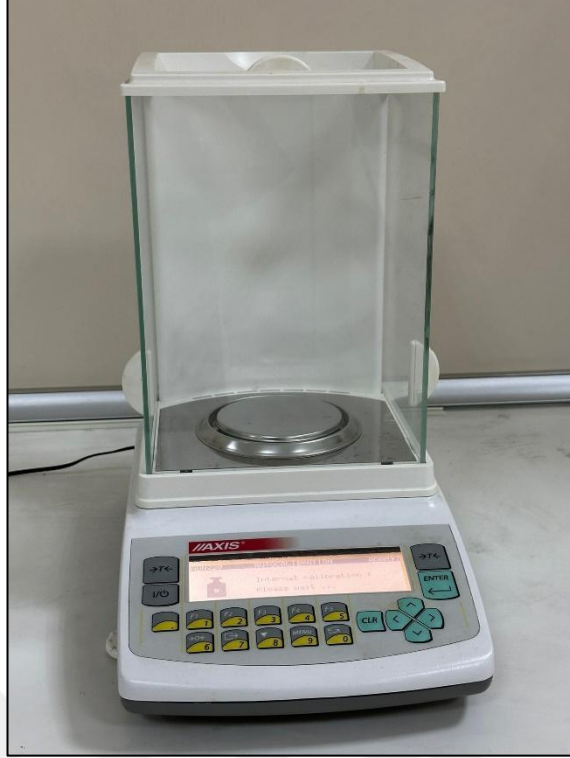
3.2.2. Porozitenin Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında üretilen 9 adet poroz plaka numunelerinin porozite ve yoğunluk ölçümleri Şekil 3.19’da resmi verilen AXIS marka 400 gr kapasite ve 0.0001 gr hassasiyete sahip hassas terazi ile, numunelerin boyut ölçümleri ise Astor marka ± 0.05 mm toleransa sahip dijital kumpas ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen kütle verileri ve numune boyutları kullanılarak, her bir numune için eşitlik (3.2)’ye göre hacimsel yoğunluk hesaplanmıştır.

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{sample}}{V_{sample}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.2)$$

Poroz plaka numunelerin porozitesi, eşitlik (3.2)'den elde edilen hacimsel yoğunluk ve literatürden alınan teorik yoğunluk verileri kullanılarak, eşitlik (3.3)'te verilen formülle elde edilmiştir.

$$Pt = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{teorical}} \quad (3.3)$$



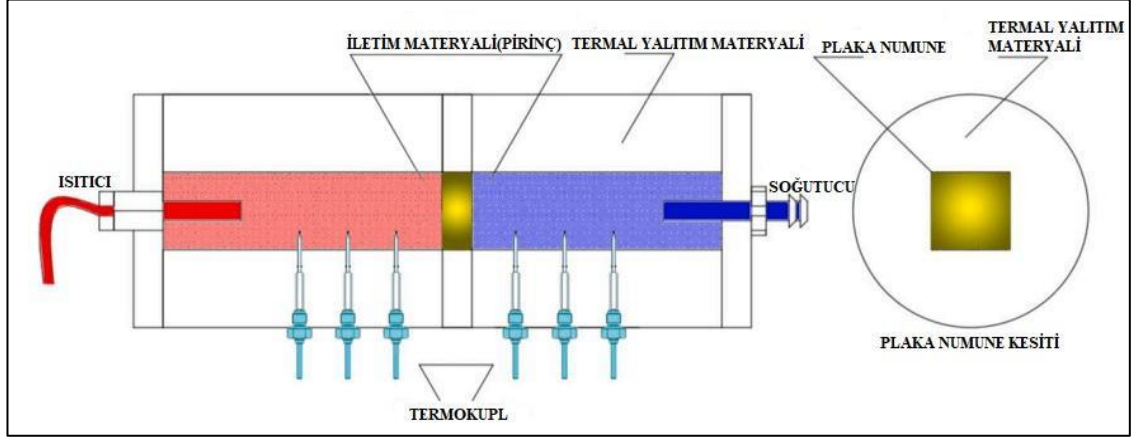
Şekil 3. 19. AXIS marka hassas terazi.

3.2.3. Isıl İletkenlik Ölçümleri

Isıl iletkenlik ölçümleri için kullanılan ısıl analiz cihazının şematik görünümü Şekil 3.20'de ve cihaz resmi ise 3.21'de sunulmuştur. Cihaz, merkez kısmında bir iletim hattı bulunan yatay silindirik bir şekle sahiptir ve ısıtıcı, soğutucu, termokupllar ve bir numune portundan oluşmaktadır. Ölçümler sırasında numuneler cihazın merkez bölgesine yerleştirilir. Ayrıca, cihaz ısı kaybını en aza indirmek için termal olarak yalıtılmıştır. Isıtma gücü ve sıcaklık ölçümleri bir termal analizör kullanılarak kaydedilmiştir. Numunelerin ısıl iletkenlik değerleri, ısıl direnç yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir.

İlk olarak, numunenin termal direnci eşitlik (3.4) kullanılarak hesaplanmıştır. Sonrasında bu ısıl direnç değeri, eşitlik (3.5)'de verildiği gibi, numunenin ısıl iletkenliğini belirlemek için kullanılmıştır (Kaya et al. 2021).

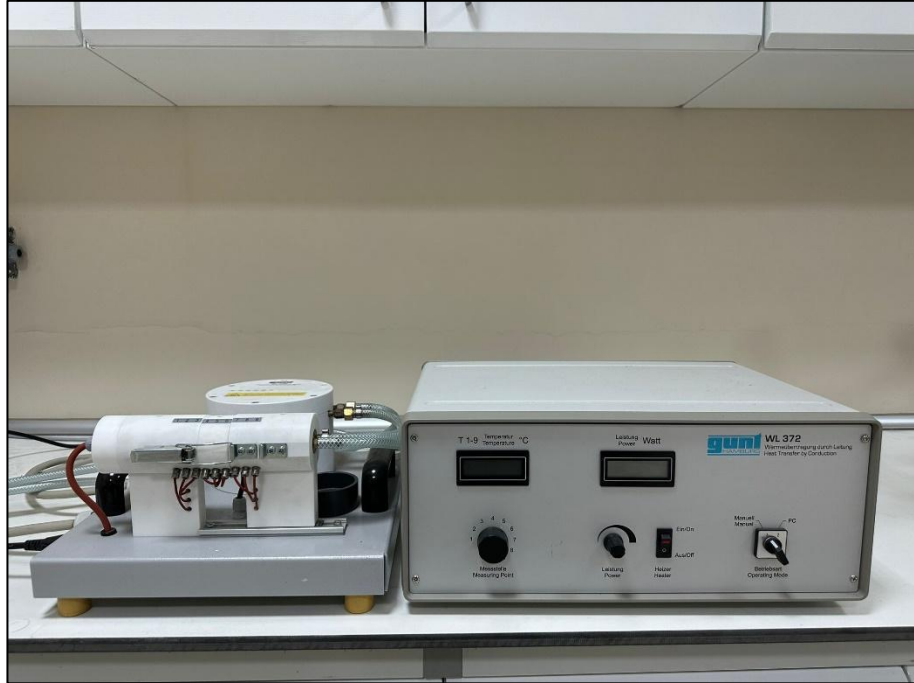
3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3. 20. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı şematik gösterimi (Hacısalıhoğlu et al. 2021).

$$R = \frac{T_2 - T_1}{\dot{Q}} \text{ (} ^\circ\text{C/W)} \quad (3.4)$$

$$k = \frac{L}{RA} \text{ (W/m.} ^\circ\text{C)} \quad (3.5)$$



Şekil 3. 21. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı.

Isıl iletkenlik ölçümlerinde, ' T_1 ' ve ' T_2 ' numunelerin ortalama yüzey sıcaklıklarını temsil ederken, ' R ' termal analizörde numune tarafından oluşturulan ısı direnci ifade etmektedir. Isıl iletkenlik (k) değeri, numunelerin yüzey alanları (A) ve kalınlıkları (L), eşitlik 3.5'e yerleştirilerek belirlenir. Her numune için, doğruluğu ve güvenilirliği sağlamak amacıyla ikişer tekrarlı beş deney yapılmıştır. Bu ölçümlerin ortalaması, tez çalışmasının 4. bölümünde sunulmuştur.

3.2.4. Mikro Sertlik Ölçümleri

316L, CoCrW ve Ti6Al4V malzemelerden üretilmiş 9 adet poroz plaka numunenin, mikro sertlik ölçümleri için Şekil 3.22 'de gösterilen Shimadzu HMV G20 mikro sertlik cihazı kullanılmıştır.



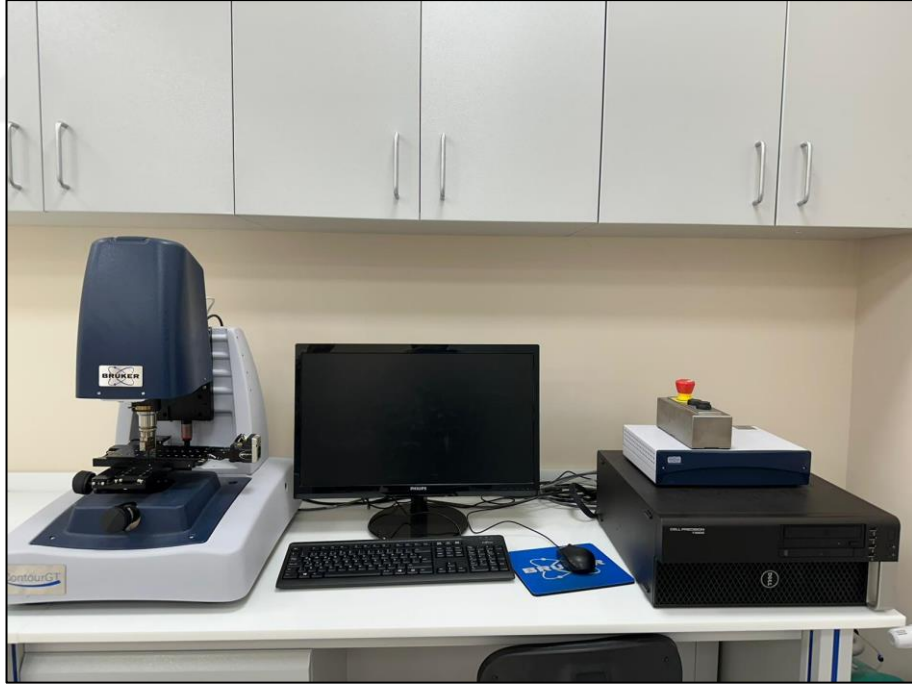
Şekil 3. 22. Shimadzu HMV G20 mikro sertlik ölçüm cihazı.

Mikro sertlik ölçümleri 200 g yük altında ve 10 s bekleme süresinde yedi ölçüm alınarak yapılmış ve alınan bu değerlerin ortalaması tez çalışmasının 4. bölümünde çizelge halinde verilmiştir.

3.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, üretim yönüne göre her numunenin iki farklı yüzeyinden üçer bölgede, ikişer tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, her numune için alınan 12 ölçümün ortalaması olarak bu tez çalışmasının 4. bölümünde verilmiştir. Spesifik olarak tartışılan ortalama yüzey pürüzlülüğü S_a (μm), yaygın olarak kullanılan bir pürüzlülük parametresidir. Bu parametre, değerlendirme alanındaki profil yüksekliklerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için, Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM bünyesinde bulunan Bruker Contour GTK 3D optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, temassız ölçüm prensibine dayanarak hassas ve doğru yüzey pürüzlülüğü analizi sağlamaktadır.

Şekil 3.23’de resmi verilen bu cihaz kullanılarak, numunelerin farklı bölgelerinden ve yüzeylerinden yüzey pürüzlülüğü kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmiştir.



Şekil 3. 23. Bruker Contour GTK 3D optik profilometre cihazı.

3.2.6. XRD Analizleri

316L, CoCrW ve Ti6Al4V malzemelerden üretilmiş 9 adet poroz plaka numunenin yüzeyinde oluşan faz analizleri $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip 30 kV ve 30 mA'de çalıştırılan Cu-K α radyasyon kaynağı ile GNR-Explorer XRD cihazı (Şekil 3.24) vasıtasıyla belirlenmiştir. Elde edilen faz kompozisyonu PDF-4 pik listeleri ile karşılaştırılarak oluşan fazların kimyasal kompozisyonları tespit edilmiştir ve oluşturulan grafikler tez çalışmasının 4. bölümünde verilmiştir.



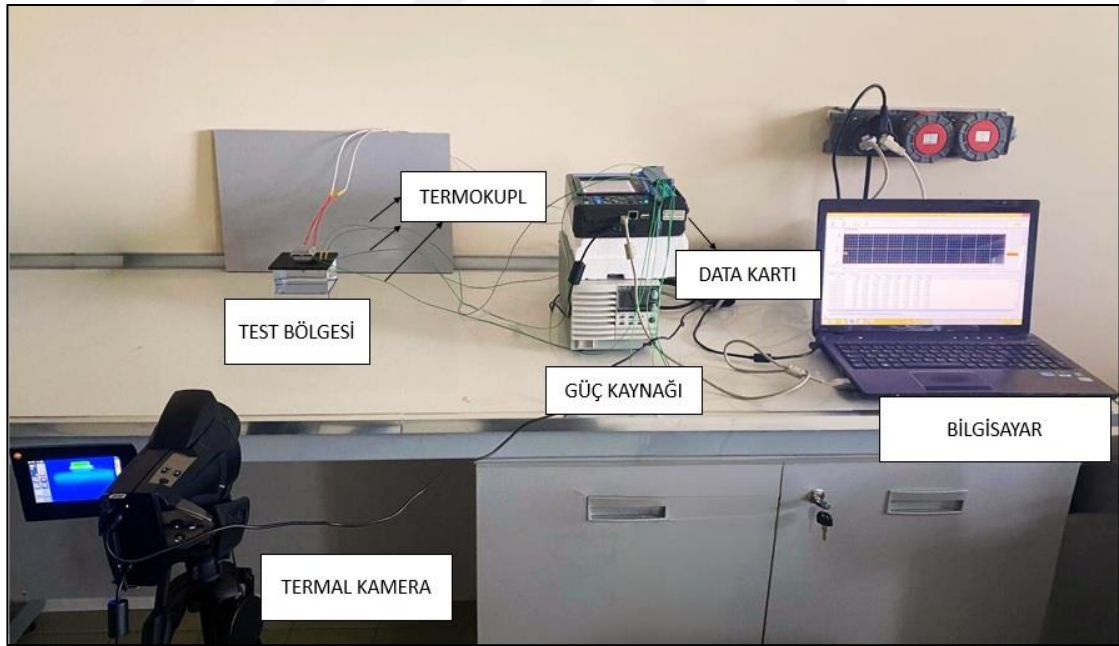
Şekil 3. 24. X-Işını kırınım (XRD) ölçer cihazı.

3.2.7. Ağaç Benzeri Yapılarda Isı Transferi ve Akış Görüntüleme Deneyleri

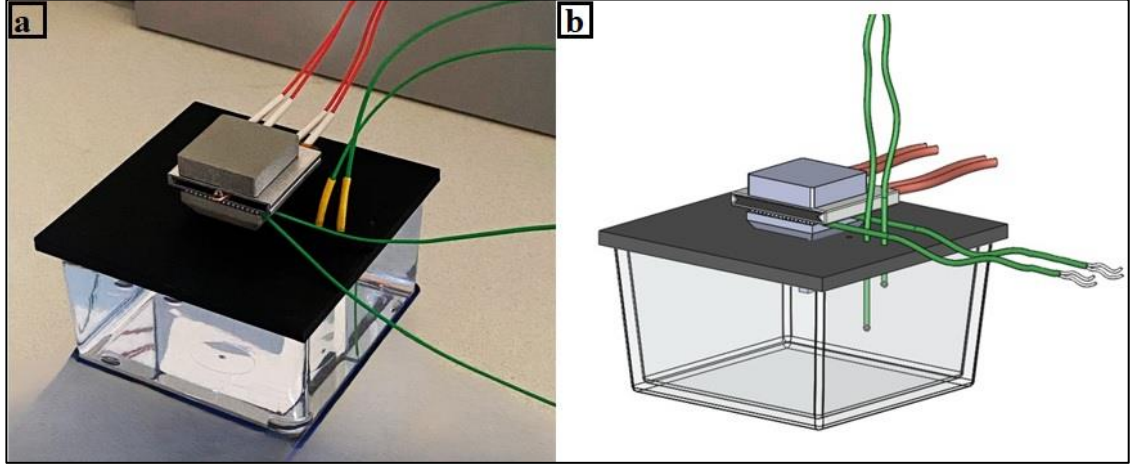
Bu tez çalışması kapsamında, ağaç benzeri yapıların ısı transferi deneyleri, Şekil 3.25-26-27'de deney düzeneği ve test bölgesi verilen düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman grafikleri, termal kamera görüntüleri, numunelerin sıcaklık dağılımları ve parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) sonuçlarının ayrıntıları tez çalışmasının 4. bölümünde verilmiştir.

İlgili şekillerden görüleceği üzere ısı transferi deney sisteminin merkezinde test bölgesi yer almaktadır. Test bölgesinin temelini su haznesi oluşturur. Bu hazne

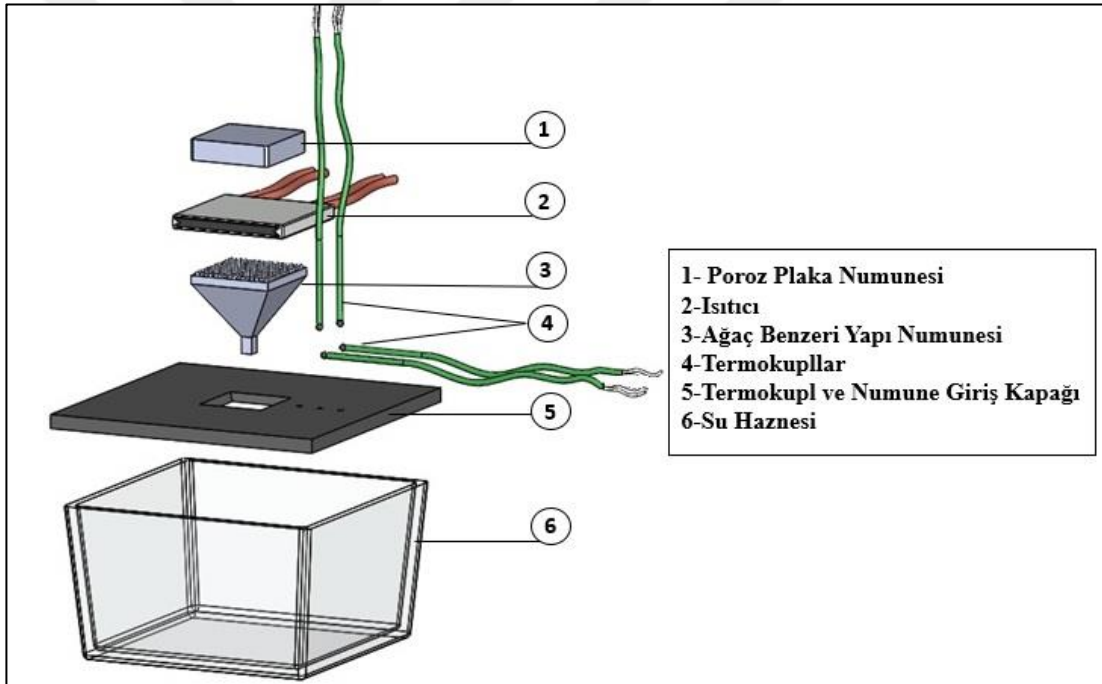
içerisindeki su tüm deneylerde değiştirilmektedir, su miktarı ve sıcaklığı ise sabittir. Hazne üzerinde bir kapak yer almaktadır. Deneyler sırasında ağaç benzeri yapı numuneleri hazne içerisindeki suya dalacak şekilde kapağın üzerine yerleştirilir. Yerleştirilen numuneler üzerinde plaka ısıtıcılar ve poroz plaka kütlesi yer alır. Ayrıca test bölgesindeki sıcaklık verilerinin toplanması amacıyla dört adet termokupl farklı noktalara yerleştirilmiştir. Bu termokuplların iki adedi ile yüzey diğer iki adedi ile akışkan sıcaklıkları takip edilmektedir. Bunun dışında diğer bir termokupl ise ortam sıcaklığı takip etmek için serbest konumlandırılmıştır. Stratejik olarak yerleştirilen bu termokupllar bir data kartına bağlanmaktadır. Data kartı ise bilgisayar ile kontrol edilmektedir ve sıcaklık verileri anlık olarak bu bilgisayara kaydedilmektedir. Deney düzeneğinde sabit ısı akısı kaynağı olarak kullanılan ısıtıcı plakalar bir DC güç kaynağı kullanılarak beslenmektedir. Ek olarak deneyler sırasında termal kamera görüntülemeleri de yapılmıştır. Alınan bu görüntülerden belirli anlarda yakalamalar yapılarak bir sonraki bölümde tartışılmıştır.



Şekil 3. 25. Ağaç benzeri yapılarda ısı transferi ölçümleri deney sistemi.



Şekil 3. 26. (a) Ağaç benzeri yapılarda ısı transferi ölçüm deneyleri test bölgesi (b) Test bölgesi şematik resmi.



Şekil 3. 27. Test bölgesi şematik görünüm.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen akış görüntüleme deney sistemi Şekil 3.28’de verilmiştir. Bu sistemde, akış alanındaki hız vektörlerinin belirlenmesi için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm (Particle Image Velocimetry, PIV) yöntemi kullanılmıştır. PIV, sıvı veya gaz gibi akışkan ortamlarda veya çift fazlı akışlarda hız vektör alanlarının belirlenmesine olanak tanıyan, lazer bazlı optik bir ölçüm tekniğidir. Yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğü sayesinde, karmaşık akış yapılarını, sınır

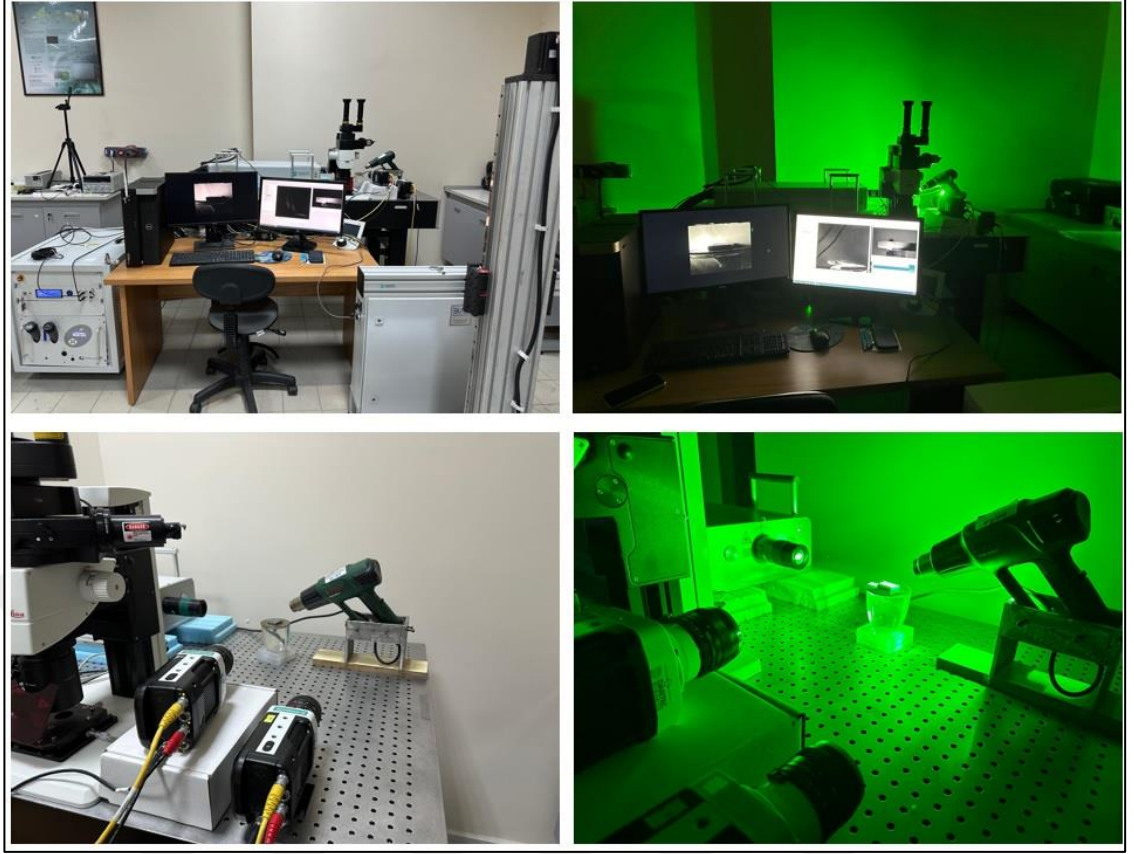
tabaka gelişimini ve türbülans karakteristiklerini detaylı bir şekilde inceleme imkânı sunar (Raffel et al. 2018).

Deney düzeneği, bir YAG lazer ünitesi, CCD kamera ve görüntü işleme yazılımından oluşmaktadır. PIV tekniğinde, tek fazlı akışlarda test ortamına belirli optik ve fiziksel özelliklere sahip izleyici parçacıklar eklenmekte ve bu parçacıklar akışkan hareketi ile taşınmaktadır. İzleyici parçacıkların akışa tamamen uyum sağlayabilmesi için düşük yoğunluklu ve yüksek yansıtıcılığa sahip olmaları gerekmektedir (Raffel et al. 2018). Bu çalışmada da izlenen çift fazlı akışlarda ise farklı fazlar doğal izleyici görevi gördüğünden ek parçacık kullanımına gerek duyulmamaktadır.

PIV sisteminde lazer kaynağı, belirli aralıklarla yüksek enerjili ışık darbeleri yayarak akış içindeki parçacıkları aydınlatır veya farklı fazlarda farklı yansıma oluşturur. Çift darbeli Nd:YAG lazer, ışık üreterek akışın belirli bir düzleminde parçacıkların ardışık görüntülerinin yakalanmasını sağlar. CCD kamera, bu aydınlatılan parçacıkların veya ayrı fazın ardışık görüntülerini belirli zaman aralıklarıyla kaydeder. İki ardışık görüntü arasındaki zaman farkı Δt olarak tanımlanır ve bu fark, akış hızına bağlı olarak optimize edilir (Willert and Gharib 1991).

Elde edilen görüntüler, çeşitli görüntü işleme korelasyon algoritmaları kullanılarak işlenir ve akış alanındaki hız vektörleri hesaplanır. Görüntü işleme sürecinde, her kare belirli bir alt bölgeye (interrogation window) ayrılır ve bu bölgedeki parçacık dağılımı, bir önceki kareyle karşılaştırılarak yer değiştirme miktarı belirlenir. Bu sayede, akış alanının iki boyutlu (2D-PIV) veya üç boyutlu (3D-PIV) hız dağılımı elde edilebilir (Raffel et al. 2018).

Bu çalışmada kullanılan PIV sistemi, DANTEC Dynamics firmasından temin edilmiş olup, lazer ünitesi çift atımlı Nd:YAG lazer kaynağıdır. Görüntüleme sistemi, yüksek çözünürlüklü CCD kamera ile desteklenmiş olup, elde edilen veriler görüntü işleme yazılımı aracılığıyla analiz edilmiştir. Görüntü işleme sürecinde DynamicStudio yazılımı kullanılmış ve akış hız vektörleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen hız alanları ve akış yapıları, detaylı olarak tez çalışmasının 4. bölümünde sunulmuştur.



Şekil 3. 28. Akış görüntüleme deney düzeneği.

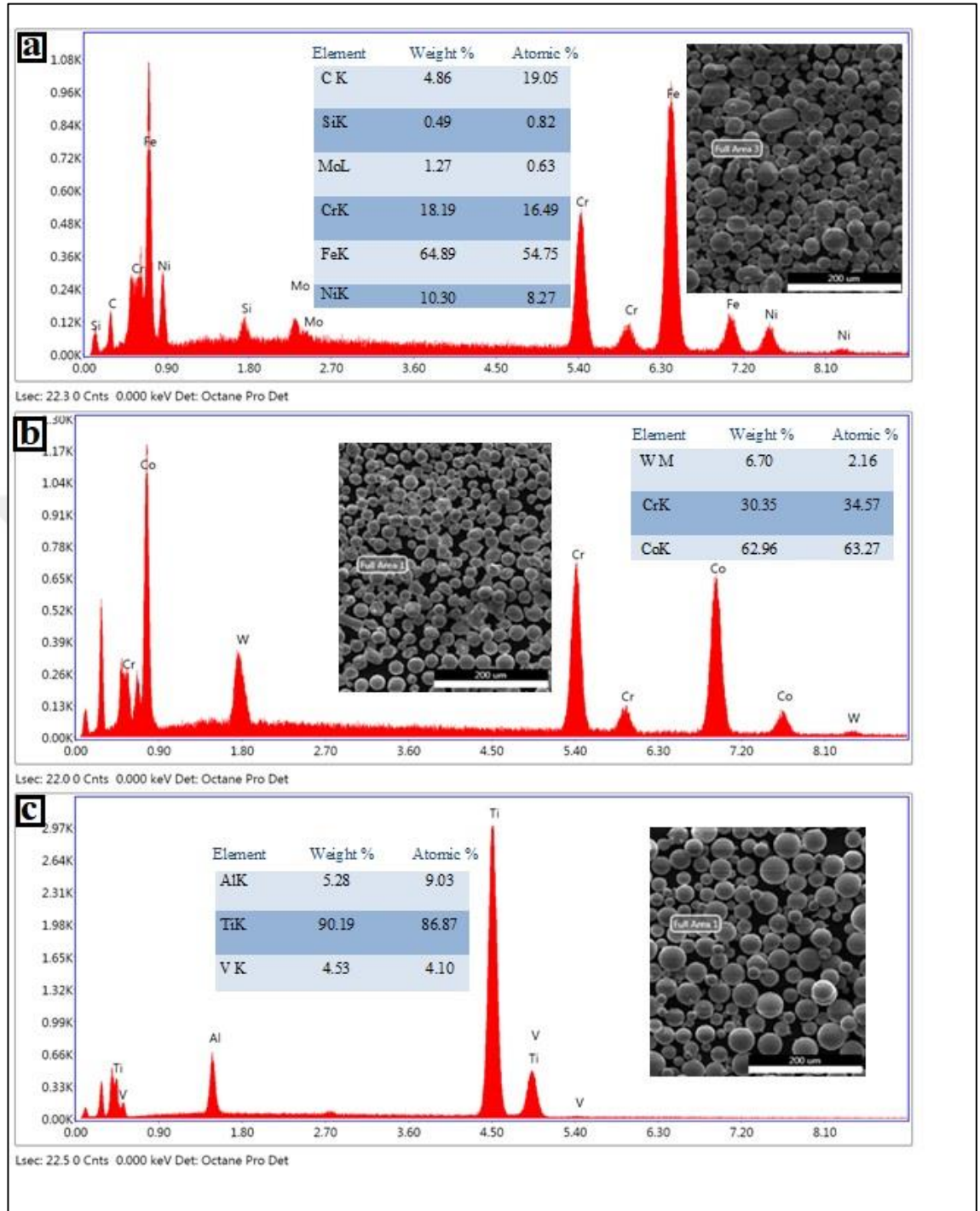
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Mikro Yapı Analizi

Şekil 4.1.(a)'da verilen 316L paslanmaz çelik tozunun EDS analizi, %64,89 Fe, %18,19 Cr, %10,30 Ni, %1,27 Mo ve %4,86 C içerdiğini göstermektedir. Bu bileşim, paslanmaz çeliklerde yaygın olarak görülen ve malzemenin mekanik ve korozyon direnci özelliklerini belirleyen elementleri içermektedir. Özellikle Cr içeriği, çeliğin oksidasyon ve korozyon direncini artırarak paslanmaz özellik kazandırırken, Ni, malzemenin sünekliğini ve darbe dayanımını güçlendirmektedir. Mo katkısı, özellikle asidik ve klorürlü ortamlarda korozyon direncini artırırken, karbon içeriği ise mikro yapı üzerinde doğrudan etkili olup sertliği etkileyebilmektedir (Davis 2000). Bu sonuçlar, literatürde belirtilen 316L bileşimiyle uyumlu olup, malzemenin eklemeli imalat süreçlerinde yüksek mukavemet ve korozyon direnci sağlamasını desteklemektedir.

Şekil 4.1.(b)'de verilen CoCrW EDS analizi, malzemenin %62,96 Co, %30,35 Cr ve %6,70 W içerdiğini ortaya koymaktadır. Co bazlı süper alaşımlar, özellikle yüksek sıcaklık mukavemeti, oksidasyon direnci ve biyouyumluluk açısından avantajlı olup, havacılık ve tıbbi implant uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Cr elementi, oksitlenme ve korozyon direncini artırarak malzemenin yüksek sıcaklıklarda kararlı kalmasını sağlarken, W alaşımı sertleştirerek aşınma direncini iyileştirmektedir (ASM Handbook 2001). Bu sonuçlar, literatürde yer alan tipik CoCrW bileşimiyle büyük ölçüde örtüşmekte olup, SLM yöntemiyle üretilen parçaların termal ve mekanik performans açısından başarılı olabileceğini göstermektedir (Donachie 2000).

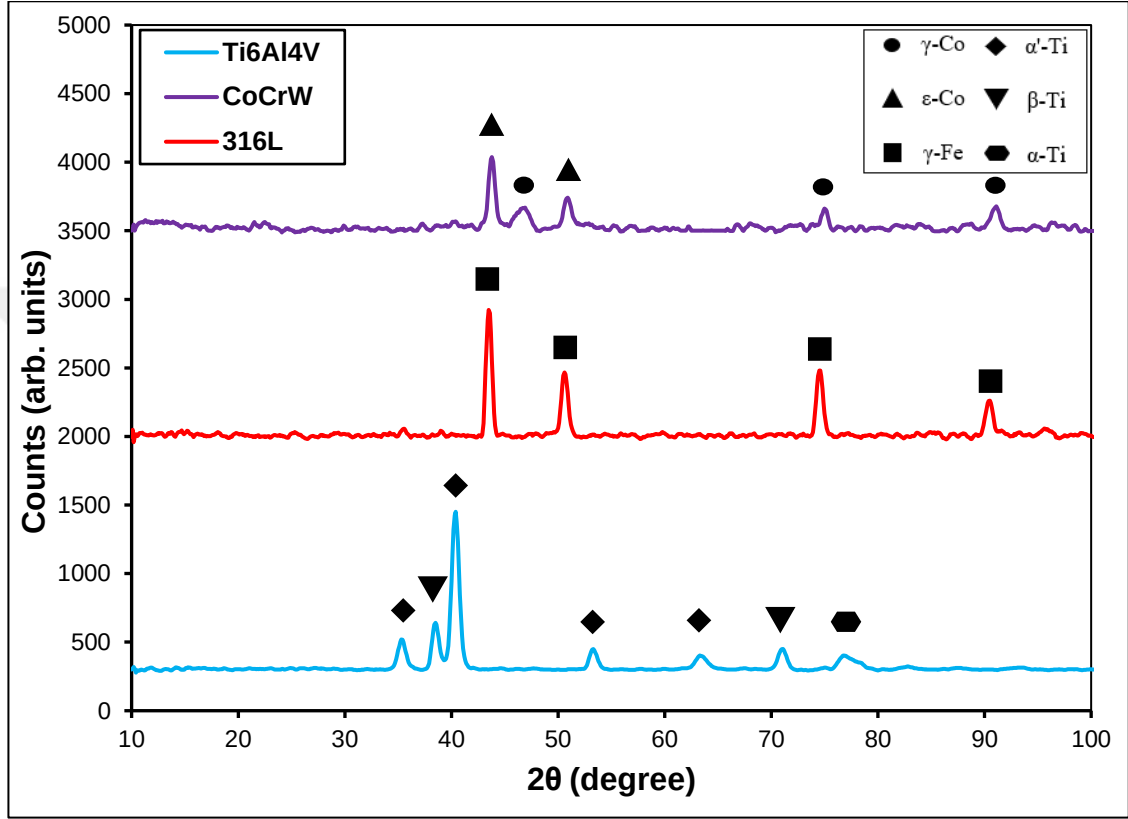
Şekil 4.1.(c)'de verilen Ti6Al4V EDS analizi, %90,19 Ti, %5,28 Al ve %4,53 V oranlarını ortaya koymaktadır. Bu alaşım, hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci nedeniyle havacılık, otomotiv ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Al katkısı, malzemenin mukavemetini artırırken, V, taneleri incelterek mekanik dayanımı iyileştirmektedir. Ayrıca, Ti6Al4V'nin yüksek biyouyumluluğu, implant ve protez üretiminde tercih edilmesini sağlamaktadır (Lütjering & Williams 2007). Elde edilen sonuçlar, literatürde belirtilen standart bileşim değerleriyle büyük ölçüde uyumlu olup, SLM ile üretilen Ti6Al4V bileşenlerinin mekanik özelliklerini koruyabileceğini göstermektedir (Donachie 2000).



Şekil 4. 1. SLM ile üretim sonrası numunelerin yüzeylerinin EDS analizleri (a) 316L (b) CoCrW (c) Ti6Al4V

4.2. XRD Analizleri

SLM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V, 316L ve CoCrW poroz plaka numunelerinin kristalografik özellikleri Şekil 4.1’de verilen XRD spektrumları ile belirlenmiştir.



Şekil 4. 2. SLM yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V, CoCrW ve 316L poroz plaka numunelerin XRD analizleri.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere SLM ile üretilen 316L poroz plaka numunesinde yapının tamamen yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip östenit fazında (γ -Fe) olduğu görülmüş ve yalnızca östenit pikleri tespit edilmiştir. Bu faz, paslanmaz çeliklerin korozyon direncini ve mekanik özelliklerini artıran temel fazdır. Grafikte belirgin tepe noktaları $2\theta = 43,5^\circ$, $50,7^\circ$, $74,6^\circ$ değerlerinde görülmektedir. Bu tepe noktaları, γ -Fe fazının kristal yapısına işaret eder. SLM ile üretim esnasında hızlı soğuma nedeniyle yapıda kalıntı gerilmeler oluşur, XRD grafiğinde bunları daha belirgin pikler olarak görebiliriz (Zhong et al. 2016).

Titanyum sıcaklığa bağlı olarak iki farklı kristalografik yapıda bulunabilir. Oda sıcaklığında saf titanyum, α -Ti fazında hegzagonal sıkı paket (HSK) kristal bir yapıya sahipken, 883 °C’de yapısı hacim merkezli kübik yapı (HMK) β -Ti fazına dönüşmektedir (Yetim 2009). α -Ti fazı, malzemeye yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk kazandırırken, β -Ti fazı işlenebilirlik ve süneklik sağlar (Boyer 2010). Şekil 4.1’de görüldüğü üzere SLM ile üretim sonrasında hızlı soğuma ve yüksek enerjili lazer gücü nedeniyle yapıda α' iğnemsî martenzitik yapı oluşmuştur (Dai et al. 2017). Bu iğnemsî yapılar SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımlarının diğer yöntemlerle üretilmiş olanlara göre yüzey sertliğinin daha fazla olmasını sağlamaktadır (Castellanos et al. 2017).

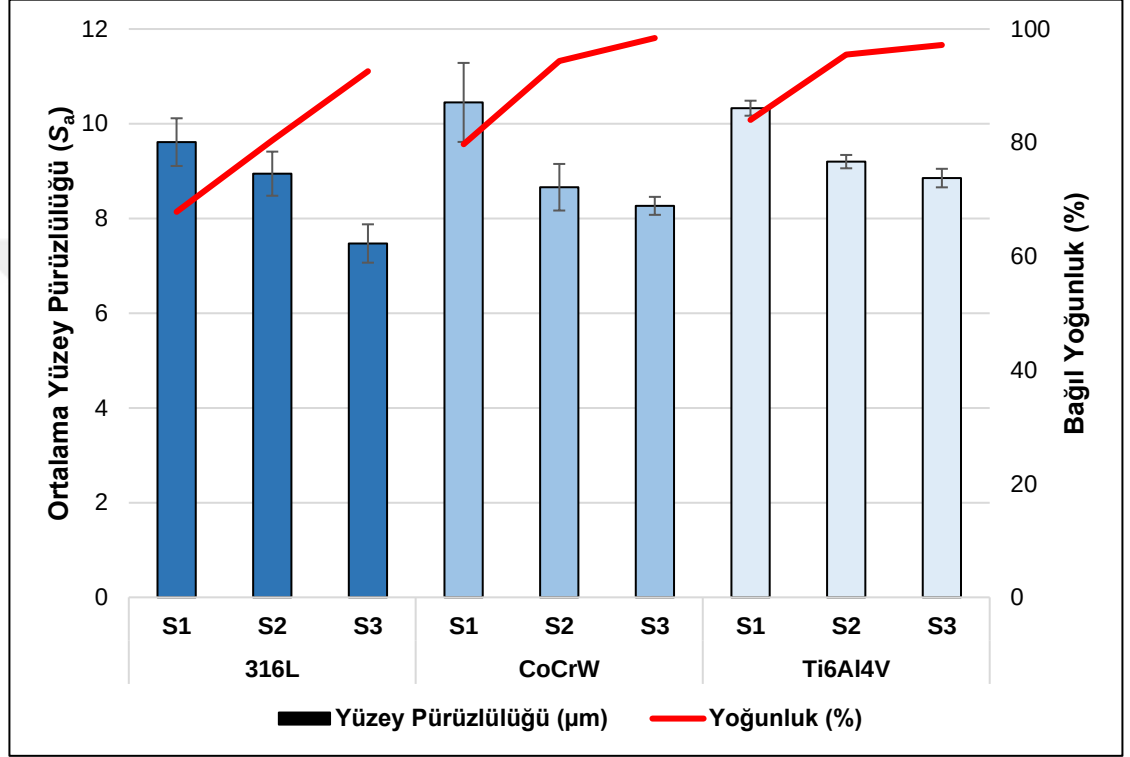
Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi SLM ile üretimi gerçekleştirilmiş CoCrW poroz plaka numunesi γ -Co fazında YMK (yüzey merkezli kübik) ve ε -Co fazında HSK (hegzagonal sıkı paket) yapıdan oluşmaktadır. Bu alaşımlar malzemeye yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direnci sağlamaktadır. $2\theta = 44,2^\circ, 47,4^\circ, 64,6^\circ$ değerlerinde γ -Co fazının tepe noktaları gözlemlenirken, $2\theta = 38,5^\circ, 41,7^\circ, 43,8^\circ$ değerlerinde ε -Co fazının tepe noktaları bulunmaktadır.

4.3. Yüzey Haritaları ve Yüzey Pürüzlülük Durumları

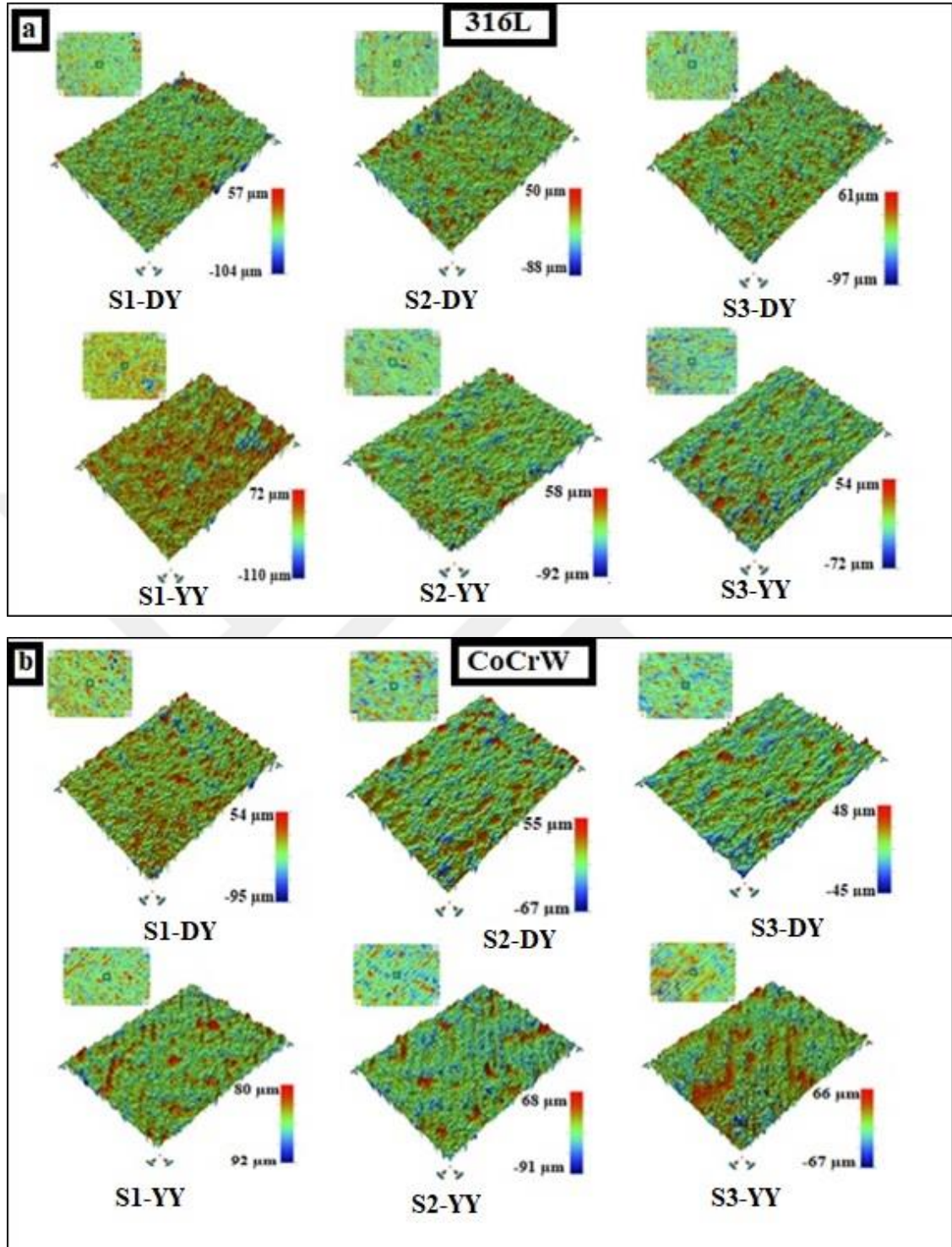
Farklı yönelimlerde alınmış yüzey haritalarının görseli ve numunelerin ortalama yüzey pürüzlülükleri sırasıyla Şekil 4.3 ve 4.4’de sunulmuştur. Termal uygulamalarda pürüzlü yüzeyler sıklıkla tercih edilmektedir. Hatta yüzeylerin pürüzlendirilmesi pasif ısı transferi artırma metotları arasında önemli bir alternatif olarak gösterilmektedir. Bunun temelde iki neden vardır; bunların ilki pürüzlü yüzeylerde ortaya çıkan alan artışıdır. Isı transferi hangi mekanizmayla gerçekleşirse gerçekleşsin doğası gereği bir alan olgusudur. Pürüzlü yüzeyler barındırdıkları vadi ve tepe profilleri nedeniyle eşit projeksiyon alanına sahip teorik pürüzsüz yüzeylere oranlar daha büyük yüzey alanına sahiptirler. Bu termal uygulamalar için bir avantajdır. İkinci neden ise pürüzlülüklerin akış sınır tabakasını bozan yapılar olarak davranmasıdır. Bu durumda da akışı tahrik etmek için gerekli olan enerji artsa da momentum ve termal etkileşimler kuvvetlenmektedir.

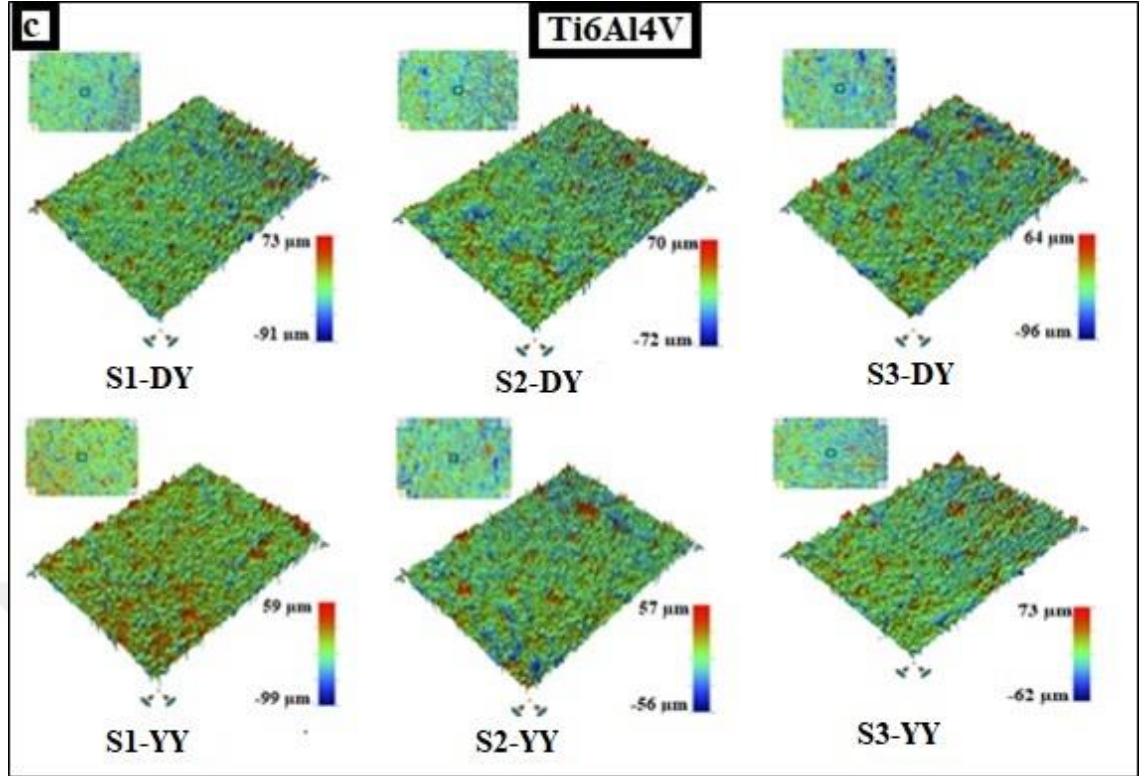
Şekil 4.4’de verilen yüzey haritaları incelendiğinde pürüzlülük yapılarının genel anlamda düzgün dağılımlı olduğu görülmektedir. Bu durum termal uygulamalar için arzu edilen bir durumdur. 316L ve Ti6Al4V numuneleri için pürüzlülük yapılarının CoCrW numunelerine göre daha konik karakteristiğe sahiptir. Ek olarak CoCrW numunelerinde

üretim prosesi kaynaklı bir yüzey paterninin oluştuğu söylenebilir. Bu nedenler CoCrW numunesini pürüzlülük yönüyle bir miktar geri plana atmaktadır. Şekil 4.3’de verilen ortalama yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde ise pürüzlülüğün artan doluluk oranıyla azaldığı görülmektedir. En yüksek pürüzlülük sonuçları Ti6Al4V numunesinde elde edilmiştir. Ti6Al4V numunelerini sırasıyla CoCrW ve 316L numuneleri takip etmiştir.



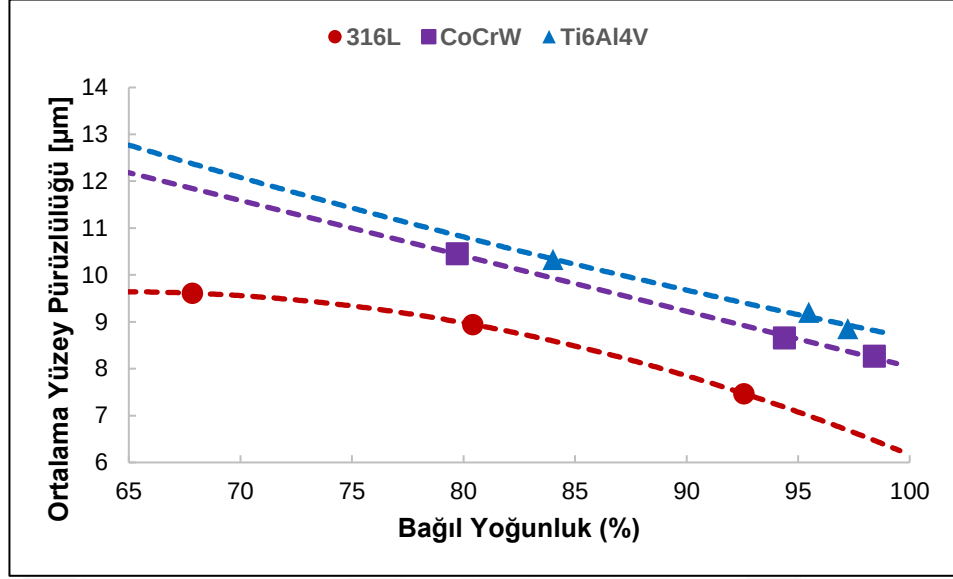
Şekil 4. 3. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük sonuçları.





Şekil 4. 4. SLM ile üretilmiş poroz plakaların yüzey haitaları (a) 316L (b) CrCoW (c) Ti6Al4V.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin bağıl yoğunluk ile ilişkili değişimleri Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Grafikte sunulan sonuçlar, proses parametrelerinin kontrolüyle bağıl yoğunluğun ve dolayısıyla ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin önemli ölçüde değiştirilebileceğini göstermektedir. Ancak, 316L numunesi için elde edilen sonuçlar, pürüzlülük kontrolünün sınırlanabileceği bir noktaya işaret etmektedir. Proses parametrelerinin pürüzlülüğü yönetmek için kontrol edilmesi, süreçlere özgü belirgin bir özellik taşıırken, bu yöntem ısı ve akış işlemlerinde yenilikçi uygulamalara kapı aralayabilir. Olası sınırlamalara rağmen, pürüzlülüğün proses parametreleri aracılığıyla kontrol edilmesi için farklı yaklaşımların araştırılması, ısı ve akış dinamiğinde yenilikçi uygulamalara olanak sağlayabilir.



Şekil 4. 5.Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve bağıl yoğunluk değişimi.

4.5. Porozite ve Isıl iletkenlik Sonuçları

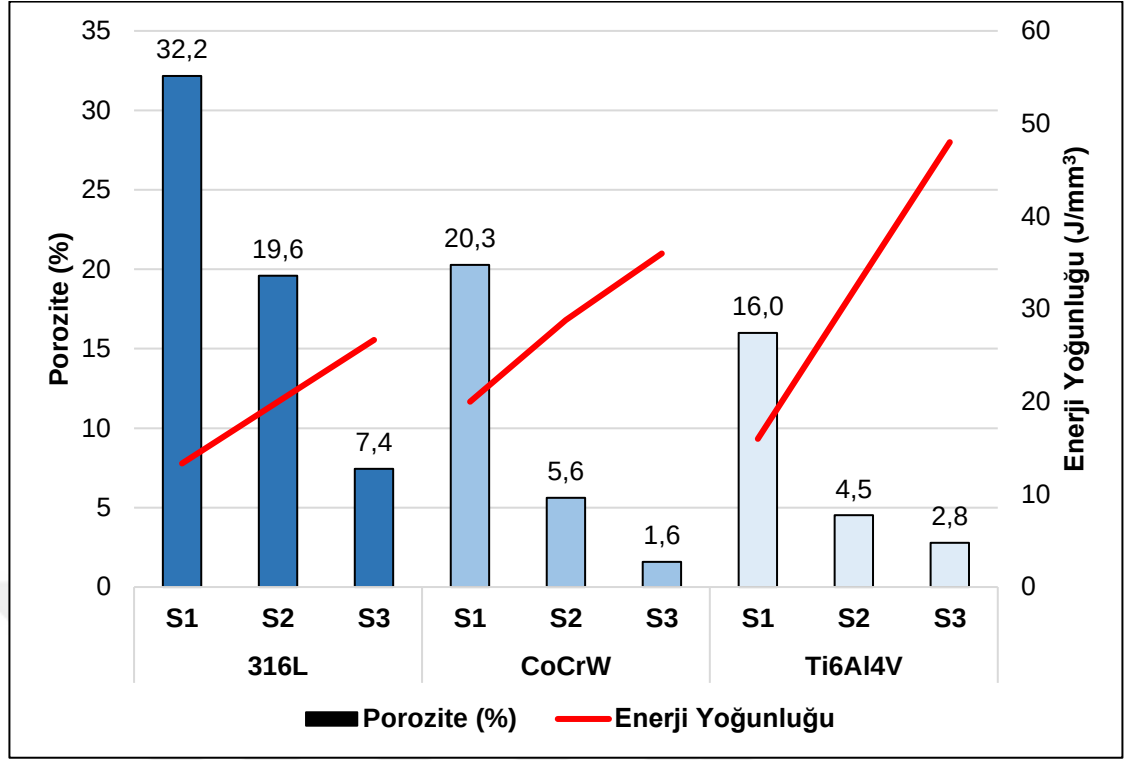
Farklı SLM parametreleriyle, farklı enerji yoğunluğu seviyelerinde üretilen numunelerde beklenen en temel fark numunenin bulk yoğunluğundaki değişimdir. Farklı bulk yoğunluklardaki numuneler farklı boşluk oranları barındırmaktadır. Çizelge 4.1’de 316L, CoCrW ve Ti6Al4V malzemeleri için %100 doluluğa karşılık gelen teorik yoğunluk değerleri ve 9 numune için belirlenen bulk yoğunluklar sunulmuştur. Şekil 4.6’da ise SLM enerji yoğunluğuna (J/mm^3) karşılık numunelerde gözlenen boşluk oranı verilmektedir.

Farklı enerji yoğunluklarında yapılan üretimler neticesinde numunelerde gözlenebilecek en temel fark bulk yoğunlukta başka bir deyişle boşluk oranında olacaktır. Şekil 4.6 incelendiğinde enerji yoğunluğunun artmasıyla her üç malzeme ile üretilen poroz plaka numunelerin boşluk oranında azalma gözlemlenmiştir. Bu çalışmaya konu olan cihaz ve malzemeler için enerji yoğunluğunun bir miktar daha artırılmasıyla teorik tam dolu numune üretimine bir miktar daha yaklaşılabileceği düşünülmektedir. Fakat enerji yoğunluğunun belirli bir eşik değerini aşmasıyla cihaz tablasında saçılma ve sıçramaların oluşacağı unutulmamalıdır. Bu durumda boyutsal hassasiyetin kaybolması ve/veya boşluk oranının tekrar artış trendine girmesi söz konusudur. 316L ve CoCrW numunelerinde benzer enerji yoğunluğu seviyesinde birbirine yakın boşluk oranları gözlenirken, Ti6Al4V numunesinde ise düşük boşluk oranları elde edebilmek için

nispeten yüksek enerji yoğunluklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum Ti6Al4V alaşımının diğer numunelere göre yüksek ergime noktasına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ek olarak mevcut deney tasarımı için CoCrW ve Ti6Al4V numunesi için teorik tam doluluğa oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında teorik tam doluluk her zaman arzu edilen bir durum olmayabilir. Örneğin bazı termal uygulamalar akışın hareketine imkan tanıyan poroz ortamlar gerektirir. Bu gibi durumlarda mekanik özellikler ikinci plandadır ve gözenekli üretim tercih edilir. Bunun için düşük enerji yoğunluğunda SLM prosesleri iyi bir alternatif olarak düşünülebilir.

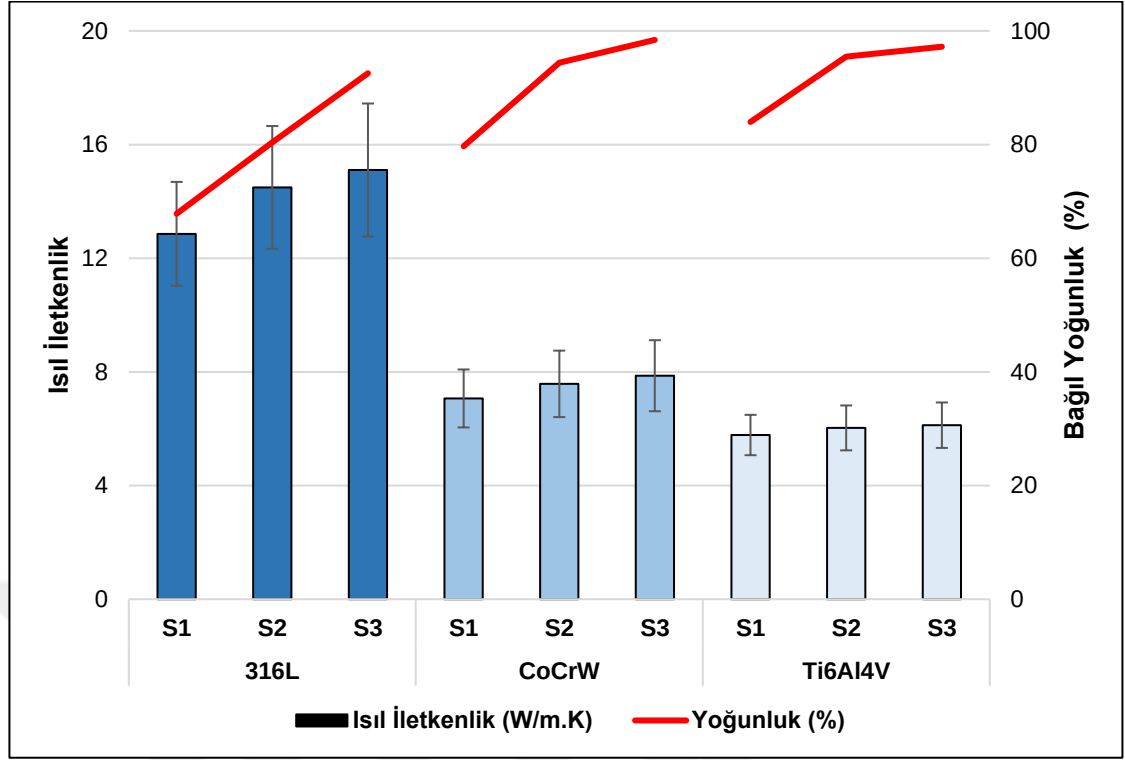
Çizelge 4. 1. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6Al4V numunelerinin yoğunlukları.

Malzeme	Numune	Yoğunluk (g/cm ³)	
		Ölçülen (bulk)	Teorik
316L	S1	5.42	7.99
	S2	6.42	
	S3	7.40	
CoCrW	S1	6.86	8.60
	S2	8.12	
	S3	8.46	
Ti6Al4V	S1	3.72	4.43
	S2	4.23	
	S3	4.31	



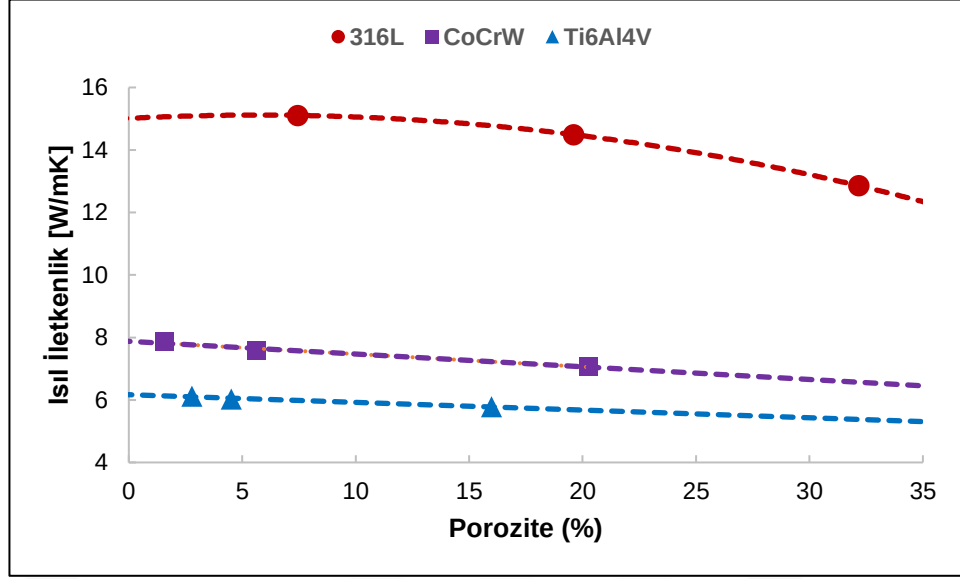
Şekil 4. 6. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin bağlı gözeneklilik (porozite) değerleri.

Şekil 4.7’de numunelerin ısı iletkenlik değeri doluluk oranı ile birlikte sunulmuştur. Temelde bir malzeme özelliği olan ısı iletkenliğin malzemedeki doluluk oranından büyük oranda etkilendiği bilinmektedir. Hatta bu boşlukların birbirlerine bağlı veya bağımsız olması da ısı iletkenliğin değerlendirilmesinde önemli bir husustur. Şekil 4.6 incelendiğinde en yüksek ısı transferi sonuçlarının 316L alaşımı için elde edildiği görülmektedir. Sonrasında sıralama CoCrW ve Ti6Al4V alaşımları şeklinde olmuştur. Her üç alaşım için de boşluk oranının azalmasıyla ısı iletkenlik değeri beklenildiği gibi artmıştır. Bu durum atmosfer şartlarında boşluk olarak değerlendirilen hacimlerin hava ile dolmasıyla ilgilidir. Durgun hava çok iyi bir termal yalıtkan olarak değerlendirilir. Çünkü normal şartlarda 0.026 W/m°C gibi oldukça düşük bir iletkenlik katsayısına sahiptir. Boşluk olarak değerlendirilen hacimlerin hava vb. düşük iletkenlik katsayısına sahip gazlarla dolması ısı iletkenlik katsayısında düşüşe sebebiyet vermektedir. Yüksek ısı iletkenlik termal uygulamalar için ciddi bir avantajdır. Mevcut sonuçlar termal uygulamalar için 316L paslanmaz çelik malzemesinin incelenen diğer malzemelere göre kullanılabilir olduğunu göstermektedir.



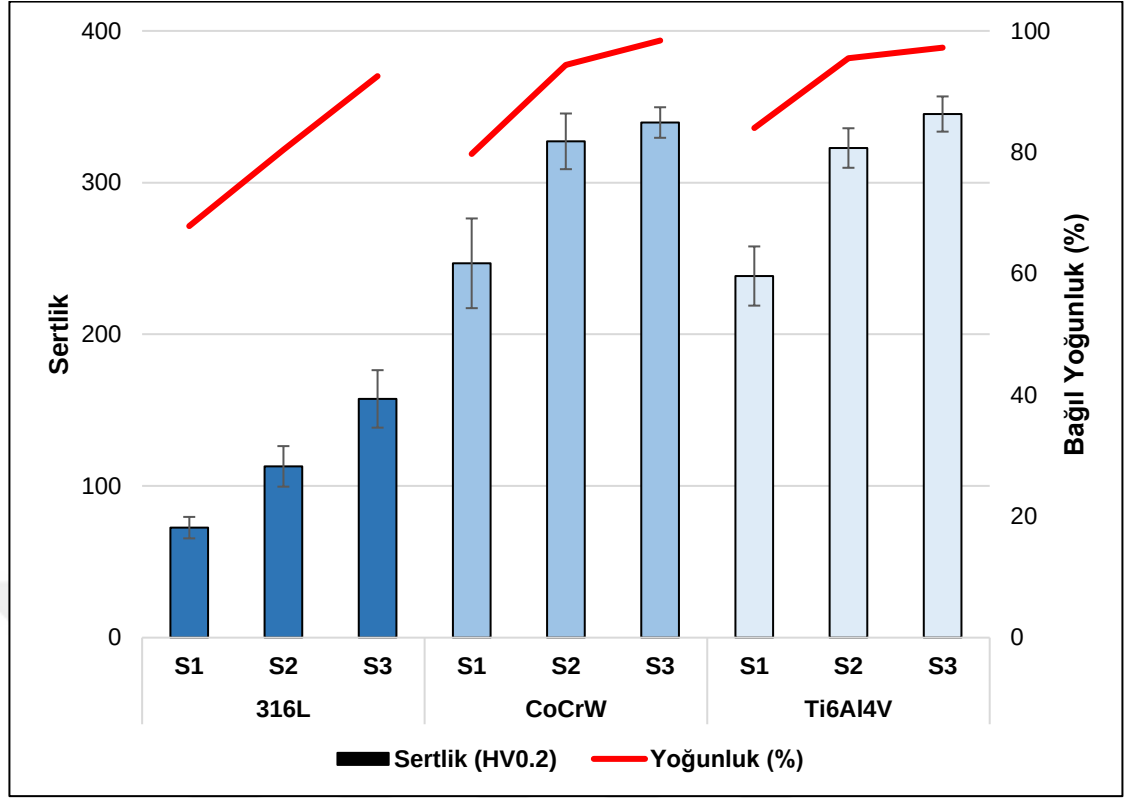
Şekil 4. 7. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin ısı iletkenlik değeri.

Tüm numuneler için bağıl gözeneklilik ile ısı iletkenliği değerlerinin değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde, 316L paslanmaz çelik malzemenin ısı iletkenliği değerlerinin, porozitedeki değişimlerden önemli ölçüde etkilendiği açıkça görülmektedir. Bu durum, 316L paslanmaz çeliğin doğası gereği yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, daha düşük ısı iletkenliğine sahip CoCrW ve Ti6Al4V gibi malzemeler, üretim sürecindeki bağıl gözeneklilik değişimlerine daha az duyarlılık göstermektedir. Bu gözlemlenen eğilimler, ön tahminler sunmakla birlikte, farklı üretim koşulları ve değişken proses parametreleri altında elde edilen numune sonuçlarının analiziyle daha da geliştirilebilir. Bu tez çalışması, malzeme karakterizasyonu için uygun modellerin geliştirilmesine olanak sağlayarak tahmin sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artıracaktır.



Şekil 4. 8. Isıl iletkenlik ile bağıl gözeneklilik (porozite) değişimi.

Farklı doluluk oranlarındaki numunelerin Vickers sertlik değerleri Şekil 4.9’da sunulmuştur. SLM proses parametrelerinin, başka bir değişle enerji yoğunluğunun malzeme sertliği ile güçlü bir ilişkisi olduğu bilinmektedir. Her üç malzeme için de malzeme doluluk oranının artışıyla sertlik değerleri belirgin şekilde artmıştır. Sertlik yönüyle CoCrW ve Ti6Al4V numunelerinde oldukça yakın sonuçlar elde edilirken, 316L numunelerinde sertlik değerleri bu numunelerin bir miktar gerisinde kalmıştır. Ayrıca düşük boşluk oranlarında 300 HV seviyesinin üstünde oldukça yüksek sertlik sonuçları elde edilmiştir. SLM yöntemi ile üretilen numunelerde soğuma havuzunda nispeten hızlı soğuma oluşmaktadır. Bunun neticesinde mikro yapı değişmektedir. Düşük boşluk oranlarında elde edilen yüksek sertlik değerleri, hızlı soğuma sonucu oluşan mikro yapı değişikliklerinden ileri gelmektedir.

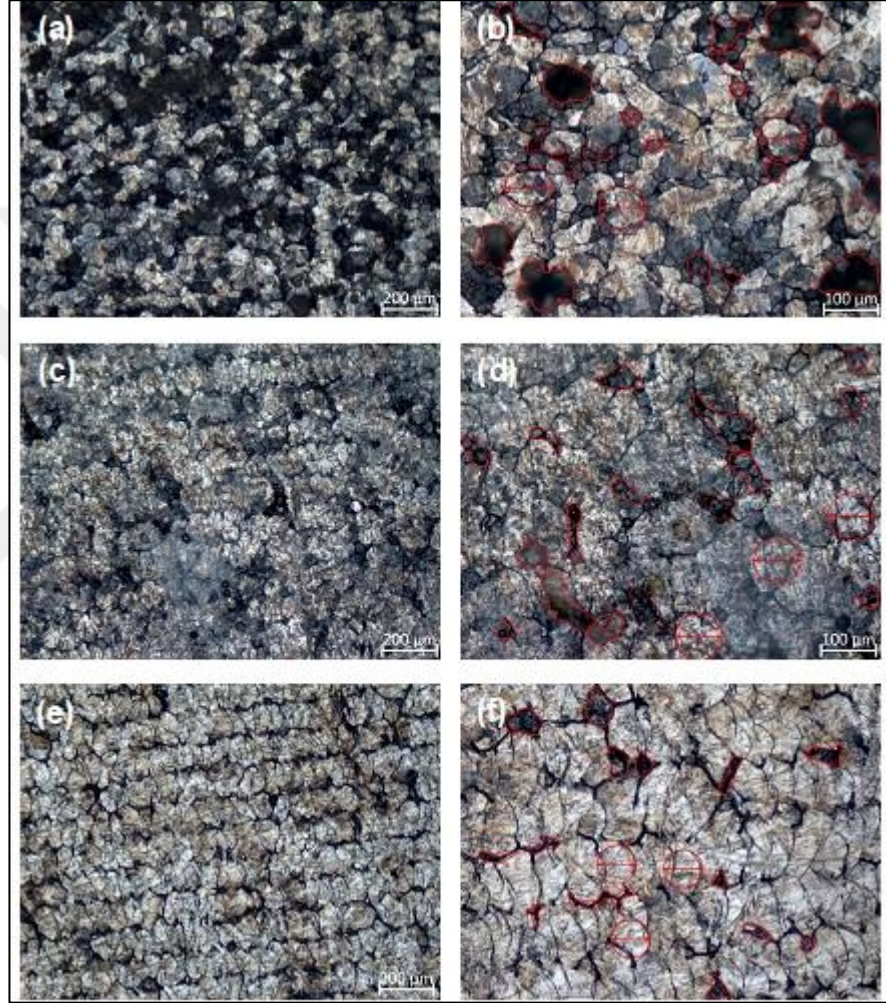


Şekil 4. 9. SLM ile üretilmiş 316L-CoCrW-Ti6AL4V poroz plaka numunelerin sertlik değerleri.

SLM üretim süreçlerinde numenin mikro yapısı, toz özellikleri, lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı gibi çeşitli işleme parametrelerinden etkilenmektedir (Mandev et al 2024). Şekil 4.10'da, 316L alaşımıyla üretilen numuneler için optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Görsellerin yalnızca 316L alaşımıyla sınırlı olması, bu malzemenin ısı uygulamaları için önerilmesiyle ilişkilidir; bu öneri, 316L'nin ısı ve yüzey özelliklerinin kapsamlı değerlendirilmesine dayanmaktadır. Şekil 4.10'da ki (a, b), (c, d) ve (e, f) görselleri sırasıyla 316L S1, S2 ve S3 numunelerine ait olup, 10x ve 20x büyütmeyle elde edilmiştir.

Şekil 4.10 (a ve b), Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, %30'un üzerinde bir gözenekliliği doğrulamaktadır. Ayrıca, yetersiz ergime bölgeleri nedeniyle tane boyutlarında tutarsızlık gözlemlenmektedir. Geniş bir tane boyutu dağılımı da dikkat çekmektedir. Şekil 4.10 (c ve d), gözenekliliğin %20'nin altında olduğu ve görsel yoğunluk bakımından belirgin şekilde daha az boşluk içeren, daha dar bir tane boyutu dağılımını göstermektedir. Şekil 4.10 (e ve f) ise S3 numunesinin bilinçli olarak gözeneksiz tasarlanmış yapısına ait optik mikroskop görüntülerini sunmaktadır. Bu numunede, 100 W lazer gücü seçilmiş ve diğer

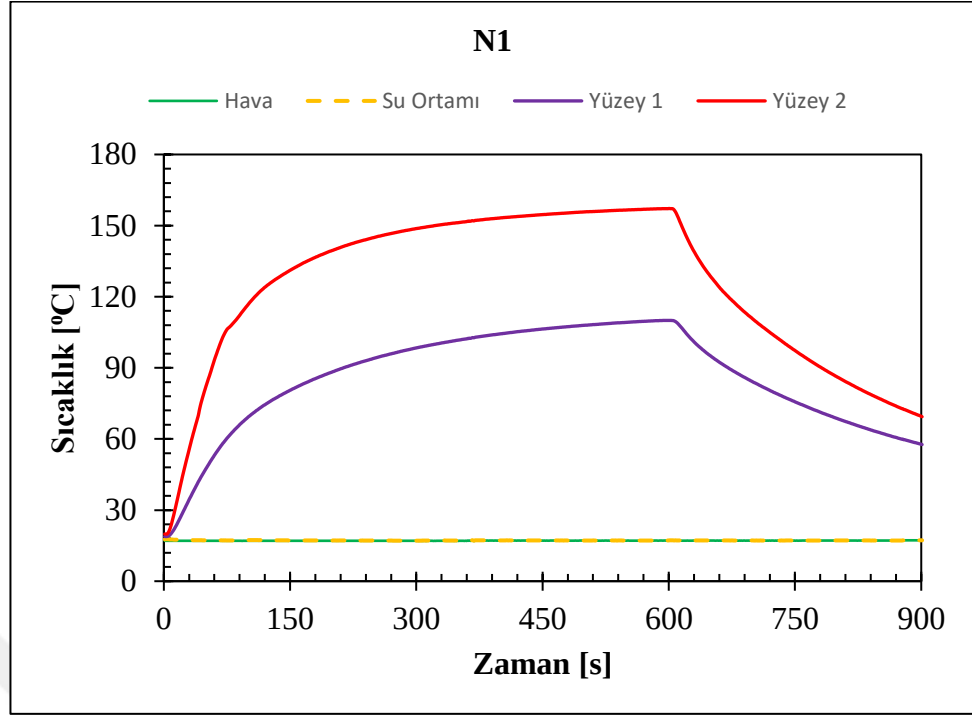
iki numuneye kıyasla daha yoğun bir enerji işlemi uygulanmıştır. Sonuç olarak, bu numunenin tane yapısı, diğer iki numuneden daha ince bir yapı sergilemektedir. Ayrıca, bu numunelerde, eklemeli imalat süreçlerine özgü katmanlı bir mikro yapı gözlemlenmektedir. Bu yapı, lazer ışını tarafından oluşturulan eriyik havuzlarının meydana getirdiği ve SLM sürecine özgü hızlı katılma ve yüksek soğuma hızlarından kaynaklanan bir morfoloji ile tanımlanmaktadır (Liverani et al. 2017)



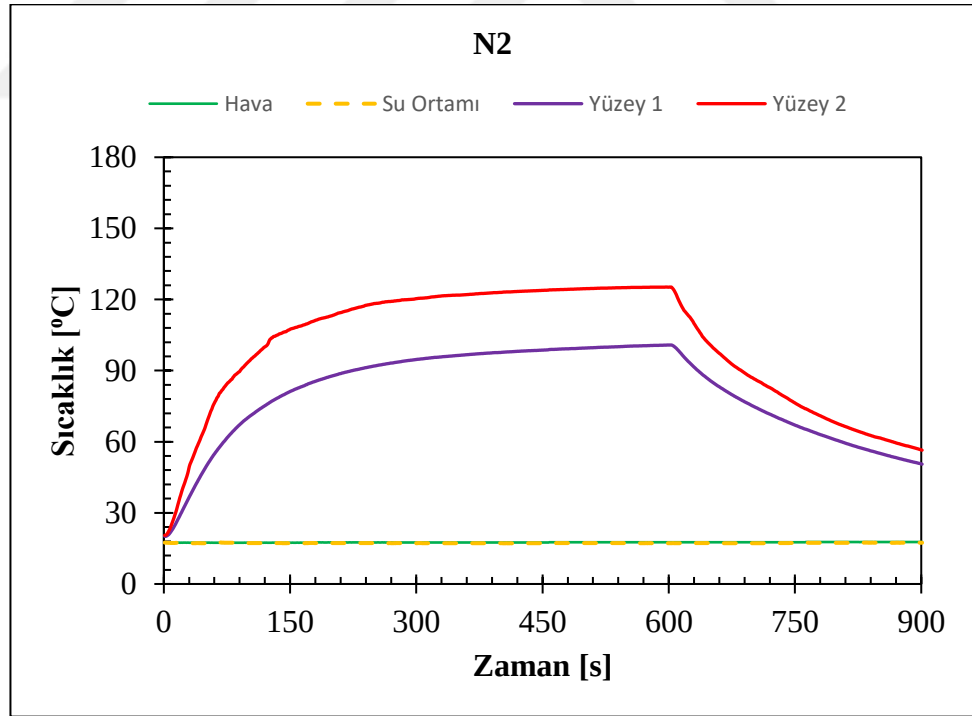
Şekil 4. 10. SLM ile üretilmiş 316L poroz plaka numunelerin optik mikroskop görüntüleri (a-b) S1, (c-d) S2, (e-f) S3.

4.6. Isı Transferi ve Akış Görüntüleme Deney Sonuçları

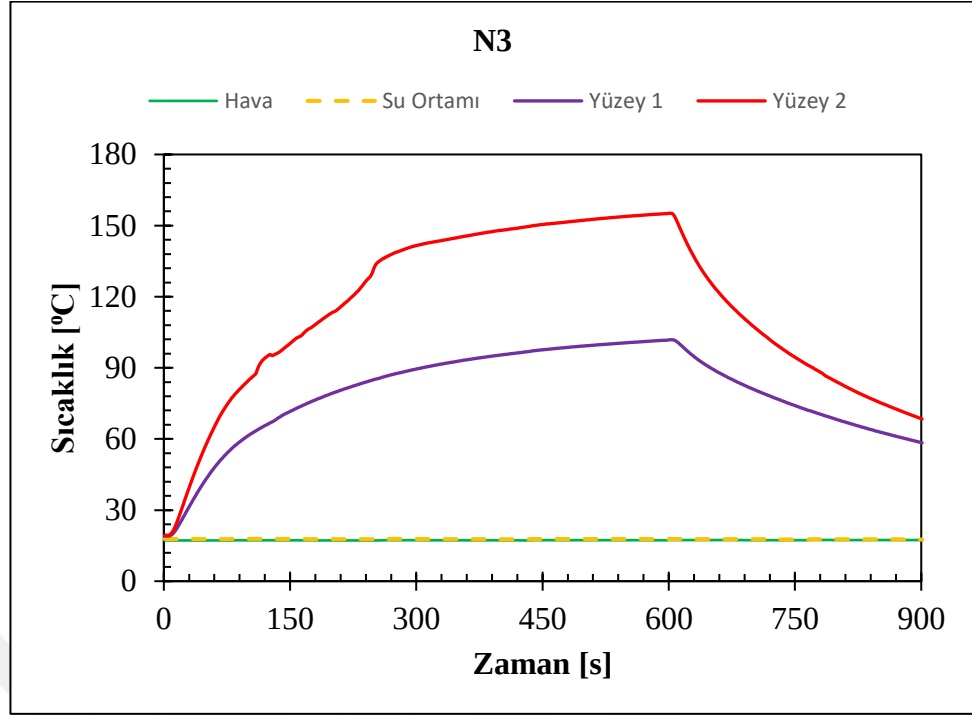
Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen ısı transfer deney sonuçları, Şekil 4.11-18 arasında N1'den N8'e kadar tüm ağaç benzeri yapı numuneleri için grafikler halinde verilmiştir. Bu grafiklerin her biri detayları 3. bölümde açıklandığı şekilde hava, su ortamı ve iki farklı yüzey sıcaklığı olmak üzere dört adet sıcaklık eğrisi içermektedir. Yüzey 2 olarak seçilen noktanın Yüzey 1'e oranla numune merkezine daha yakın olması sebebiyle bu noktanın sıcaklığı nispeten daha yüksek seviyelerde seyretmiştir. Bu grafiklerden de görülebileceği üzere tüm numuneler başlangıçta 600 saniye süren ısıtma periyotları geçirmektedir. Yüzey 2 sıcaklıkları göz önüne alındığında, sabit ısı akısı altında numunelerde yaklaşık olarak 150. saniyeye kadar hızlı bir sıcaklık artışı gözlenirken devamında sıcaklık yatay bir trend sergilemekte ve kararlı hal durumuna yaklaşmaktadır. Tüm numuneler için ısıtma periyotları sonunda Yüzey 1 ve Yüzey 2 sıcaklıkları maksimum değerlerini almaktadır. Ardından ısı akısının kesilmesiyle numuneler 300 saniyelik soğuma periyoduna girer ve yüzey sıcaklıkları hızla düşer. Her bir numunede geometrik özelliklerdeki değişikliklerden ötürü ısıtma periyodu neticesinde farklı tepe sıcaklıklar söz konusudur. Sabit ısı akısı altında tepe sıcaklıkları düşük olan numunelerin termal yönetim yönüyle daha başarılı bir performans göstermesi söz konusudur. Buna ek olarak tüm grafiklerde hava olarak gösterilen ortam hava sıcaklığının 17 ila 18 °C arasında neredeyse sabit bir karakteristikte seyretmesi tüm deneyler için standart çevre şartlarının sağlandığına işaret etmektedir. Ayrıca su ortamı olarak verilen ısıtmanın deneyler boyunca sabit seyretmesi terlemeli soğutmanın doğası gereği beklenen bir sonuçtur ve deneyler süresince terlemeli soğutma mekanizmasının sorunsuz olarak işlediğinin kanıtıdır.



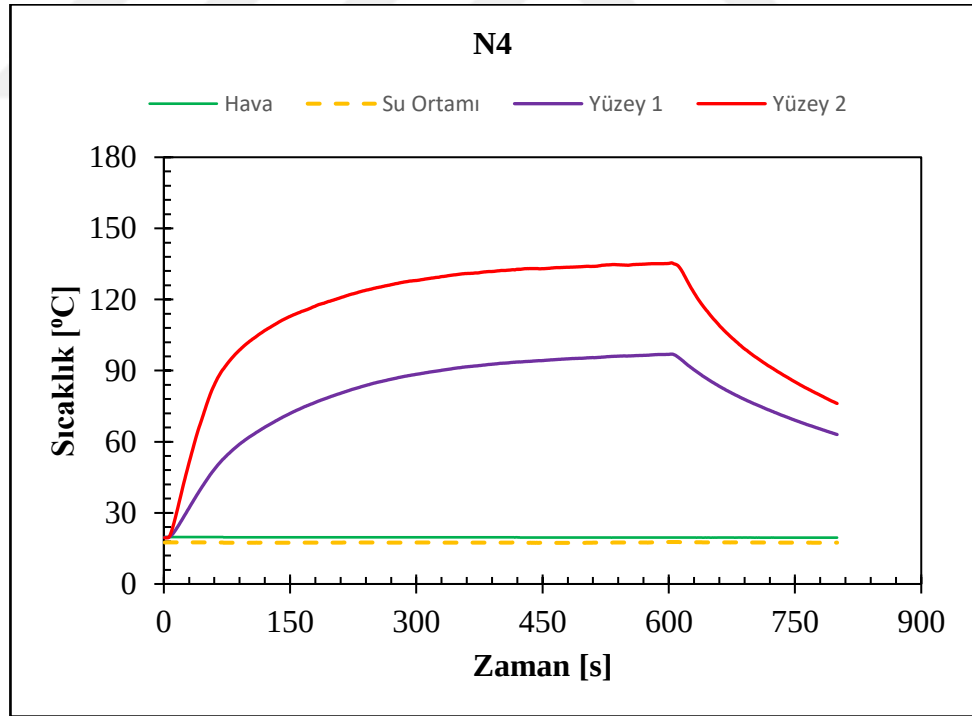
Şekil 4. 11. N1 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.



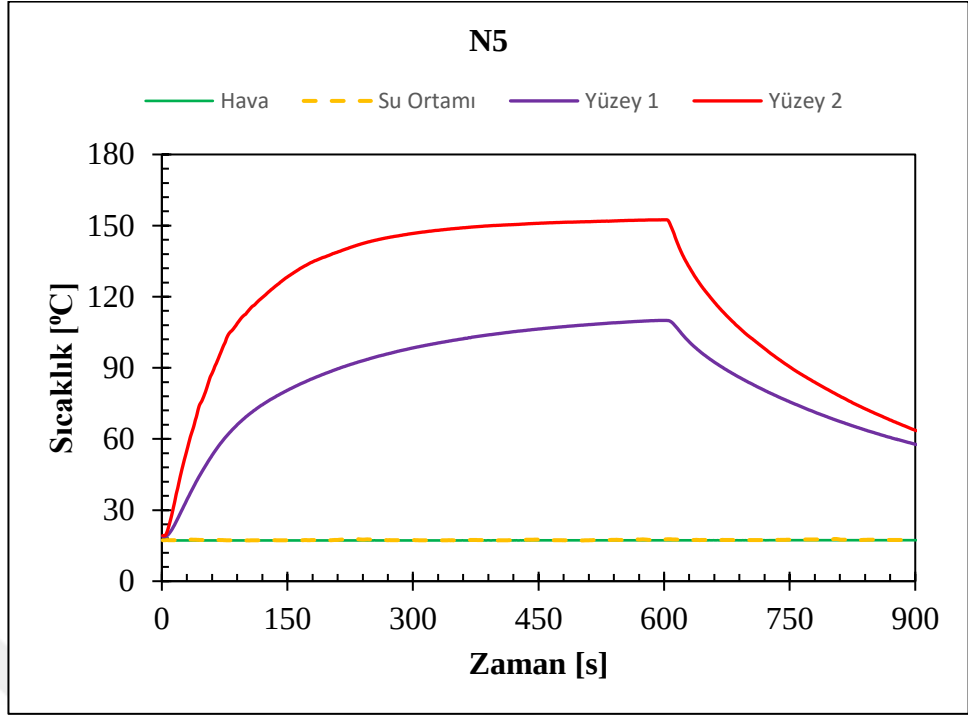
Şekil 4. 12. N2 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.



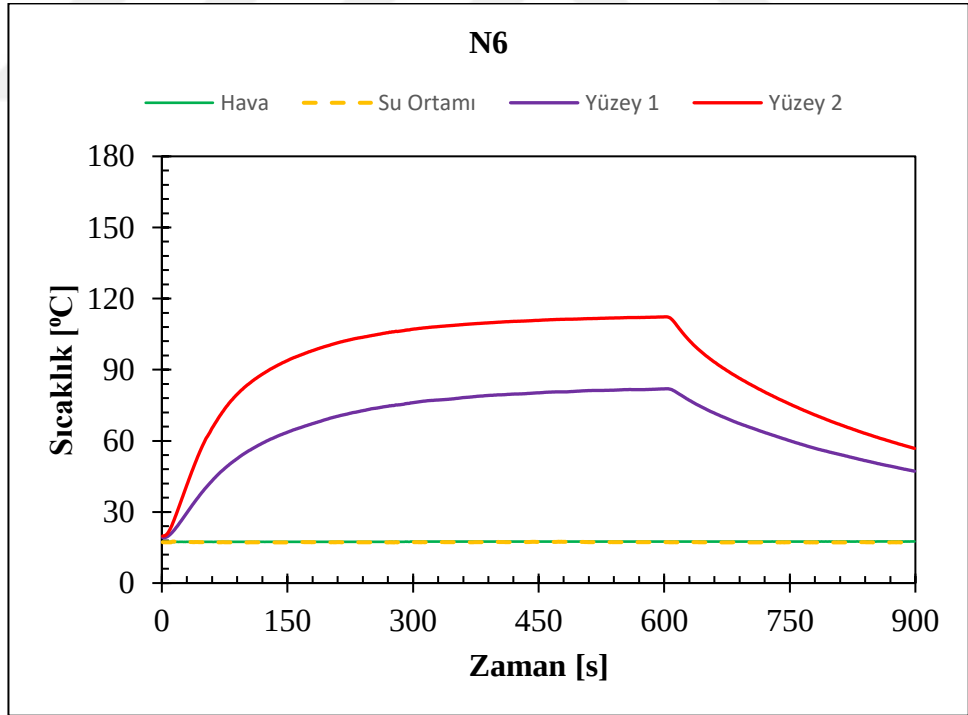
Şekil 4. 13. N3 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.



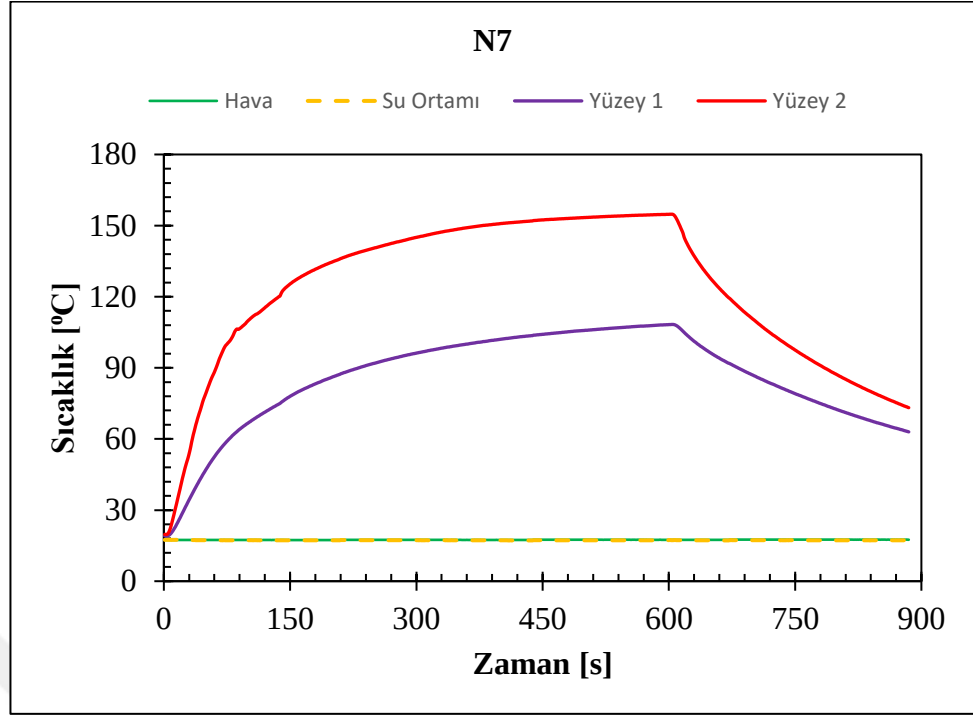
Şekil 4. 14. N4 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.



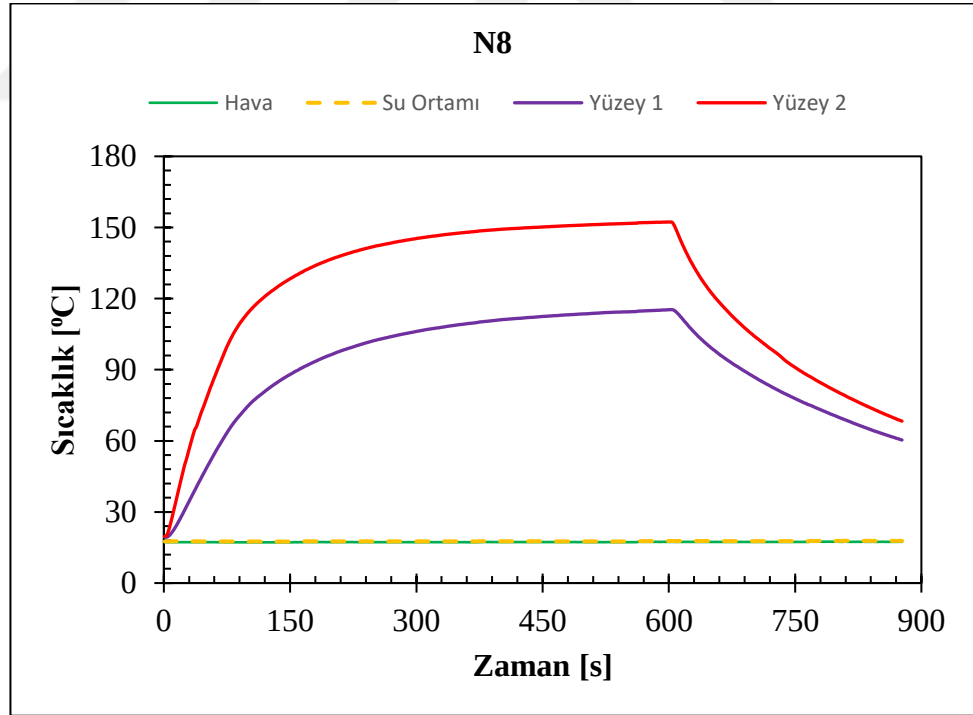
Şekil 4. 15. N5 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.



Şekil 4. 16. N6 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.



Şekil 4. 17. N7 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.



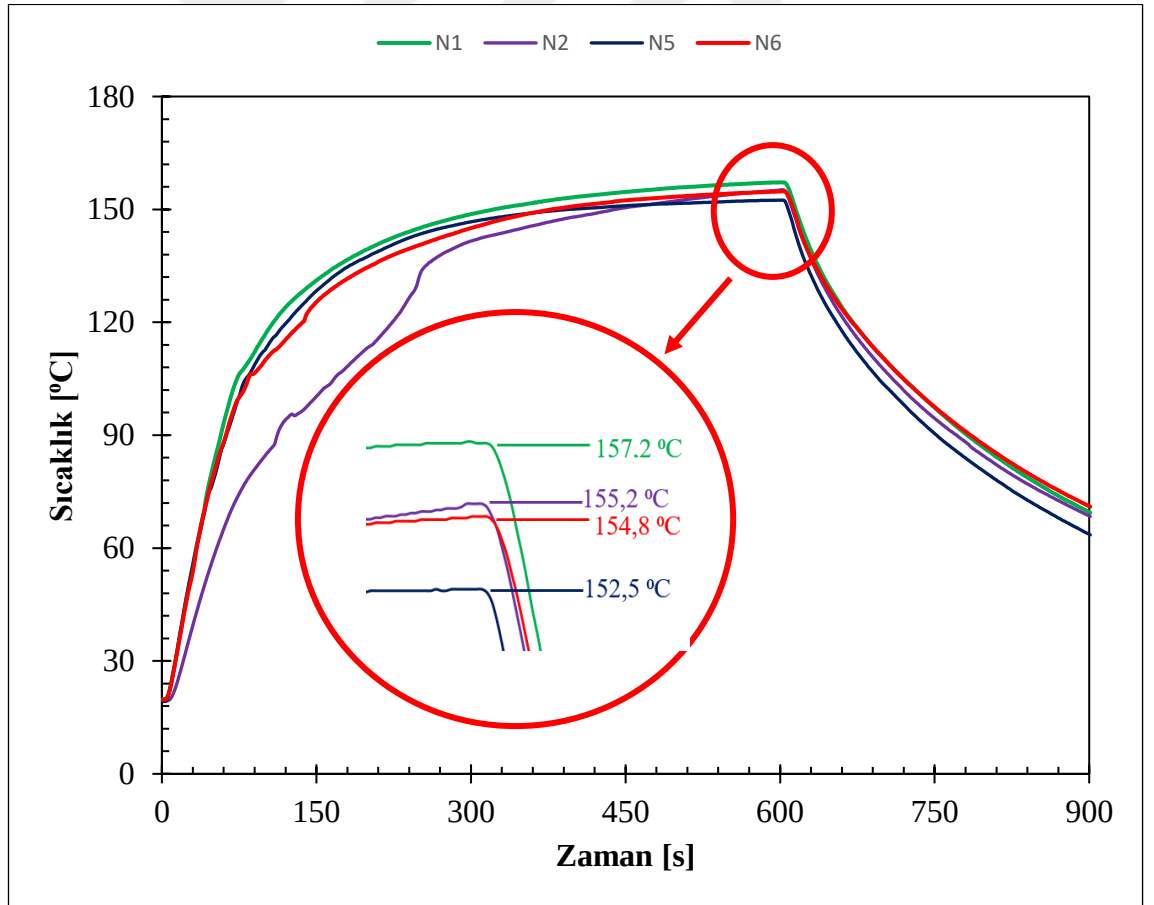
Şekil 4. 18. N1 nolu ağaç benzeri yapı numunesinin sıcaklık zaman grafiği.

Şekil 4.19 ve 4.20’de sırasıyla N1-N2-N5-N6 (30×39×39 mm) numuneleri ve N3-N4-N7-N8 (30×30×30 mm) numuneleri için yüzey sıcaklıklarının deney süreleri boyunca değişimleri sunulmuştur. Şekil 4.20 incelendiğinde sırasıyla N1, N2, N5 ve N6 numuneleri için tepe sıcaklıklarının sırasıyla 157,2, 155,2, 152,5 ve 154,8 °C seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yüzey sıcaklığı olarak en düşük seviyede kalan yani ısı transferi performansı en iyi olan numune N5 numunesi olurken en düşük performansı ise N1 numunesi göstermektedir. Bu iki numune arasında 4,7 °C fark oluşmuştur. Benzer bir değerlendirme Şekil 4.21 için de yapılabilir. Şekilde verilen detay incelendiğinde, sırasıyla N3, N4, N7 ve N8 numuneleri için tepe sıcaklıklarının sırasıyla 125,2, 135,2, 112,3 ve 152,3 °C olduğu görülebilir. Bu grupta ise en iyi performans N7 numunesine ait iken en kötü termal performansı N8 numunesi sergilemiştir. Burada gözlenen termal performans değişiklikleri numunelerin geometrik özelliklerindeki farklılıktan ileri gelmektedir.

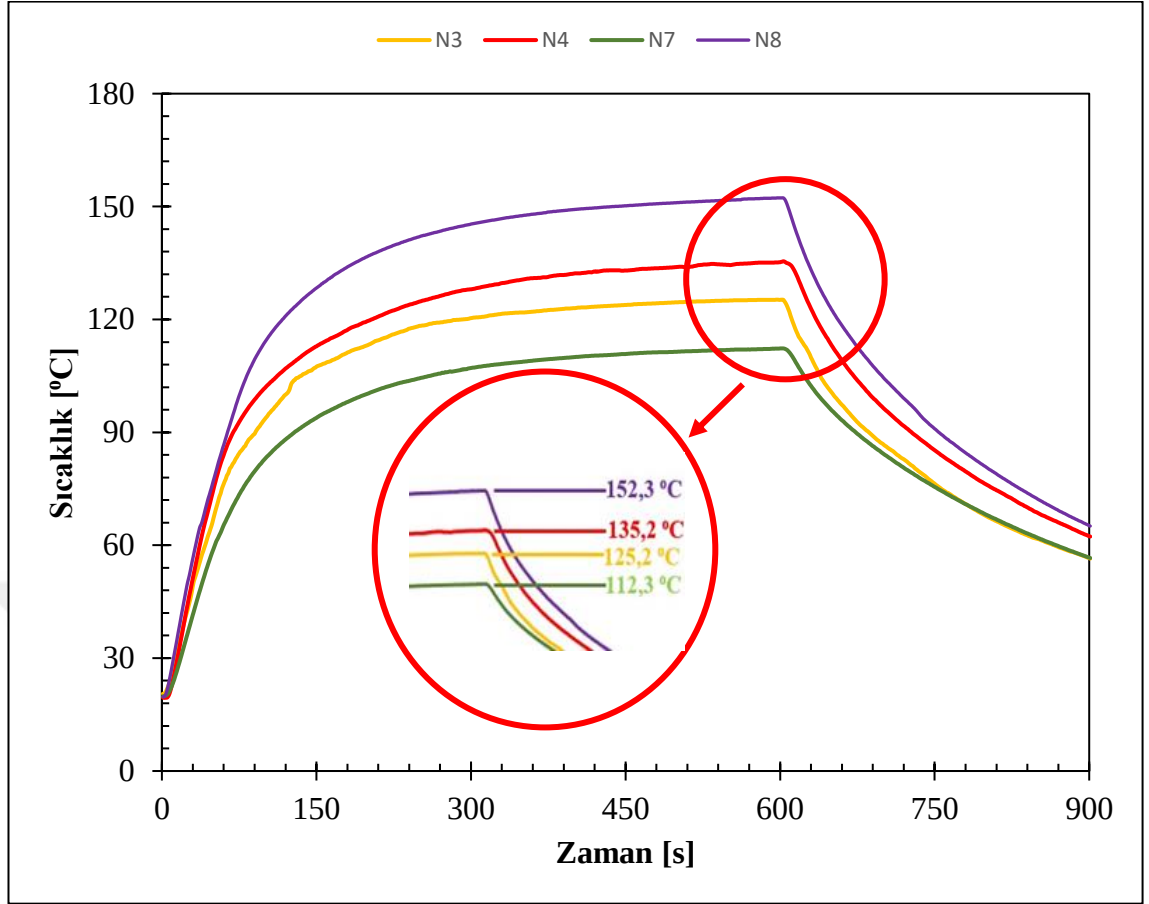
Nispeten düşük performans gösteren N1-N2 ve N3-N4 numunelerinin kanal başlangıç çapları 300 µm seviyesinde iken en iyi performansları gösteren N5-N7 numuneleri daha geniş kanal başlangıç çaplarına (500 µm) sahiptir. Buradaki iyileşmenin artan kanal çapları nedeniyle ısı transfer yüzey alanında meydana gelecek artıştan ileri geldiği düşünülmektedir. Ayrıca daha büyük kanallar ile ısı transfer bölgesine daha fazla akışkan aktarımı söz konusu olabilir ve burada artan kütle akısı daha fazla ısıyı uzaklaştırılmasına katkıda bulunabilir. Yine de kanal çapının fazla artırılması kılcallık etkisini olumsuz etkileyerek yapı içerisindeki akışkan iletimini olumsuz etkileyebilir. Bu durum çapın daha da büyütülmesini kısıtlayan bir engel oluşturmaktadır.

Dallanma oranı bu çalışmaya konu olan ağaç benzeri yapılar için seçilen diğer bir geometrik parametredir. Literatürde bitkiler için dallanma oranının 0,65 ila 0,80 arasında olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada da N1-N2, N3-N4, N5-N6 ve N7-N8 için dallanma oranları için 0,65-0,80 değerleri söz konusudur. Tepe sıcaklık noktaları için bir değerlendirme yapılacak olursa küçük dallanma oranları yani kanallardaki daha keskin geçişler termal performansın yükselmesiyle sonuçlanmıştır. Bu durum kanal keskin geçişlerden kaynaklı sınır tabaka bozulmalarından ileri gelebilir. Ayrıca bu durum kılcallık etkisini artırarak ısı transfer bölgesine daha yoğun akışkan aktarımını da tetikleyebilir.

Bu numuneler üzerinde incelenen bir diğer geometrik parametre ise kopyalama mesafesidir. Bu geometrik parametre başlangıç çapının 6 ve 8 katı olacak şekilde iki seviyede seçilmiş ve 3. bölümde tablo halinde detaylandırılmıştır. En iyi durumlar olan N5 ve N7 numunelerinde kanallar arasındaki kopyalama mesafesi sırasıyla çapın 8 ve 6 katıdır. Yani nihai en iyi termal performans gösteren N7 numunesinde daha yoğun bir kanal yapısı bulunmaktadır. Bu durum ısı transferi yüzey alanının, numune hacmine oranının büyümesi anlamına gelir. Yüksek yüzey alanı – hacim oranı ısı transfer elemanlarında arzu edilen ve yüksek termal performans için önerilen bir durumdur. Neticede en yüksek termal performansı sergileyen N7 numunesi, 500 µm başlangıç kanal çapına, 0,65 dallanma oranına ve çapın 6 katı olacak şekilde kanal kopyalama mesafesine sahiptir. Bu geometrik özellikler diğer numunelerden alınan sonuçlarla birlikte değerlendirildiğinde kanal çapının artmasının, dallanma oranı ve kopyalama mesafesinin ise azalmasının termal performansı olumlu etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 4. 19. N1-N2-N5-N6 nolu ağaç benzeri yapı numunelerinin sıcaklık zaman grafiği.



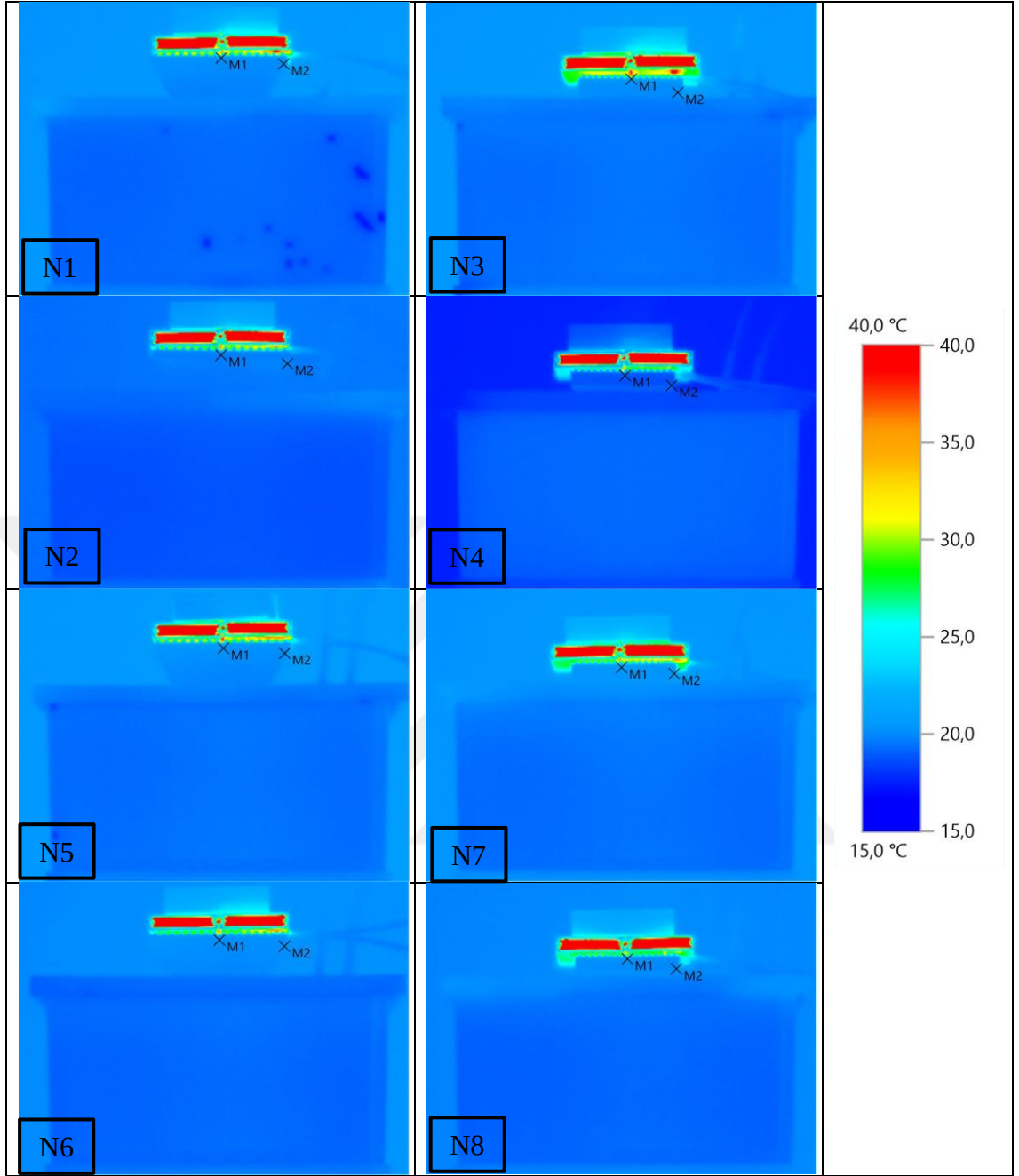
Şekil 4. 20. N3-N4-N7-N8 nolu ağaç benzeri yapı numunelerinin sıcaklık zaman grafiği.

Şekil 4.21, 4.22 ve 4.23’de ağaç benzeri yapı numunelerinin ısıtma periyodunun sırasıyla 20., 300. ve 600. saniyelerindeki termal kamera görüntülemeleri ve bu görüntülere ait sıcaklık skalaları sunulmuştur. Şekil 4.21’deki termal kamera görüntülerinin, ısıtma periyodunun başlangıcına ait olmaları sebebiyle, numuneler için herhangi bir fark söz konusu değildir. Test ısıtıcılarının 40 °C’nin üzerindeki sıcaklıklara çıktığı görülebilir.

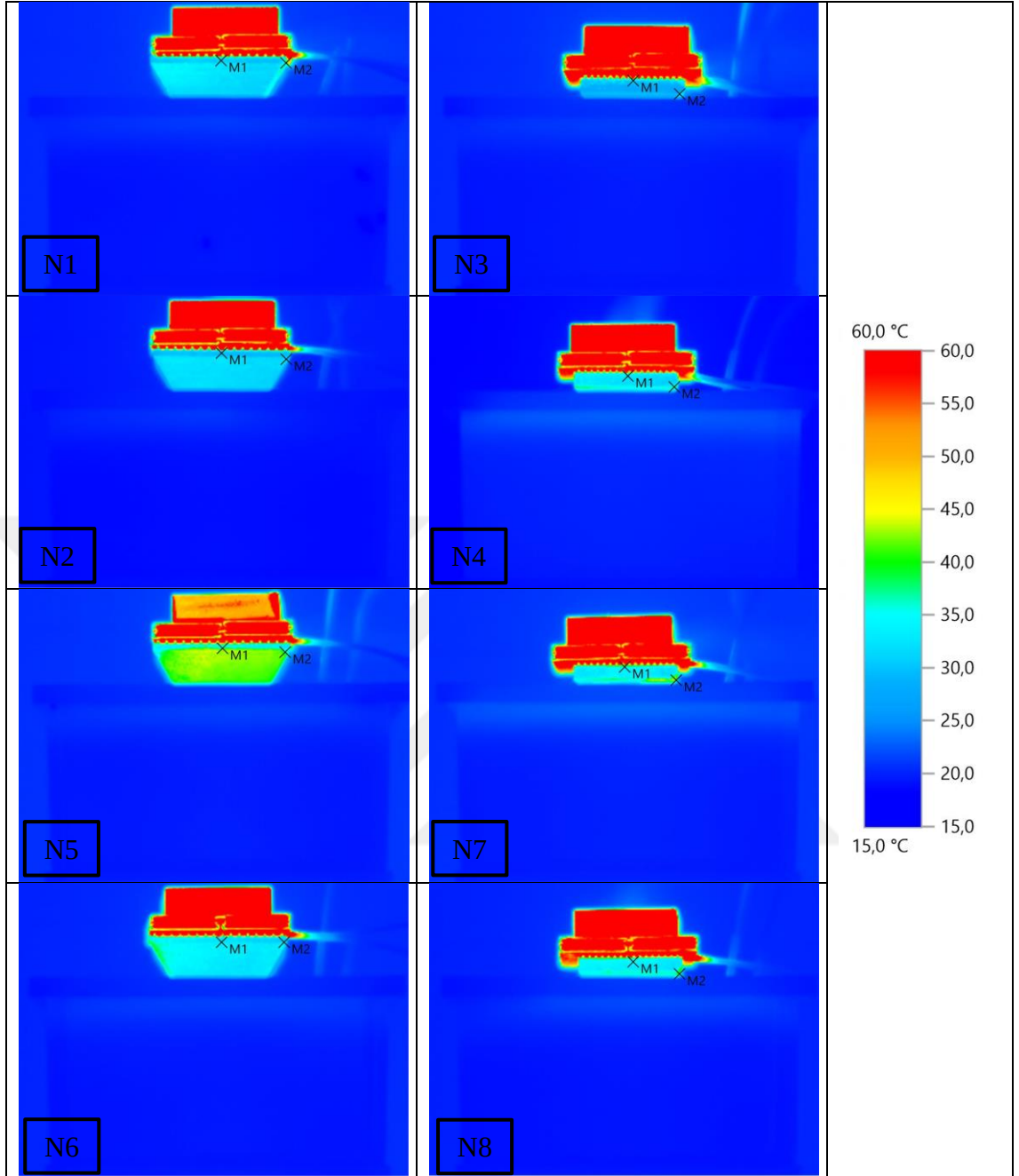
Şekil 4.22’de verilen görüntüler ısıtma periyodunun yarılacağı anı temsil etmektedir. Burada en dikkat çekici görüntü N5 numunesinde ortaya çıkmıştır. Görüntüde plaka numunesinde nispeten düşük bir sıcaklık dağılımı gözlenirken ağaç benzeri yapının yüzeyinde ise daha yüksek sıcaklık değerleri görüntülenmiştir. N5 numunesi için yukarıda verilen sıcaklık zaman grafikleri bu görüntüler ile birlikte değerlendirildiğinde bu durum şöyle açıklanabilir; N5 numunesi N1-N2-ve N6 numunelerine göre daha etkin bir ısı transfer karakteristiği göstermiş ve plakanın ısınması yerine ısı yükünü üzerine

çekerek daha etkili bir soğutma sağlamıştır. Buna karşın, yine yukarıda yapılan değerlendirmeler neticesinde N7’de de benzer bir karakteristik görülmesi beklenirken bu söz konusu olmamıştır. Bu durum diğerlerine göre N3-N4-N7-N8 numunelerinin nispeten daha küçük bir geometriye sahip olması sebebiyle görüntüleme yüzeyindeki yetersizliklerden yani test kurulumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

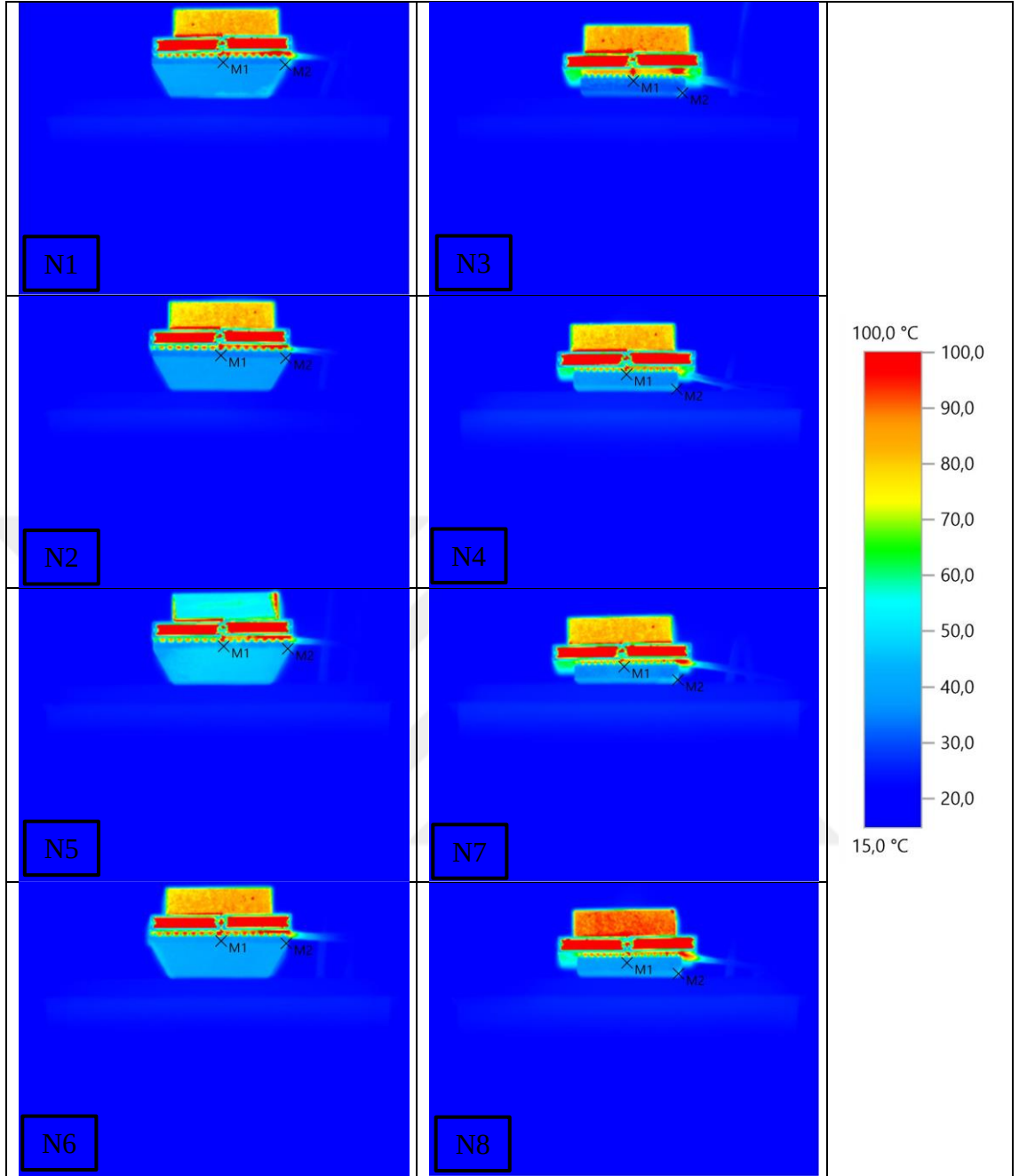
Isıtma periyodunun sonuna ait görseller ise Şekil 4.23’de sunulmuştur. Şekilde plaka sıcaklıkları göz önüne alındığında en yüksek değerler N8, N1 ve N6 numunelerinin bulunduğu kurulumlarda görülecektir. Bu kurulumlarda görülen nispeten yüksek plaka sıcaklıkları, zayıf ısı transferi ile ilişkilidir. Isıtıcı tarafından üretilen sabit ısı akısının ağaç benzeri yapıdaki soğutucular ile sistemden atılması beklenmektedir. N8, N1 ve N6 numunelerinde bu durum nispeten zayıf bir karakteristikte gerçekleşmiştir. Bahsi geçen davranış sıcaklık zaman grafikleri ile de doğrulanabilir. Yukarıdaki grafiklerde (Şekil 4.19 ve 4.20) de en yüksek yüzey sıcaklıkları N8 ve N1 numuneleri için elde edilmiş ve bu numunelere ısı transferi açısından düşük bir performans atfedilmiştir.



Şekil 4. 21. Ağaç benzeri yapı numunelerden 20. saniyede alınan termal kamera görüntüleri

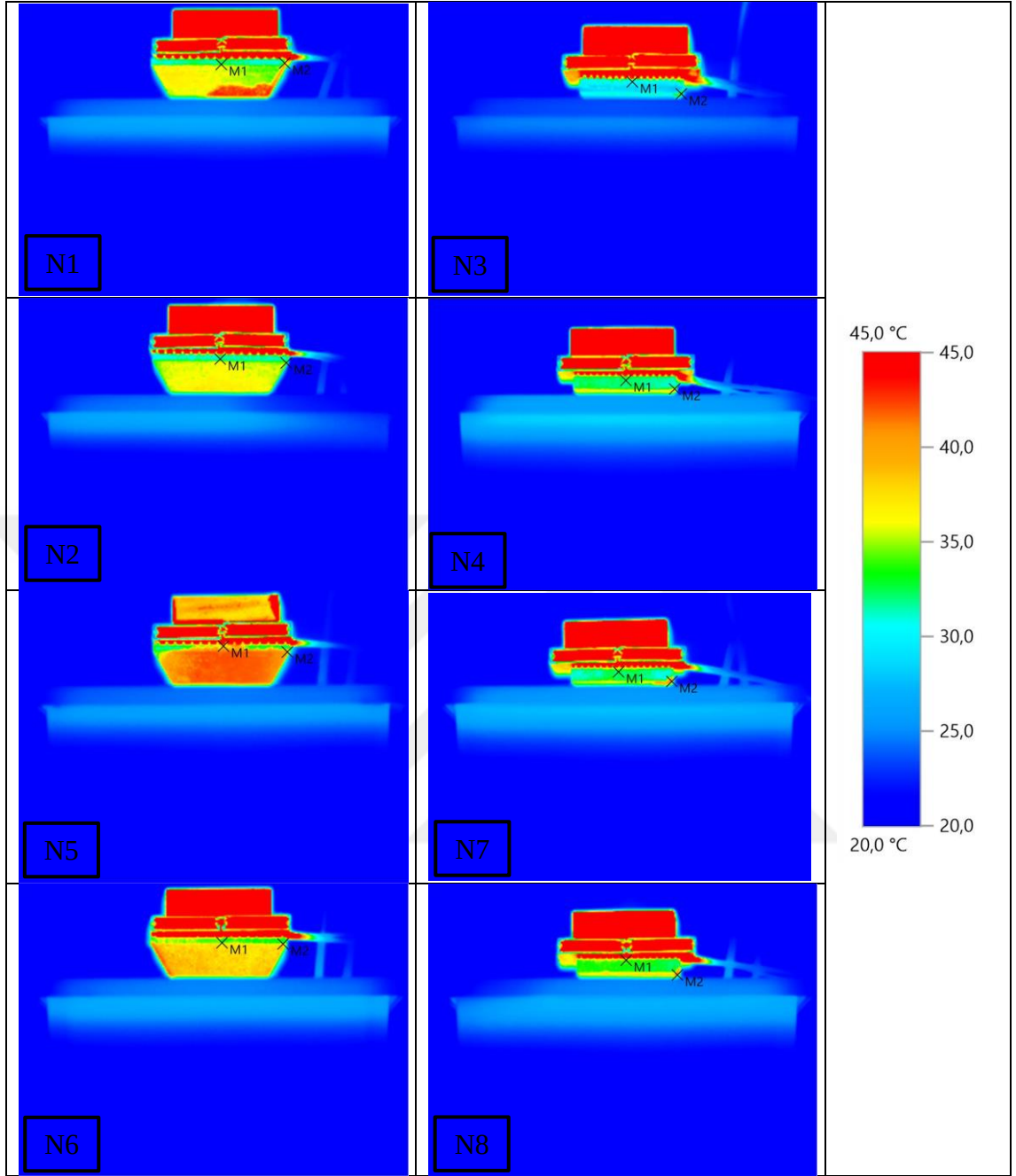


Şekil 4. 22. Ağaç benzeri yapı numunelerden 300. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.

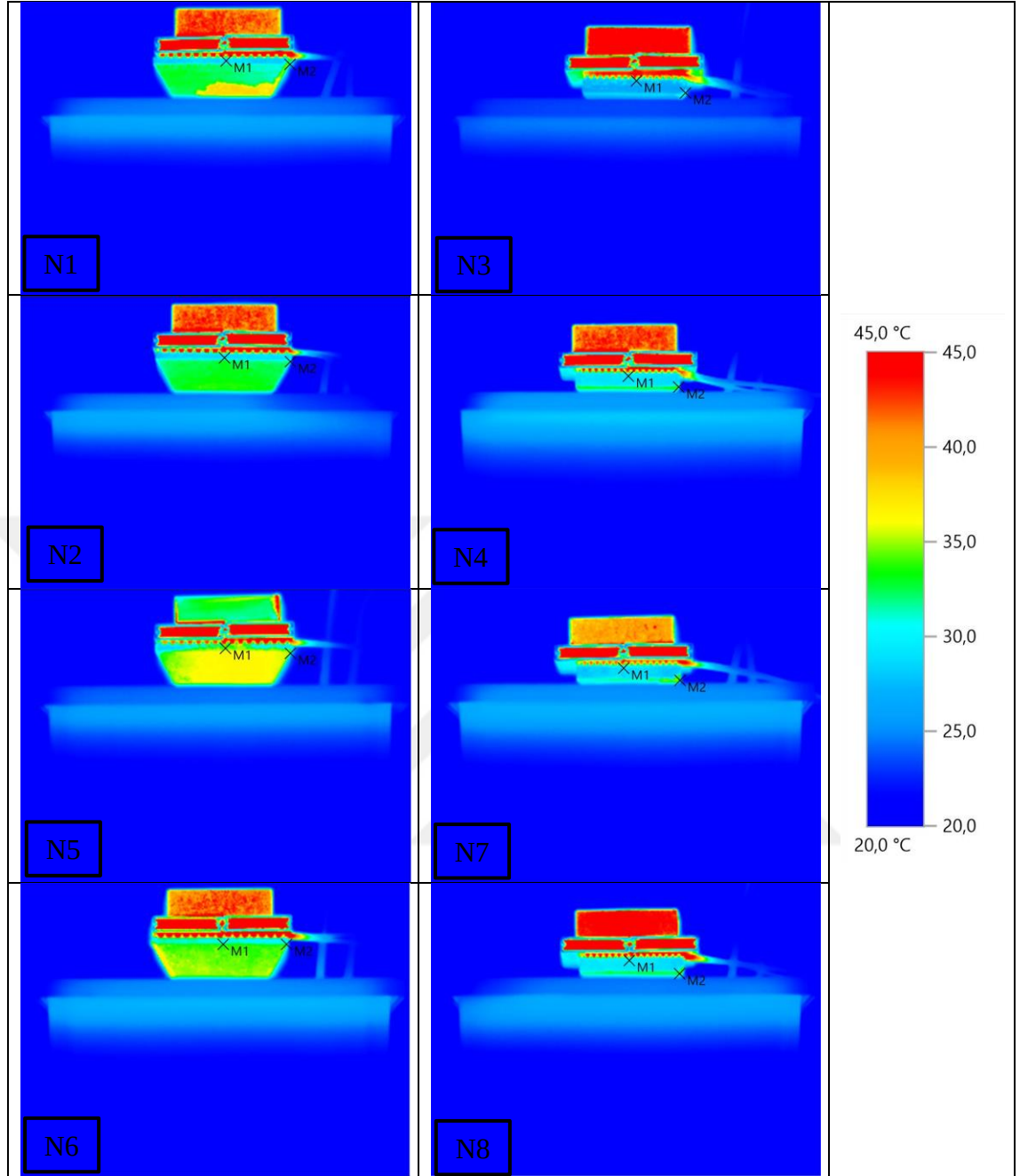


Şekil 4. 23. Ağaç benzeri yapı numunelerden 600. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.

Şekil 4.24 ve 4.25’de ise soğuma periyotlarında alınmış termal kamera görüntüleri sunulmaktadır. Görüntüler ısı transferi deneylerinin sırasıyla 750. ve 900. saniyelerine karşılık gelmektedir. Şekil 4.25 göz önüne alındığında N1 numunesi için numune yüzeyinde belirgin bir sıcaklık sıçraması görülmektedir. Bu istenmeyen bir durumdur. Bu durum söz konusu bölgede ısı transferi etkileşimlerinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, sıçramanın görüldüğü bölüme yakın kanallarda akışın durduğu veya yetersiz seviyeye düştüğü şeklinde yorumlanabilir. N5 numunesinin olduğu kurulumda düşük plaka sıcaklıkları ve düzgün dağılımlı yüksek soğutucu sıcaklıkları söz konusudur ki bu da ısı transferi etkileşimlerinin, N1-N2-N6 numunelerine kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir. Benzer bir yorum Şekil 4.25 için de yapılabilir. 750. saniye için N4, N7 ve N8 numunelerinin termal kamera görüntülerinde belirgin bir fark gözlemlenemezken, 900. saniyedeki termal kamera görüntülerinde N5 numunesinin sıcaklık dağılımına benzer bir sıcaklık dağılımı ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak sıcaklık zaman grafiklerinden elde edilen veriler termal kamera görüntüleriyle örtüşmektedir. Termal kamera görüntülemelerinin sonuçları da sıcaklık zaman grafiklerinde olduğu gibi en etkin ısı transferi konfigürasyonu olarak N5 ve N7 geometrilerini işaret etmektedir.



Şekil 4. 24. Ağaç benzeri yapı numunelerden 750. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.

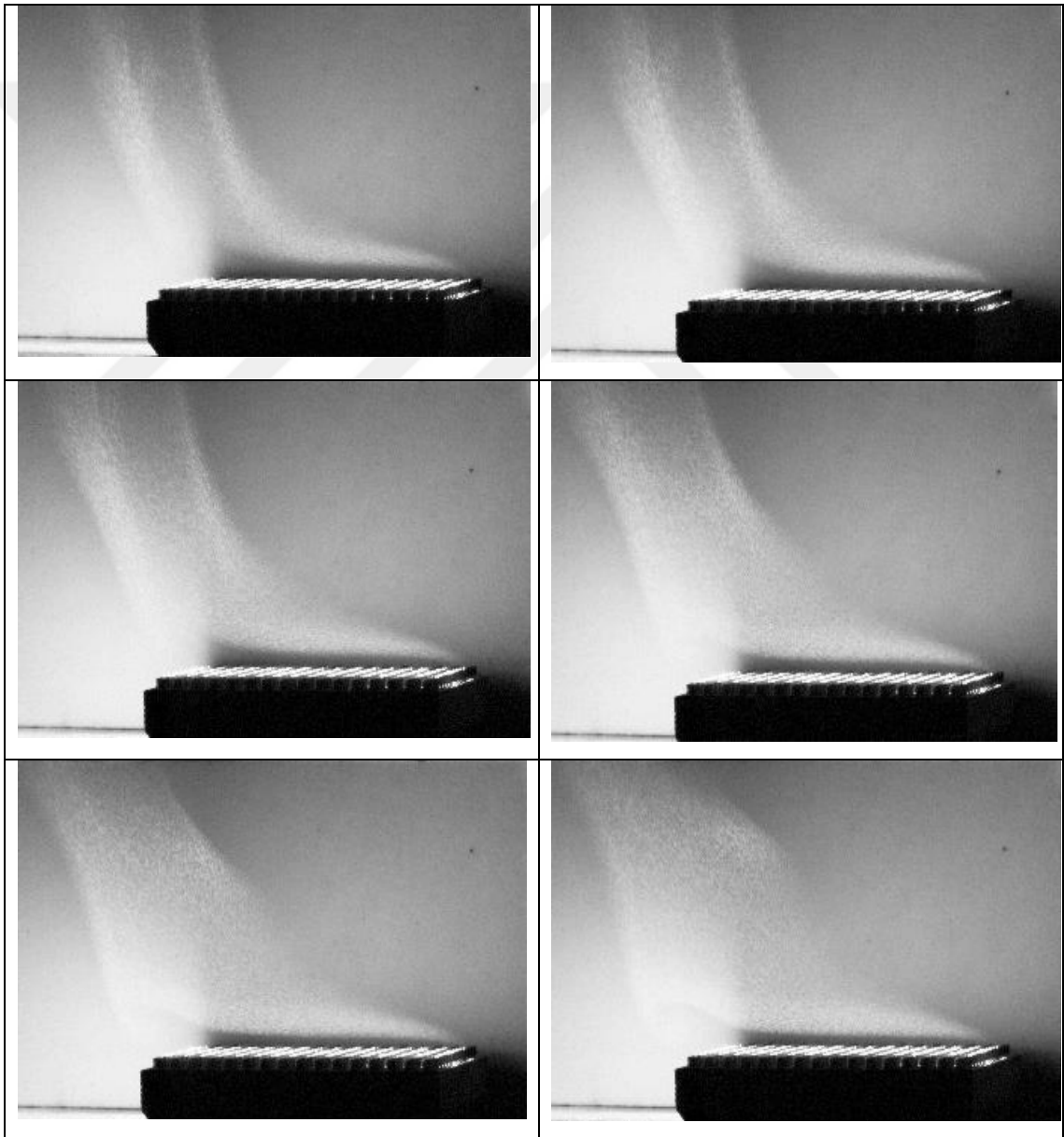


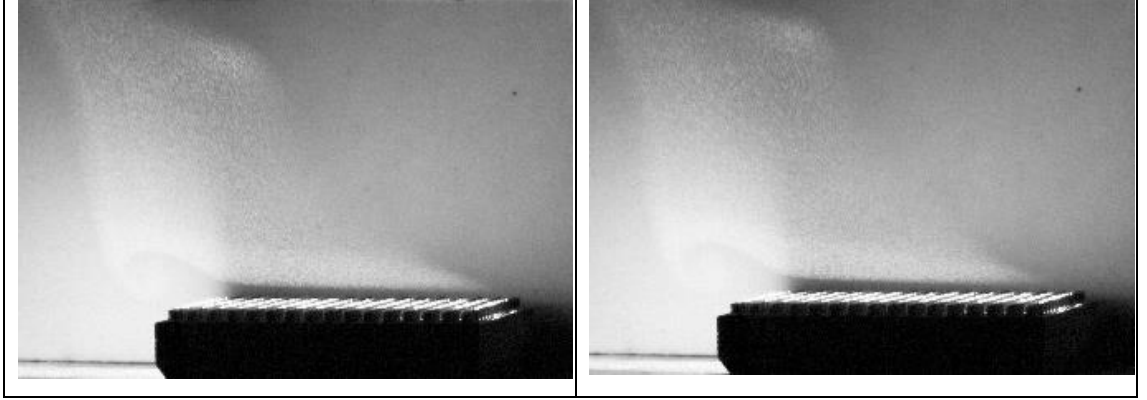
Şekil 4. 25. Ağaç benzeri yapı numunelerden 900. saniyede alınan termal kamera görüntüleri.

Tez çalışmanın bu bölümünde, ısı transferi açısından en iyi performansı gösteren N7 numaralı ağaç benzeri yapı numunesi üzerinde Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) tekniği kullanılarak detaylı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler kapsamında akış alanı görselleştirilmiş, ilgili bölgedeki hız vektörlerinin dağılımları ve büyüklükleri tespit edilmiştir. PIV ölçüm tekniği, akışkan dinamiği çalışmalarında yüksek hassasiyetle

akış özelliklerini analiz etmek için tercih edilen bir yöntem olup, bu çalışmada akışın detaylı bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır.

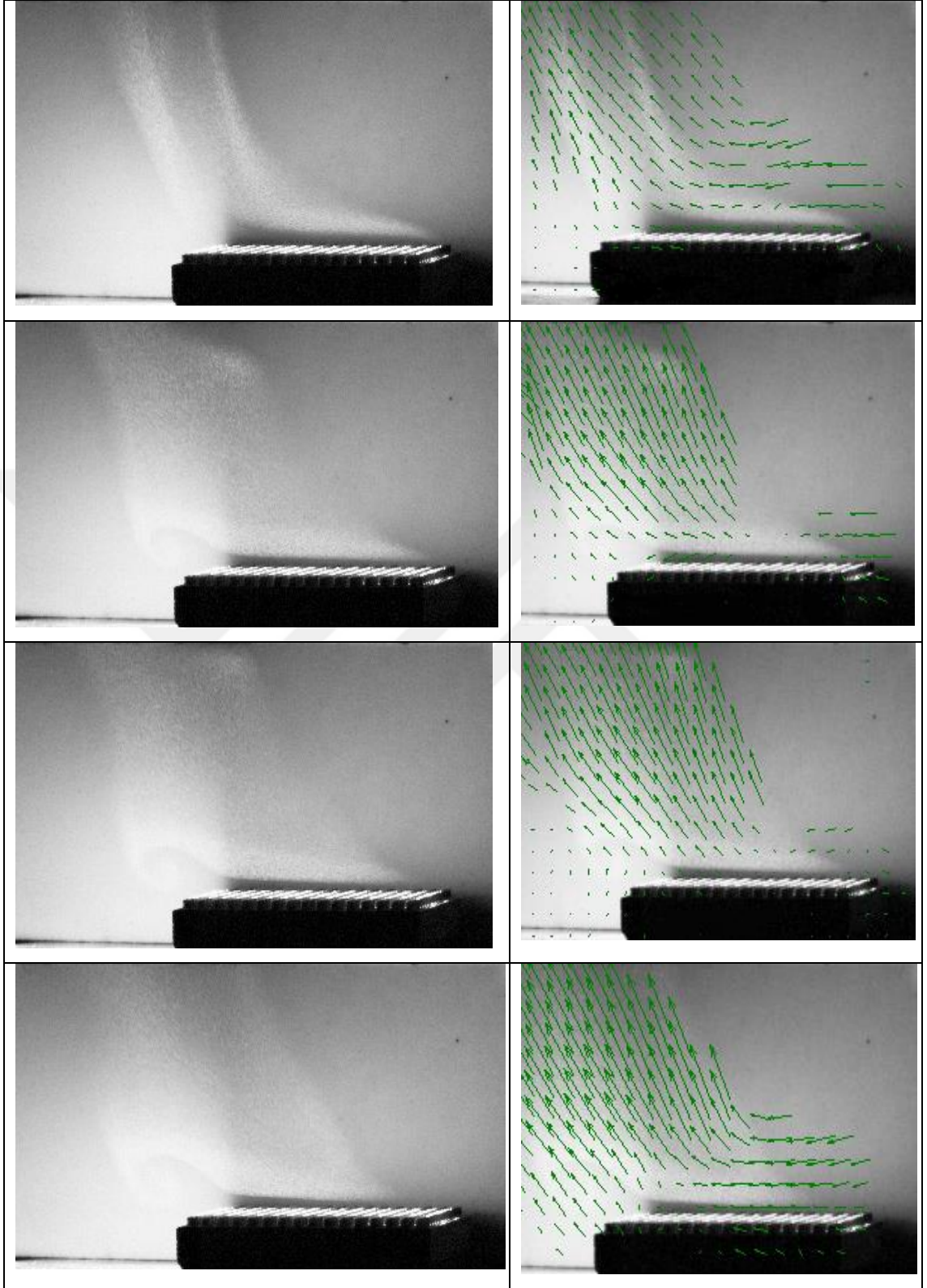
Akış alanının görselleştirme sürecinde, 400 adet görüntü single-frame olarak toplanmıştır. Bu görüntüler hem anlık akış özelliklerini göstermek hem de hız vektörlerinin zaman içindeki dağılımını analiz etmek için kullanılmıştır. Görselleştirilen bu anlık akış alanlarının bazıları Şekil 4.26'da verilmiştir. Bu görseller, akış alanında meydana gelen değişimleri anlamak için başlangıç noktası olarak değerlendirilmiştir.





Şekil 4. 26. N7 numunesine ait anlık akış alanı görselleri.

Toplanan görüntüler üzerinde öncelikle image mean ve image aritmetics gibi ön görüntü işleme teknikleri uygulanmıştır. Bu işlemler, görüntülerdeki parazitlerin azaltılmasına ve akış alanındaki vektörlerin daha net bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır. Daha sonra, akışın detaylı analizini sağlamak amacıyla adaptive PIV yöntemleri kullanılarak hız vektörlerini temsil eden vektör haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar, daha doğru sonuçlar elde edebilmek için peak validation ve average filter gibi son işleme filtrelerinden geçirilmiştir. Sonuç olarak elde edilen vektör haritaları Şekil 4.27'de sunulmuştur. Bu haritalar, akış alanındaki hız vektörlerinin yönlerini ve büyüklüklerini açık bir şekilde göstermektedir.

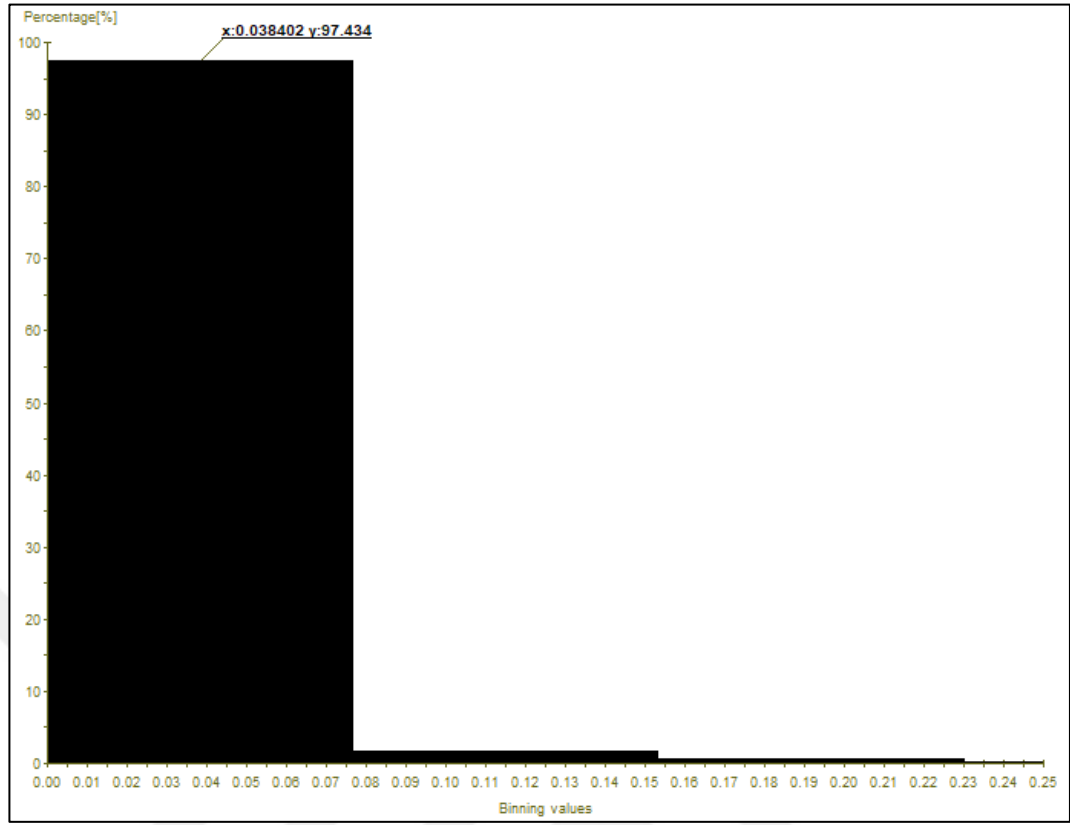


Şekil 4. 27. N7 numunesine ait PIV ölçüm sonuçları ve vektör haritaları.

Oluşturulan vektör haritalarından elde edilen veriler, istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, hız vektörlerinin şiddetlerinin dağılımını görselleştiren

histogram grafikleri hazırlanmıştır ve bu grafikler Şekil 4.28'de sunulmuştur. Histogram incelendiğinde, hız vektörlerinin %97,4'ünün 0.001 ile 0.075 m/s aralığında olduğu görülmüştür. Bu oran, akış alanının büyük bir kısmında oldukça düşük hızlarda hareket eden laminar bir akış karakteristiği olduğunu göstermektedir. Hız vektörlerinin yalnızca %2,6'sı bu şiddet aralığının dışında yer almıştır. Ayrıca, %97,4'lük dilimde yer alan vektörlerin ortalama şiddeti 0.038 m/s civarındadır. Bu sonuç, akışın geneli itibarıyla düzenli ve homojen bir yapıya sahip olduğunu ve yüksek türbülans etkilerinin bulunmadığını ifade etmektedir. Histogramda hız dağılımının dar bir aralıkta toplanması, laminar akış rejiminin baskın olduğunu teyit etmektedir.

Gerçekleştirilen PIV ölçümleri, akış alanı görselleştirme ve hız vektörü analizleri yoluyla ısı transfer mekanizmalarının temel dinamiklerini anlamak için kritik veriler sağlamaktadır. Bu tür ölçümler, akışkanların yüzeylerle etkileşimleri sırasında meydana gelen hız dağılımını ve akış rejimini belirleyerek, ısı transfer performansını doğrudan etkileyen temel faktörlerin ortaya çıkarılmasını mümkün kılar. Özellikle, laminar ve türbülanslı akış rejimlerinin belirlenmesi, ısı transferi verimliliği açısından tasarım süreçlerine yön veren önemli bir kriterdir. Bu çalışmada elde edilen detaylı hız vektörü haritaları ve istatistiksel analiz sonuçları, yalnızca bu numunenin performansını açıklamakla kalmayıp, aynı zamanda ısı transferi ve akış dinamikleri arasındaki etkileşimleri genel bir bağlamda anlamaya yönelik önemli bir bilimsel temel sunmaktadır. Bu kapsamda, yapılan ölçümler, enerji verimliliği, termal kontrol sistemleri ve ileri mühendislik tasarımlarında kullanılabilecek bilgi ve yöntemlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 4. 28. N7 numunesine ait hız vektörleri dağılım histogramı.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak 316L, CoCrW ve Ti6Al4V alaşımlarından poroz plaka numuneler ve 316L alaşımından biyomimetik ağaç benzeri yapı numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde boşluk oranı, termal ve yüzey özellikleri analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı lazer üretim parametrelerinin (enerji yoğunluğu) bahsedilen özellikler üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında numuneler termal uygulamalar yönüyle değerlendirilmiştir. 316L alaşımı termal uygulamalar için belirlendikten sonra, bu alaşım ile ağaçların köklerinden yapraklarına su iletim mekanizmasından ilham alınarak ağaç benzeri kanallar barındıran soğutucular tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu soğutucu tasarımı, soğutma suyunun kapılar (kılcallık) kuvvet ile ağaç benzeri yapı içerisinde hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Kendi kendine pompalama (self-pumping) süreci, bu soğutucu tasarımının terlemeli soğutma proseslerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ağaç benzeri yapı soğutuculardaki geometrik özellikleri (kanal çapı, dallanma oranı, kopyalama mesafesi) termal performansa etkisi de bu çalışma kapsamında incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- SLM ile üretimi gerçekleştirilen poroz plaka numunelerden CoCrW ile üretilenlerin, Ti6Al4V tozu ile üretilen poroz plaka numunelere benzer termal ve yüzey özellikleri gösterdiği saptanmıştır.
- Ti6Al4V ve CoCrW tozlarından üretilen poroz plaka numuneler, düşük sıvı tutma kapasitesi ve düşük termal iletkenliğe sahip olsalar da yüksek sertlik gibi üstün mekanik özellik sergilemişlerdir.
- Yukarıda özetlenen tüm olumlu özelliklerine rağmen, yüksek maliyetli olmaları ve düşük ısı iletkenlikleri bu alaşımları termal uygulamalar için daha az avantajlı duruma getirmektedir.

- 316L tozu ile üretilen poroz plaka numunelerden elde edilen sonuçlara göre ise termal uygulamalar için bu malzemenin daha yüksek termal iletkenlik, orta düzeyde yüzey pürüzlülüğü, SLM sürecinde düşük enerji yoğunluğunda üretime olanak sağlaması ve daha düşük malzeme maliyeti sebebiyle daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.
- CoCrW, 316L, Ti6Al4V tozlarından SLM ile üretilen poroz plakalarla yapılan ısı iletkenlik deneyleri ve yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ölçümleriyle elde edilen sonuçlara göre; malzemelerin fiziksel, mekanik, termal ve yüzey özelliklerinin büyük ölçüde SLM süreç parametrelerine bağlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, eklemeli imalat sürecinin ısı ve akış uygulamalarına yönelik ürünlerinde SLM proses parametrelerinin dikkatle seçilmesinin önemli olduğu gözlemlenmiştir.
- 316L tozundan SLM ile üretimi gerçekleştirilen biyomimetik ağaç benzeri yapı numunelerle yapılan ısı transferi deneyleri sonucunda, (30×39×39 mm) ölçülerindeki numunelerde, yüzey sıcaklığı en düşük seviyede kalan yani ısı transferi performansı en iyi olan numune N5 numunesi olurken, en düşük performansı ise N1 numunesi göstermiştir. (30×30×30 mm) ölçülerindeki numunelerde ise N7 numunesi en iyi ısı transferi performansını gösterirken N8 numunesi ise en kötü performansı göstermiştir. Burada gözlenen termal performans değişikliklerinin numunelerin geometrik özelliklerindeki farklılıktan dolayı olduğu belirlenmiştir.
- Isı transferi deneylerinden elde edilen sonuçlara göre; en yüksek termal performansı gösteren N7 numunesi (30×30×30 mm), 500 µm başlangıç kanal çapına, 0,65 dallanma oranına ve çapın 6 katı olacak şekilde kanal kopyalama mesafesine sahiptir.

- En iyi ısı transferi sonuçlarının literatüre paralel şekilde kanal çapının artması ve dallanma oranı ile kopyalama mesafesinin azalmasıyla elde edildiği görülmüştür.
- Isıtma ve soğutma periyotlarına ait verilen termal kamera görüntüleri incelendiğinde sıcaklık-zaman grafiğine paralel olacak şekilde en etkin ısı transferi mekanizması N5 ve N7 numunelerinde görülmüştür.
- Ağaç benzeri yapılı numunelerin çıkışında oluşan akış hızlarının tasarım süreçleri için belirlenmesi son derece önemlidir. Bu hızlar kullanılarak debi ve temel ısı transferi hesapları gerçekleştirilebilir ve bu hesaplamalar tasarım süreçlerinde kullanılabilir. PIV analizlerinden elde edilen sonuçlara göre Ağaç benzeri yapılı numunelerin çıkışında 0.038 m/s civarında ortalama akım şiddeti saptanmıştır.
- N7 numaralı ağaç benzeri yapı numunesi üzerinde yapılan PIV ölçümleri, hız vektörlerinin büyük bir çoğunluğunun (%97,4) dar bir şiddet aralığında toplandığını ve akışın laminar bir karakteristiğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. Laminer akışın hakim olması, yüzeyle dengeli bir akışkan etkileşimi olduğunu göstermektedir.

5.2. Öneriler

Bu çalışma, SLM ile üretilen farklı malzemelerin ve biyomimetik ağaç benzeri yapıların termal uygulamalardaki performansını değerlendirmiştir. Gelecekteki çalışmalar için, 316L'nin termal avantajlarını artırmak üzere yüzey modifikasyonları ve eklemeli üretim teknikleri araştırılabilir. Ayrıca, kanal geometrisi, dallanma oranı ve kopyalama mesafesi gibi parametrelerin optimizasyonu ile yeni biyomimetik tasarımlar geliştirilebilir. Farklı akışkanlar ve geniş sıcaklık aralıklarında testler yapılarak performans değerlendirilmeli; PIV analizleri ve simülasyon çalışmalarıyla akış ve ısı transfer mekanizmaları daha iyi anlaşılmalıdır. Termal uygulamalara yönelik, SLM parametrelerinin optimize edilmesi, alternatif malzemelerin test edilmesi ve endüstriyel ölçeklendirme çalışmaları da kritik önem taşımaktadır. Bu öneriler, tasarım ve malzeme geliştirme süreçlerinde önemli bir yol haritası sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., & Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 1–4, 77–86.
- Agyapong, J., Mateos, D., Czekanski, A., & Boakye-Yiadom, S. (2024). Investigation of effects of process parameters on microstructure and fracture toughness of SLM CoCrFeMnNi. *Journal of Alloys and Compounds*, 987, 173998.
- Ahmed, N., Barsoum, I., Haidemenopoulos, G., & Abu Al-Rub, R. K. (2022). Process parameter selection and optimization of laser powder bed fusion for 316L stainless steel: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 415-434.
- Ali, H., Ghadbeigi, H., & Mumtaz, K. (2018). Processing Parameter Effects on Residual Stress and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(8), 4059-4068.
- Annual Book of ASTM Standards Book. 2012. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. International, West Conshohocken, USA.
- Anonymous, 2024a. Web Sitesi: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/>, Eriřim Tarihi: 08.04.2024.
- Anonymous, 2024b. Web Sitesi: <https://www.sfm yazilim.com/>, Eriřim Tarihi: 08.04.2024.
- Anonymous, 2024c. Web Sitesi: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/>, Eriřim Tarihi: 08.04.2024.
- Anonymous, 2024d. Web Sitesi: <https://top3dshop.com/blog/selective-laser-melting-technology-benefits-applications-and-best-models>, Eriřim Tarihi: 08.04.2024.
- Anonymous, 2024e. Web Sitesi: <https://sybridge.com/vat-photopolymerization>, Eriřim Tarihi: 03.05.2024.
- Anonymous, 2024f. Web Sitesi: <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics>, Eriřim Tarihi: 03.05.2024.
- Anonymous, 2024g. Web Sitesi: <https://www.makepartsfast.com/a-new-approach-to-powder-bed-fusion-makes-more-materials-available-for-additive-manufacture>, Eriřim Tarihi: 03.05.2024.
- Anonymous, 2024h. Web Sitesi: <https://rapidfab.ricoh-europe.com/technologies/selective-laser-sintering/>, Eriřim Tarihi: 03.05.2024.
- Anonymous, 2024j. Web Sitesi: <https://socratic.org/questions/the-surface-tension-of-benzene-at-20-c-is-28-85-dyne-cm-in-a-capillary-apparatus>, Eriřim Tarihi: 03.05.2024.

- Anonymous, 2024k. Web Sitesi: <https://malzemebilimi.net/yuzey-gerilimi-kilcallik-etkisi.html>, Eriřim Tarihi: 03.05.2024.
- Anonymous, 2024m. Web Sitesi: <https://www.spot.com.tr/blog/archives/09-2018>, Eriřim Tarihi: 03.05.2024.
- Attar, H., Ehtemam-Haghighi, S., Kent, D., & Dargusch, M. S. (2018). Recent developments and opportunities in additive manufacturing of titanium-based matrix composites: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 133, 85-102.
- Badiru A. B., Valencia V.V., Liu D. 2017. *Additive Manufacturing Handbook* CRC Press, 938, Boca Raton, Florida.
- Bakhtiarian, M., Omidvar, H., Mashhuriazar, A., Sajuri, Z., & Gur, C. H. (2024). The effects of SLM process parameters on the relative density and hardness of austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 1616–1629.
- Bao, F., Pei, G., Wu, Z., Zhuang, H., Zhang, Z., Huan, Z., Wu, C., & Chang, J. (2020). Bioactive Self-Pumping Composite Wound Dressings with Micropore Array Modified Janus Membrane for Enhanced Diabetic Wound Healing. *Advanced Functional Materials*, 30(2005422).
- Barrionuevo, G. O., Ramos-Grez, J. A., Sánchez-Sánchez, X., Zapata-Hidalgo, D., Mullo, J. L., & Puma-Araujo, S. D. (2024). Influence of the Processing Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(35), 1-18.
- Bartolomeu, F., Gasik, M., Silva, F. S., & Miranda, G. (2022). Mechanical Properties of Ti6Al4V Fabricated by Laser Powder Bed Fusion: A Review Focused on the Processing and Microstructural Parameters Influence on the Final Properties. *Metals*, 12(986).
- Bas, H., Yapici, F., Inanc, I., (2022). Yapışkan Püskürtme Yöntemimde Üretim Parametrelerinin Önemi ve Örnek Uygulama, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(4), 1354-1361.
- Baskin, N., & Yuce, C. (2024). Effect of process parameters on the mechanical behavior of Ti6Al4V alloys fabricated by laser powder bed fusion method. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 7006–7019.
- Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2022). Havuz Fotopolimerizasyonu (HFP) ile Eklemeli İmalat. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 914-928.
- Batchelor, G. K. 2000. *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge university press, 604, Cambridge.
- Baufeld, B., Van der Biest, O., & Gault, R. (2010). Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, 31, S106-S111.

- Boyer, R. R. (2010). Attributes, characteristics, and applications of titanium and its alloys. *Jom*, 62, 21-24.
- Böhrk, H., Piol, O., & Kuhn, M. (2014). Transpiration Cooling at Hypersonic Flight - AKTiV on SHEFEX II. 11th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Atlanta, GA, 16-20 June 2014.
- Calderon, L. (2018). Adiabatic Film Cooling Effectiveness of a Transpiration-Cooled Leading Edge Fabricated by Laser Additive Manufacturing. Master's Thesis, University of Central Florida.
- Cao, T., Yu, K., Din, K., Liu, Y., Chen, X., & Zhu, H. (2021). A Self-cooling Bit with Transpiration Cooling Structures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(7), 6943-6957.
- Casini, M. (2022). *Construction 4.0*. Woodhead Publishing, 694, Italy.
- Castellanos, S. D., Alves, J. L., & Neto, R. J. (2017). A comparative study of manufacturing processes of complex surface parts in Titanium Ti6Al4V. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(2), 73-78.
- Chepiga, T., Zhilyaev, P., Ryabov, A., Simonov, A. P., Dubinin, O. N., Firsov, D. G., Kuzminova, Y. O., & Evlashin, S. A. (2023). Process Parameter Selection for Production of Stainless Steel 316L Using Efficient Multi-Objective Bayesian Optimization Algorithm. *Materials*, 16(1050).
- Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., & Sienz, J. (2015). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 869-879.
- Choi, J. P., Shin, G. H., Brochu, M., Kim, Y. J., Yang, S. S., Kim, K. T., ... & Yu, J. H. (2016). Densification behavior of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting by variation in laser energy density. *Materials Transactions*, 57(11), 1952-1959.
- Çelikel, S. B., & Uçar, S. (2020). Biyomimikri: doğayla uyumlu yeni bir tasarım modeli. *Humanities Sciences*, 15(2), 51-61.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Engin, T. 2008. Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları. Güven Kitabevi, 938, İzmir.
- Dai, N., Zhang, J., Chen, Y., & Zhang, L. C. (2017). Heat treatment degrading the corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Journal of the electrochemical society*, 164(7), C428.
- Daniels, B. J., Liburdy, J. A., & Pence, D. V. (2011). Experimental studies of adiabatic flow boiling in fractal-like branching microchannels. *Experimental thermal and fluid science*, 35(1), 1-10.
- Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Alloying: understanding the basics*. ASM international.

- 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.
- Deng, Y., Mao, Z., Yang, N., Niu, X., & Lu, X. (2020). Collaborative optimization of density and surface roughness of 316L stainless steel in selective laser melting. *Materials*, 13(7), 1601.
- Di, W., Yongqiang, Y., Xubin, S., & Yonghua, C. (2012). Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, 1189-1199.
- Donachie, M. J. (2000). *Titanium: A Technical Guide*. ASM International, 369.
- Du, X., Chen, J., She, Y., Liu, Y., Yang, Y., Yang, J., & Dong, S. (2024). Effect of process parameter optimization on morphology and mechanical properties of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting. *Progress in Natural Science: Materials International*, 33, 911-917.
- Dutt, A. K., Bansal, G. K., Tripathy, S., Krishna, K. G., Srivastava, V. C., & Chowdhury, S. G. (2023). Optimization of Selective Laser Melting (SLM) Additive Manufacturing Process Parameters of 316L Austenitic Stainless Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(2), 335–345.
- E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini and A. Fortunato, Effect of Selective Laser Melting (SLM) Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of 316L Austenitic Stainless Steel, *J. Mater. Process. Technol.*, 2017, 249, p 255–263.
- Eren, B. 2024. Biyomimetik yaklaşıma dayalı ayakkabı tabanlılığı tasarımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı, Erzurum.
- Eshawish, N., Malinov, S., Sha, W., & Walls, P. (2021). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting after stress relieving, hot isostatic pressing treatment, and post-heat treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 5290-5296.
- Eshkabilov, S., Ara, I., & Azarmi, F. (2022). A comprehensive investigation on application of machine learning for optimization of process parameters of laser powder bed fusion-processed 316L stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(2733–2756).
- Gennes, P. G., Brochard-Wyart, F., & Quéré, D. 2004. Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves (pp. 7-9). Springer New York.
- Ghaedamini, H., Salimpour, M. R., & Mujumdar, A. S. (2011). The effect of svelteness on the bifurcation angles role in pressure drop and flow uniformity of tree-shaped microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 31(5), 708-716.
- Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010) *Additive Manufacturing Technologies-Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer, Berlin, 459.

- Gökmen, M. 2024. Biyomimetik tasarım ile akıllı yılanımsı robot tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük.
- Gülhan, A., & Braun, S. (2011). An experimental study on the efficiency of transpiration cooling in laminar and turbulent hypersonic flows. *Experiments in Fluids*, 50(509-525).
- Hacısalıhoğlu, İ., Kaya, G., Ergüder, T. O., Mandev, E., Manay, E., & Yıldız, F. (2021). Tribological and thermal properties of plasma nitrided Ti45Nb alloy. *Surfaces and Interfaces*, 22, 100893.
- Han, L., Zhang, Y., Zhang, Z., Zhang, W., Liu, S., & Li, W. (2024). Numerical investigation of flow distribution and transpiration cooling performance in heterogeneous porous media with reacting coolant. *Applied Thermal Engineering*, 249, 123468.
- Hanzl, P., Zetek, M., Bakša, T., & Kroupa, T. (2015). The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. *Procedia Engineering*, 100, 1405-1413.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
- Heymann, D., Pence, D., & Narayanan, V. (2010). Optimization of fractal-like branching microchannel heat sinks for single-phase flows. *International journal of thermal sciences*, 49(8), 1383-1393.
- Ho, J. Y., See, Y. S., Leong, K. C., & Wong, T. N. (2021). An experimental investigation of a PCM-based heat sink enhanced with a topology-optimized tree-like structure. *Energy conversion and management*, 245, 114608.
- Hsu, H. C., Wong, K. K., Wu, S. C., Hou, P. J., & Ho, W. F. (2022). Microstructure and properties of 316L stainless steel by selective laser melting under various process parameters. *MRS Communications*, 12(5), 768-772.
- Hu, B., Wang, J., Ma, Z., & Sang, S. (2021). Permeability and thermal conductivity models of shale matrix with a bundle of tortuous fractal tree-like branching micropore networks. *International Journal of Thermal Sciences*, 164, 106876.
- Huang, G., Liao, Z., Xu, R., Zhu, Y., & Jiang, P.-X. (2019). Self-pumping transpiration cooling with phase change for sintered porous plates. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113870.
- Huang, G., Liao, Z., Xu, R., Zhu, Y., & Jiang, P.-X. (2020). Self-pumping transpiration cooling with a protective porous armor. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114485.
- Huang, G., Min, Z., Yang, L., Jiang, P.-X., & Chyu, M. (2018). Transpiration cooling for additive manufactured porous plates with partition walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 1076-1087.

- Huang, G., Zhu, Y., Liao, Z., & Jiang, P. X. (2018). Experimental investigation of self-pumping internal transpiration cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 514-522.
- Huang, G., Zhu, Y., Liao, Z., & Jiang, P.-X. (2019). Biomimetic self-pumping transpiration cooling for additive manufactured porous module with tree-like micro-channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 403-410.
- Huang, G., Zhu, Y., Liao, Z., Huang, Z., & Jiang, P.-X. (2020). Transpiration cooling with bio-inspired structured surfaces. *Bioinspiration & Biomimetics*.
- Huang, M., Zhang, Z., & Chen, P. (2019). Effect of selective laser melting process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel helical micro-diameter spring. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 2117-2131.
- Huang, Z., Zhu, Y. H., Jiang, P. X., & Xiong, Y. B. (2015). Investigation of a porous transpiration-cooled strut injector. *Journal of Propulsion and Power*, 31(1), 278-285.
- Ikeda, T., Yonehara, M., Ikeshoji, T.-T., Nobuki, T., Hatate, M., Kuwabara, K., Otsubo, Y., & Kyogoku, H. (2021). Influences of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of CoCrFeNiTi Based High-Entropy Alloy in a Laser Powder Bed Fusion Process. *Crystals*, 11(549), 1-18.
- Jiang, P.-X., Huang, G., Zhu, Y., Xu, R., Liao, Z., & Lu, T. (2017). Experimental investigation of biomimetic self-pumping and self-adaptive transpiration cooling. *Bioinspiration & Biomimetics*, 12(5), 056002.
- Kamath, C., El-Dasher, B., Gallegos, G. F., King, W. E., & Sisto, A. (2014). Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 65-78.
- Kaya G, Ergüder TO, Hacısalıhoğlu İ, Mandev E, Manay E, & Yıldız F (2021) Wear and thermal behavior of TiAlN thin films onto Ti6Al4V alloy manufactured by selective laser melting method. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 10(4):650-660.
- Kaya, G., Yıldız, F., Korkmaz, İ. H., Kaymaz, İ., Yetim, A. F., Ergüder, T. O., & Şen, Ç. (2023). Effects of process parameters on selective laser melting of Ti6Al4V-ELI alloy and parameter optimization via response surface method. *Materials Science and Engineering: A*, 885, 145581.
- Kılıç, M. (2018). Numerical investigation of heat transfer from a porous plate with transpiration cooling. *Journal of Thermal Engineering*, 4(1), 1632-1647.
- Kılıç, M. (2019). A Heat Transfer Analysis From a Porous Plate With Transpiration Cooling. *Thermal Science*, 23(5B), 3025-3034.

- Kirsch, K. L., & Thole, K. A. (2018). Experimental Investigation of Numerically Optimized Wavy Microchannels Created Through Additive Manufacturing. *Journal of Turbomachinery*, 140(2), 021002.
- Król, M., Mazurkiewicz, J., & Żołnierczyk, S. (2018). Optimization and analysis of porosity and roughness in selective laser melting 316L parts. *Archives of Materials Science and Engineering*, 90(1), 5-15.
- Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 11(1), 26-36.
- Kurzynowski, T., Gruber, K., Stopyra, W., Kuźnicka, B., & Chlebus, E. (2018). Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 718, 64-73.
- La Fé-Perdomo, I., Ramos-Grez, J. A., Jeria, I., Guerra, C., & Barrionuevo, G. O. (2022). Comparative analysis and experimental validation of statistical and machine learning-based regressors for modeling the surface roughness and mechanical properties of 316L stainless steel specimens produced by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 666-682.
- Larimian, T., Kannan, M., Grzesiak, D., AlMangour, B., & Borkar, T. (2020). Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 770, 138455.
- Lin, K., Gu, D., Xi, L., Yuan, L., Niu, S., Lv, P., & Ge, Q. (2019). Selective laser melting processing of 316L stainless steel: effect of microstructural differences along building direction on corrosion behavior. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 2669-2679.
- Liu, W., Xie, Q., Cao, Y., Wang, J., & Bai, P. (2023). Optimization of processing parameters for LPBF-manufactured CoCr alloys based on laser volume energy density. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 4053–4063.
- Liu, Y., Chen, W., Qiu, W., Chen, J., Zou, R., Ren, Y., & Li, C. (2024). Optimized control of laser processing parameter on microstructural evolution and mechanical behavior in CoCrNi medium entropy alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 491-501.
- Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A. (2017). Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 255-263.
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium*: Springer Science & Business Media. Berlin Heidelberg.
- Madapana, D., Ramadas, H., Nath, A. K., & Dutta Majumdar, J. (2024). Structure-Property-Process Parameters Correlation of Laser Shock-Peened Titanium Alloy

- (Ti6Al4V) Without Protective Layer. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(11), 5380–5387.
- Mandev, Y. Z., Mandev, E., & Yetim, A. F. (2024). Effects of Laser Powder Bed Fusion Process Parameters on Porosity, Liquid Retention, and Thermal and Surface Properties for 316L, CoCrW and Ti6Al4V Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-16.
- Mansoura, A., Dehghan, S., Barka, N., & Kangranroudi, S. S. (2024). Investigation into the effect of process parameters on density, surface roughness, and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(2547-2562).
- Mertens, R., Clijsters, S., Kempen, K., & Kruth, J. P. (2014). Optimization of scan strategies in selective laser melting of aluminum parts with downfacing areas. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 061012.
- Miao, H., Yusof, F., Ab Karim, M. S., Badruddin, I. A., Hussien, M., Kamangar, S., & Zhang, H. (2023). Process parameter optimisation for selective laser melting of AlSi10Mg-316L multi-materials using machine learning method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(3093–3108).
- Milward, S. (2020). Investigation into Additive Manufacturing for Controlling Thermal Expansion in Optical Applications.
- Min, Z., Huang, G., Parbat, S. N., & Yang, L. (2018). Experimental Investigation on Additively Manufactured Transpiration and Film Cooling Structures. *Journal of Turbomachinery*, 141(2), 021002.
- Mitropoulos, A. Ch. (2009). Capillarity. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2(1), 28-32.
- Mohd Yusuf, S., Chen, Y., Boardman, R., Yang, S., & Gao, N. (2017). Investigation on porosity and microhardness of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Metals*, 7(2), 64.
- Mumtaz, K. A., Erasenthiran, P., & Hopkinson, N. (2008). High density selective laser melting of Waspaloy®. *Journal of materials processing technology*, 195(1-3), 77-87.
- Murr, L. E., Martinez, E., Amato, K. N., Gaytan, S. M., Hernandez, J., Ramirez, D. A., ... & Wicker, R. B. (2012). Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: examples of 3D materials science. *Journal of Materials Research and technology*, 1(1), 42-54.
- Nafis, B. M., Whitt, R., Iradukunda, A.-C., & Huitink, D. (2021). Additive Manufacturing for Enhancing Thermal Dissipation in Heat Sink Implementation: A Review. *Heat Transfer Engineering*, 42(12), 967-984.

- Narendran, G., Gnanasekaran, N., & Perumal, D. A. (2018). A review on recent advances in microchannel heat sink configurations. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 11(3), 190-215.
- Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621.
- Özkan, D. Ç. (2019). Hızlı prototipleme teknolojisinin gelişimi, çeşitleri ve imalat sektöründe sağladığı avantajlar. *Mühendis ve Makina*, 36, 35-41.
- Panahizadeh, V., Ghasemi, A. H., Asl, Y. D., & Davoudi, M. (2022). Optimization of LB-PBF process parameters to achieve best relative density and surface roughness for Ti6Al4V samples: Using NSGA-II algorithm. *Rapid Prototyping Journal*, 28(9), 1821–1833.
- Pant, M., Pidge, P., Nagdeve, L., & Kumar, H. (2021). A Review of Additive Manufacturing in Aerospace Application. *Journal of Composite & Advanced Materials/Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 31(2).
- Peng, T., & Chen, C. (2018). Influence of energy density on energy demand and porosity of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 55-62.
- Popovich, V. A., Borisov, E. V., Popovich, A. A., Sufiiarov, V. S., Masaylo, D. V., & Alzina, L. (2017). Impact of heat treatment on mechanical behaviour of Inconel 718 processed with tailored microstructure by selective laser melting. *Materials & Design*, 131, 12-22.
- Poupinha, C., Kozłowska, S., Soriano Lluch, J., Altimare, D., & Kinell, M. (2024). Experimental study on transpiration cooling through additively manufactured porous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 227, 125532.
- Pragana, J. P. M., Pombinha, P., Duarte, V. R., Rodrigues, T. A., Oliveira, J. P., Bragança, I. M. F., Santos, T. G., Miranda, R. M., Coutinho, L., & Silva, C. M. A. (2020). Influence of processing parameters on the density of 316L stainless steel parts manufactured through laser powder bed fusion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(12), 1-12. <https://doi.org/10.1177/0954405420911768>.
- Pupo, Y., Monroy, K. P., & Ciurana, J. (2015). Influence of process parameters on surface quality of CoCrMo produced by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(985-995).
- Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2018). *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer.
- Ramirez-Cedillo, E., Uddin, M. J., Sandoval-Robles, J. A., Mirshams, R. A., Ruiz-Huerta, L., Rodriguez, C. A., & Siller, H. R. (2020). Process planning of L-PBF of AISI 316L for improving surface quality and relating part integrity with microstructural characteristics. *Surface and Coatings Technology*, 396, 125956.

- Reimer, T., Kuhn, M., Gülhan, A., Esser, B., Sippel, M., & van Forest, A. (2012). Transpiration Cooling Tests of Porous CMC in Hypersonic Flow. 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. San Francisco, California.
- Salman, O. O., Brenne, F., Niendorf, T., Eckert, J., Prashanth, K. G., He, T., & Scudino, S. (2019). Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel synthesized by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 255-261.
- Shi, W., Wang, P., Liu, Y., Hou, Y., & Han, G. (2020). Properties of 316L formed by a 400 W power laser Selective Laser Melting with 250 μm layer thickness. *Powder Technology*, 360, 151-164.
- Shieu FS, Deng MJ, & Lin, SH (1998). Microstructure and corrosion resistance of a type 316L stainless steel. *Corrosion Science*, 40(8), 1267-1279.
- Sun, Z., Tan, X., Tor, S. B., & Yeong, W. Y. (2016). Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates. *Materials & Design*, 104, 197-204.
- Tan JH, Wong WLE, & Dalgarno KW (2017) An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process. *Additive Manufacturing*, 18:228-255.
- Tekdir, H. 2018. Seçici lazer ergitme (SLE) ile üretilen 316L/Ti6Al4V tabakalı yapıların tribolojik özelliklerinin plazma oksidasyon ile iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Ana Bilim Dalı, Erzurum.
- Theeda, S., Jagdale, S. H., Ravichander, B. B., & Kumar, G. (2023). Optimization of Process Parameters in Laser Powder Bed Fusion of SS 316L Parts Using Artificial Neural Networks. *Metals*, 13(842).
- Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T, Van Humbeeck J, & Kruth JP (2010) A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta materialia*, 58(9):3303-3312.
- Thomas, D. (2009). The development of design rules for selective laser melting (Doctoral dissertation, Cardiff Metropolitan University).
- Tiismus, H., Kallaste, A., Vaimann, T., & Rassõlkin, A. (2022). State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines. *Additive Manufacturing*, 55, 102778.
- Tucho, W. M., Lysne, V. H., Austbø, H., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V. (2018). Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 910-925.
- Varol T, Hacısalihoğlu İ, Kaya G, Güler O, Yıldız F, Aksa HC, & Akçay SB (2021) The effect of selective laser melting process on the microstructure, density, and

- electrical conductivity of silver-coated copper cores. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30:5216-5226.
- Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- Willert, C. E., & Gharib, M. (1991). Digital particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 10(4), 181-193.
- Xu, R., Cheng, Z., & Jiang, P. (2023). Fundamentals and recent progress of additive manufacturing-assisted porous materials on transpiration cooling. *Journal of the Global Power and Propulsion Society, Special Issue: Some Advances in Additive Manufacturing for Aerothermal Technologies*, 19-48.
- Xu, S., Wang, W., Fang, K., & Wong, C. N. (2015). Heat transfer performance of a fractal silicon microchannel heat sink subjected to pulsation flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 33-40.
- Xu, S., Zhang, S., Ren, G., Pan, Y., & Li, J. (2022). Optimization of structural and processing parameters for selective laser melting of porous 316L bone scaffolds. *Materials*, 15(5896).
- Yakout, M., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2019). Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 397-420.
- Yalçın, B., & Ergene, B. 2017. Metallurgy and method of new trend 3-D additive manufacturing in industry. *SDU International Journal of Technological Science*, 9(3), 65-88.
- Yasa, E., & Kruth, J. P. (2011). Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering*, 19, 389-395.
- Zari, M. P. (2007, November). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. In *The SB07 NZ sustainable building conference* (No. 033).
- Zhang, K., Hickey, J.-P., & Vlasea, M. (2023). An Analysis Framework of Additively Manufactured Deterministic Porous Structures for Transpiration Cooling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(20), 9253-9262.
- Zhao, L., Wang, J., Ma, J., Lin, J., Peng, J., & Qu, D. (2014). An experimental investigation on transpiration cooling under supersonic condition using a nose cone model. *International Journal of Thermal Sciences*, 84, 207-213.
- Zhong, Y., Liu, L., Wikman, S., Cui, D., & Shen, Z. (2016). Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting. *Journal of Nuclear Materials*, 470, 170-178.

Zhou, M., He, X., Wu, X., Xiao, L., Cui, Z., Tang, X., Guo, L., Liu, S., Liu, H., Zhu, Y., Zhang, Y., & Li, G. (2020). Self-pumping and scalable fog collector with diode-like micro-hole arrays inspired by natural asymmetric wettability. *Applied Materials Today*, 21, 100851.

