
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN KAFES YAPILARDA TASARIM VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Oğulcan EREN

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oğulcan EREN
24/06/2023

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN KAFES YAPILARDA TASARIM VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

(Doktora Tezi)

Oğulcan EREN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Bu doktora tezi, kafes yapılarının tasarımı ve üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımı üzerine metodolojik bir yaklaşım sunmaktadır. Havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstriyel uygulamalar için gelişmiş mekanik özelliklere ve mukavemet/ağırlık oranına sahip kafes yapıların imalatı son yıllarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Her ne kadar Eİ teknolojisi, karmaşık kafes yapılarının üretiminde kullanılmaya başlanmış olsa da, birim hücre tasarımı, işlem parametreleri, baskı oryantasyonu gibi önemli etkileşimli faktörlerin kafes yapıların boyutsal doğruluğu ve mekanik özelliklerine etkileri sistematik bir şekilde irdelenmemiştir. Bu araştırmanın birincil amacı, tasarım ve imalat parametrelerini optimize ederek bu yapıların mekanik performanslarının iyileştirilmesidir. Çalışma metallik kafes yapılar üzerine yoğunlaşmış olsa da, farklı kafes yapı tasarımlarının mekanik özelliklere etkisinin ön çalışması için nispeten daha esnek çalışma prensibi sunan ve proses parametre optimizasyonu gerektirmeyen fotopolimer esaslı MutiJet baskı yöntemi kullanılmıştır. Bu ön çalışmadan edinilen tecrübe ve bilgi birikimi ile metalik kafes elemanlarının, Seçici Lazer ile Ergitme (SLM) Eİ yöntemiyle optimum üretimini sağlamak amacıyla farklı işlem parametreleri ve baskı oryantasyonları kullanılarak AlSi10Mg çubuk elemanları üretilmiştir. SLM işlem parametrelerinin eriyik havuz geometrisi ve dolayısıyla mekanik özellikler üzerindeki rolünü araştırmak için nümerik modelleme tekniği kullanılmıştır. Model gauss ışın dağılımına sahip lazer enerjisinin dairesel bir yol üzerinde hacimsel ısı kaynağı olarak ilerlemesi ile ısı dağılımı ve anlık faz değişimini ortaya koymaktadır. Optimum tasarımlar baz alınarak makine öğrenmesi temelli kafes tasarımları geliştirilmiş olup, basma ve darbe testleri ile mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, baskı parametrelerinin ve yapı yönelimlerinin SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların boyutsal doğruluğu, mikro yapısı ve mekanik performansı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu araştırmanın bulguları, kafes yapıların eklemeli imalat süreçlerinin anlaşılmasını ilerletmeye, kafes yapı performansını artırmaya ve makine öğrenmesi ile yenilikçi tasarım yaklaşımları geliştirmeye katkıda bulunmaktadır.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli İmalat, kafes yapılar, mekanik özellikler
Sayfa Adedi	:	238
Danışman	:	Doç. Dr. H. Kürşad SEZER
İkinci Danışman	:	Prof. Dr. O. Ersel CANYURT

EFFECT OF DESIGN AND PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

(Ph. D. Thesis)

Oğulcan EREN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

This doctoral thesis presents a methodological approach on the use of additive manufacturing (AM) technologies in the design and production of lattice structures. Manufacturing of lattice structures with advanced mechanical properties and strength to weight ratio for aerospace, automotive and bio-medical industrial application has been increasingly important in recent years. Although AM technology has been used in the production of complex lattice structures, the effects of significant interactive factors such as unit cell design, process parameters, print orientation, on the dimensional accuracy and mechanical properties of lattice structures have not been systematically studied. The primary aim of this research is to improve the mechanical performance of these structures by optimizing the design and fabrication parameters. Although the study focused on metallic lattice structures, the photopolymer-based MutiJet printing method, which offers a relatively more flexible working principle and does not require process parameter optimization, was used for the preliminary study of the effect of different lattice structure designs on mechanical properties. With the experience and knowledge gained from this preliminary study, AlSi10Mg strut elements were produced using different process parameters and print orientations to achieve optimal production of metallic lattice elements with the Selective Laser Melting (SLM) AM method. A numerical modeling technique was used to investigate the role of SLM process parameters on the melt pool geometry and subsequent mechanical properties. The model reveals the heat distribution and instant phase change with the progression of gaussian profile laser beam energy as a volumetric heat source on a circular path, resembling SLM circular strut element manufacturing process. Machine learning-based lattice designs were developed based on optimum designs, and their mechanical properties were evaluated by compression and impact tests. In addition, the effects of printing parameters and structure orientations on the dimensional accuracy, microstructure and mechanical performance of AlSi10Mg struts produced with SLM were also examined. The findings of this research contribute to the wider understanding of additive manufacturing of complex lattice structures with significant performance improvement and machine learning based innovative lattice designs.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Additive Manufacturing, lattice structures, mechanical properties
Page Number	:	238
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. H. Kürşad SEZER
Co-Supervisor	:	Prof. Dr. O. Ersel CANYURT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında desteğini eksik etmeyen değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Hüseyin Kürşad SEZER'e ve Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımda yardımlarını hiç esirgemeyen Prof. Dr. İsmail ŞAHİN ve Prof. Dr. Hüseyin Rıza BÖRKLÜ hocalarıma da ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez sürecindeki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Nurullah YÜKSEL ve Arş. Gör. Neslihan TOP'a da teşekkürü bir borç bilirim.

Motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan en büyük destekçim sevgili eşim Serap EREN'e ve eğitim hayatım boyunca yanımda bulunarak beni destekleyen aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Bu tez Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinasyon Birimi tarafından FGA-2022-7532 nolu proje olarak desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ xvii

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 1

2. EKLEMELİ İMALAT VE KAFES YAPILARIN TEMELLERİ 9

2.1. Giriş 9

2.2. Eklemeli İmalat Teknolojileri 9

2.2.1. Eklemeli imalatın tarihi 11

2.2.2. Eklemeli imalat yöntemleri 12

2.2.3. Yeterlilikler ve sınırlılıklar 18

2.2.4. Son trendler ve pazar 21

2.3. Eklemeli İmalat için Tasarım 25

2.3.1. Eklemeli imalatın talaşlı imalat ile kıyaslanması 26

2.3.2. Eklemeli imalat için tasarımın temel prensipleri 29

2.4. Hücresel Kafes Yapıları 35

2.4.1. Kafes yapıların sınıflandırılması 37

2.4.2. Kafes yapı teorileri 39

2.4.3. Kafes yapıların eklemeli imalatı 44

Sayfa

2.5. Lazer Malzeme Etkileşim Mekanizması 45
2.5.1. Gauss ışını ve lazer ışın kalitesi 48
2.5.2. Elektromanyetik radyasyonun malzemeyle etkileşimi 50
2.5.3. Malzemede yansıma ve absorpsiyon mekanizması 52
2.5.4. Işın malzeme etkileşimine etkisi eden faktörler 54
3. KAFES YAPI TASARIM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ 57
3.1. Giriş 57
3.2. Metodoloji 59
3.2.1. Hücresel yapı tasarım süreci 60
3.2.2. Mekanik tepki tahmini 62
3.2.3. Hücresel yapıların PolyJet 3B baskısı 62
3.2.4. Basma testi 66
3.2.5. Nümerik model 66
3.3. Bulgular ve Tartışma 67
3.3.1. Boyutsal doğruluk 67
3.3.2. Nümerik model 69
3.3.3. Basma testi 71
3.3.4. Elastik modülün hesaplanması ve karşılaştırılması 77
3.4. Sonuç 79
4. KAFES YAPI ÇUBUK ELEMANLARI TASARIM VE SLM İMALAT PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ 81
4.1. Giriş 81
4.2. Malzeme ve Metot 85
4.2.1. Malzeme 85
4.2.2. Çubuk eleman numune tasarımı 86

Sayfa

4.2.3. İşlem parametrelerinin belirlenmesi 89
4.2.4. Tek yol tarama numune tasarımı ve işlem parametrelerinin tayini 93
4.2.5. Çubuk elemanların SLM yöntemiyle üretimi 95
4.2.6. Malzeme karakterizasyon testleri 97
4.3. Bulgular ve Tartışma 103
4.3.1. Boyutsal doğruluk 103
4.3.2. Çubuk elemanların yüzey morfolojisi ve erime havuzu karakterizasyonu .. 106
4.3.3. Delikli ince unsurların yüzey morfolojisi ve erime havuzu karakterizasyonu 119
4.3.4. Mikroyapı 122
4.3.5. Mikrosertlik 132
4.4. Sonuç 137
5. KAFES YAPI ÇUBUK ELEMANLARININ SLM İMALAT PROSESİNİN NÜMERİK MODELLENMESİ 141
5.1. Giriş 141
5.2. SLM Süreci İçin Sonlu Elemanlar Modeli 145
5.2.1. Modelin fiziksel tasviri ve varsayımlar 145
5.2.2. Korunum denklemleri 146
5.2.3. Gauss ısı kaynağı 149
5.2.4. Termofiziksel özellikleri 150
5.3. Sayısal Simülasyon 153
5.4. Bulgular ve Tartışma 156
5.4.1. Sıcaklık dağılım özellikleri 156
5.4.2. İşlem parametrelerinin termal davranışa etkisi 162
5.4.3. İşlem parametrelerinin eriyik havuz yapısına etkisi 166
5.5. Sonuç 170

Sayfa

6. OPTİMUM SLM TASARIM VE İMALAT PARAMETRELERİYLE YAPAY ZEKA TABANLI KAFES YAPI TASARIMI VE MEKANİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ 173

6.1. Giriş 173

6.2. Metodoloji 177

6.2.1. Parametrik tasarım 178

6.2.2. Üretken çekişmeli ağlar ile 3B kafes yapı tasarımı 180

6.2.3. Hücresel yapılar tasarım süreci 184

6.2.4. Mekanik davranış tahmini 187

6.2.5. AlSi10Mg kafes yapılarının SLM yöntemiyle üretilmesi 188

6.2.6. Basma testi 190

6.2.7. Charpy darbe testi 190

6.3. Bulgular ve Tartışma 190

6.3.1. Boyutsal doğruluk ve kalite kontrol 190

6.3.2. Basma testi 192

6.3.3. Darbe testi 202

6.3.3. Elastik modülün belirlenmesi ve karşılaştırılması 204

6.4. Sonuç 206

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 209

KAYNAKLAR 213

ÖZGEÇMİŞ 235

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Eİ yöntemlerinde karşılaşılan genel problemler ve çözüm önerileri 20

Çizelge 2.2. Araba bileşenlerinden alt kol salıncağına ait Eİ ile replikasyon, Eİ ile uyum ve Eİ için tasarım karşılaştırması 26

Çizelge 2.3. CNC işlemede tasarım kısıtlamaları ve Eİ'deki eşdeğerleri veya çözümleri 27

Çizelge 2.4. Üniform olmayan borulara sahip paslanmaz çelik dispersiyon ekipmanının farklı tasarım stratejileri ve baskı özellikleri 34

Çizelge 2.5. Eğilmenin veya gerinme baskın olduğu mekanik davranışlar için Gibson-Ashby ilişkileri 40

Çizelge 2.6. Lazer ışını ve ışık arasındaki temel farklılıklar 46

Çizelge 2.7. Farklı tür lazerlerin fotonik özellikleri 48

Çizelge 2.8. Bazı lazer türlerine ait ışın kaliteleri 50

Çizelge 2.9. 1,06 μm dalga boylu ışınım için bazı malzemeleri kırılma indisleri ve yansıma katsayıları 53

Çizelge 2.10. Farklı malzemeler için kırılma indisi ve Brewster açısı 54

Çizelge 3.1. Gözenekli yapıların BDT modelleri ve yapılara ait kütle, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri 61

Çizelge 3.2. Ürün veri sayfasından alınan RGD 720'nin mekanik özellikleri 63

Çizelge 3.3. Hücresel yapıların (24 x 24 x 24 mm^3) üretim istatistikleri 65

Çizelge 3.4. Eklemeli imal edilen kafes yapı modellerinin kritik unsurlarındaki boyutsal sapma miktarı 68

Çizelge 3.5. Hücresel yapıların maksimum kayma gerilmeleri 69

Çizelge 3.6. -y yönünde uygulanan 1 mm deformasyon sonucu diğer eksenlerdeki toplam deformasyon 71

Çizelge 3.7. Oktet, diyagonal ve merkezi kafes tasarımları için hesaplanan narinlik oranları ve bağıl yoğunluklar 73

Çizelge 4.1. AlSi10Mg alaşıma ait kimyasal bileşim (% olarak kütle oranı) 86

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.2. Platform üretiminde kullanılan SLM baskı parametreleri ve noktasal destek profili 88

Çizelge 4.3. Çubuk elemanların üretiminde kullanılan baskı parametreleri..... 89

Çizelge 4.4. AlSi10Mg çubuk eleman numuneleri için zımparalama, parlatma ve dağlama süreçleri ve ilgili işlem parametreleri..... 100

Çizelge 4.5. Geleneksel yöntemlerle üretilen AlSi10Mg alaşım parçaların mikrosertlikleri 102

Çizelge 5.1. AlSi10Mg alüminyum alaşım için tanımlanan faz göstergeleri, faz değişim sıcaklığı ve faz geçiş aralığı..... 149

Çizelge 5.2. Sayısal analizde kullanılan AlSi10Mg malzemeye ait termofiziksel özellikler 153

Çizelge 5.3. Sayısal analizde kullanılan işlem parametreleri 155

Çizelge 5.4. Lazer işlem parametre seti ile ilgili parametreler ait enerji yoğunluğu (EY - (J/mm^3)) ve lazer güç yoğunluğu (GY - W/cm^3) değerleri 163

Çizelge 6.1. Kafes yapı BDT modellerine ait fiziksel özellikler 186

Çizelge 6.2. Kafes yapı mekanik tepkilerinin Maxwell kararlılık kriteri kullanılarak analizi 187

Çizelge 6.3. Kafes yapıların üretiminde kullanılan SLM baskı parametreleri 188

Çizelge 6.4. Kafes yapıya ait BDT verileri ve SLM ile üretilmiş numunelerin kritik noktalarındaki boyutsal farklılıklar..... 193

Çizelge 6.5. Kafes yapılarına ait yapısal ve mekanik özellikler..... 196

Çizelge 6.6. Kafes yapıların Charpy darbe testi sonuçları..... 203

Çizelge 6.7. Gibson-Ashby elastik modülünün belirlenmesinde kullanılan korelasyon katsayıları ve kafes yapılarına ait elastisite modülü..... 205

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. STL dosya formatında BDT verisinin tanımlanmasında kullanılan ağ yapısı 10

Şekil 2.2. Eklemeli imalat süreci adımları 10

Şekil 2.3. Eklemeli imalat teknolojilerinin genel tasnif şeması. 12

Şekil 2.4. Eİ teknolojileri için katman kalınlığı ve malzeme fiyat grafiği 13

Şekil 2.5. Eriyik Biriktirme Tekniği (FDM) eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması 14

Şekil 2.6. Sterolitografi SLA eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması 14

Şekil 2.7. PolyJet eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması 15

Şekil 2.8. Elektron Işını Eritme (EBM) eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması 16

Şekil 2.9. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED) eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması 17

Şekil 2.10. Seçici Lazer Eritme (SLM) 3B baskı cihazına ait çalışma şeması 17

Şekil 2.11. Metal eklemeli imalat teknolojileri pazar değeri ve pazar öngörüleri 24

Şekil 2.12. 3 eksenli CNC işleme şeması. 27

Şekil 2.13. Parçanın hacmine ve karmaşıklığına bağlı olarak eklemeli imalat veya geleneksel imalat tercih bölgeleri 30

Şekil 2.14. Eİ ve enjeksiyon kalıplama için birim maliyet grafiği 31

Şekil 2.15. Farklı yoğunluktaki iç tarama desenleri 33

Şekil 2.16. Baskı oryantasyonunun delik ve mil geometrilerinin yüzey kalitesine etkisi 34

Şekil 2.17. Kabuk geometrinin dayanımı artırmak için kullanılan kiriş yapısı 35

Şekil 2.18. Kafes yapı örneği ve temel bileşenleri..... 36

Şekil 2.19. Hücresel yapıların sınıflandırılması..... 38

Şekil 2.20. Potansiyel düzlemsel kafes konfigürasyonlarının şematik gösterimi 41

Şekil 2.21. (a) Gerinme baskın ve (b) eğilme baskın kafes yapılarına ait tipik kuvvet deformasyon grafiği..... 42

Şekil 2.22. Euler-Bernoulli kirişi ve Timoshenko kirişinin deformasyonu 44

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.23. Lazer odaklanmasının şematik gösterimi. 49

Şekil 2.24. Fiber lazerler için odak çapı. 49

Şekil 2.25. Bazı ışın kalite faktörleri ve gauss dağılım profilleri. 50

Şekil 2.26. Lazer ışını malzeme etkileşimi. 51

Şekil 2.27. Bazı malzemeler için dalga boyuna bağlı olarak yansıtma oranlarındaki değişim. 55

Şekil 2.28. Malzeme yansıtıcılığının sıcaklık ile değişimi... 55

Şekil 2.29. 1,06 μm polarize ışınımdaki çelikte meydana gelen yansıma 56

Şekil 3.1. Hücresel yapı tasarım, test ve geliştirme adımları..... 59

Şekil 3.2. PolyJet teknolojisi süreç şeması 63

Şekil 3.3. Eklemeli imal edilen kafes yapı modellerinin unsur boyutlarının BDT verileri ile kıyaslanması..... 68

Şekil 3.4. -y yönünde uygulanan 1 mm deformasyon sonucu elde edilen eşdeğer gerilmeler..... 70

Şekil 3.5. Eklemeli olarak üretilmiş hücresel yapıların basma testi ile elde edilen gerilme - gerinim diyagramı..... 76

Şekil 3.6. Farklı rijitlik özelliklerine ve birim hücre boyutlarına sahip kafes yapıların maksimum gerilme gerinim haritası..... 76

Şekil 3.7. Farklı kafes yapılar için Gibson-Ashby ve Hooke elastik modül sonuçları ... 77

Şekil 4.1. Farklı çaplarda baskı yüzeyine dik çubuk elemanlar içeren numuneye ait BDT modeli ve unsur boyutları 87

Şekil 4.2. Çubuk eleman numunelerine ait baskı parametreleri ve baskı oryantasyonları 90

Şekil 4.3. Çubuk elemanlara ait kontur tarama illüstrasyonu 92

Şekil 4.4. Çaplara bağlı dolgu deseni ön izlemesi 93

Şekil 4.5. Tek yol lazer tarama ile üretilen delikli ince unsurlara ait BDT görüntüsü ve kullanılan baskı parametreleri 94

Şekil 4.6. Delikli ince unsurlara ait numunelerin dilimleyici görüntüsü ve baskı hazırlıkları 94

Şekil 4.7. Delikli ince unsurlara ait lazer tarama stratejisi 95

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. SLM yöntemi ile üretilen AlSi10Mg çubuk eleman numuneleri için metalografik numune hazırlama adımları 97

Şekil 4.9. Kare piramit elmas uçlu Vickers mikrosertlik testinin şematik gösterimi 101

Şekil 4.10. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarıyla üretilen SLM çubuk elemanların 103

Şekil 4.11. Baskı parametrelerinin gözenekliliğe etkileri 112

Şekil 4.12. Farklı işlem parametreleri ve çubuk eleman oryantasyonları ile üretilen çubuk eleman numunelerinde enerji yoğunluğuna bağlı porozite değişimi . 113

Şekil 4.13. SLM yönteminde oluşan eriyik havuzun yapısı ve unsurları 116

Şekil 4.14. Lazer enerji yoğunluğuna bağlı olarak delikli ince numunelere ait boyutsal ölçüler 121

Şekil 4.15. Al-Si alaşıma ait faz diyagramı 123

Şekil 4.16. SLM yönteminde eriyik havuz katılaşma sürecinde oluşan mikroyapının şematik gösterimi 125

Şekil 4.17. SLM proses parametrelerine ve yapı oryantasyonlarına bağlı değişen çubuk elemanların mikrosertlik değerleri 134

Şekil 5.1. Lazer ışıması altındaki toz yatağının termal davranış şematiği 145

Şekil 5.2. Toz yatağının üst yüzeyleri boyunca doğal konveksiyon ısı akısının gösterimi 147

Şekil 5.3. AlSi10Mg alaşımın sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri 151

Şekil 5.4. SLM sürecini simüle etmek için kullanılan sonlu eleman modeli 154

Şekil 5.5. Lazer gücü 180 W ve tarama hızı 600 mm/s lazer parametreleri kullanılarak $t=5{,}79x10^{-4}$ saniyede elde edilen (a) lazer ışınımını, (b) sıcaklık dağılımı ve (c) faz ayrımını gösteren sonlu elemanlar analizi sonucu 157

Şekil 5.6. 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı kullanılarak elde edilen SLM sürecinin sayısal analizde farklı konumlardaki toz tanelerinin zaman bağlı sıcaklık değişimini 158

Şekil 5.7. 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı kullanılarak elde edilen SLM sürecinin sayısal analizde farklı toz yatağı konumlardaki sıcaklığın derinlik boyunca değişimi 161

Şekil 5.8. 200 μm çaplı dairesel tarama hattının üst noktasında oluşan farklı işlem parametrelerine bağlı sıcaklık değişimi 165

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.9. 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı parametrelerine sahip toz yatağına ait ısıl dağılım ve eriyik havuz yapısına ait sonlu elemanlar analiz sonuçları 167

Şekil 5.10. 200 µm çaplı dairesel tarama hattının üst noktasında oluşan farklı işlem parametrelerine bağlı eriyik havuz ölçüleri 168

Şekil 6.1. Kafes yapı tasarımı ve geliştirme süreci akış şeması..... 178

Şekil 6.2. Parametrik tasarım süreci 180

Şekil 6.3. Temel 3DGAN yapısı..... 182

Şekil 6.4. 3DGAN tarafından üretilmiş 3B sentetik kafes yapı tasarım seçenekleri 183

Şekil 6.5. GAN tarafından oluşturulan 3D modellerin düzenlenme süreci 185

Şekil 6.6. BDT verileri ve 3D baskılı modeller arasında boyutsal karşılaştırma..... 191

Şekil 6.7. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg kafes yapıları için basma testiyle elde edilen gerilme gerinim grafiği 200

Şekil 6.8. Kafes tasarımları için maksimum bağıl gerilme ve bağıl yoğunluk haritası .. 201

Şekil 6.9. Hooke yasası ve Gibson-Ashby denklemleri ile belirlenen elastik modülün karşılaştırılması..... 206

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 1.1. Seçici Lazer Eritme (SLM) Eİ yöntemi ile üretilmiş kafes yapılı monolitik yanma odası..... 2

Resim 3.1. 3B baskılı kafes yapı modelleri (a) üretildiği gibi, (b) destek yapısı çıkarma işlemi sonrası..... 64

Resim 3.2. Basma testi sırasında farklı hücresel numunelerin deformasyonları 71

Resim 3.3. Basma testi sonrası hücresel numunelerdeki kırılma ve çatlak oluşumları .. 73

Resim 4.1. AlSi10Mg tozuna ait (a) SEM görüntüsü ve (b) toz boyutu dağılımı 86

Resim 4.2. Çubuk numune setlerinin SLM baskı tablasındaki konumları 88

Resim 4.3. Concept Laser M2 Cusing SLM 3B yazıcıya ait üretim haznesi..... 96

Resim 4.4. Numunelerin SLM üretimi (a) geniş alanlı unsurların adacık tarama stratejisiyle üretimi, (b) dar alana sahip unsurların üretimi, (c) ince unsurların üretimi..... 96

Resim 4.5. SLM yöntemiyle üretilen çubuk eleman numuneleri ve SET 4 parametreleriyle üretilen numuneye ait detay görüntüsü 97

Resim 4.6. Numunelerin hassas kesim cihazı ile kesilme süreci..... 98

Resim 4.7. Soğuk kalıplama aşamaları..... 99

Resim 4.8. Vickers tipi mikrosertlik cihazı 102

Resim 4.9. SLM ile üretilen baskı yüzeyine dik çubuk eleman numunelerinin üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri 104

Resim 4.10. SLM ile üretilen baskı düzlemine 75° açılı çubuk eleman numunelerinin üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri..... 105

Resim 4.11. SLM ile üretilen baskı yüzeyine 45° açılı çubuk eleman numunelerinin üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri..... 106

Resim 4.12. Farklı lazer enerji yoğunlukları ile üretilen çubuk eleman numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri 108

Resim 4.13. Dik açılı ve 1.5 mm çaplı çubuk eleman numunelerde lazer enerji yoğunluklarına bağlı olarak değişen yapısal kusurlar ve porozite tipleri... 111

Resim 4.14. SET 1 işlem parametreleri ile üretilmiş 0,6 mm çaplı dik açılı SLM çubuk eleman numunelerinin lazer enerji yoğunluğuna bağlı eriyik havuz büyüklükleri ve şekli..... 114

Resim **Sayfa**

Resim 4.15. Aynı lazer enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen farklı lazer güç yoğunluğu ve tarama hızları ile üretilmiş dik açılı 0,6 mm çaplı SLM çubuk eleman numunelerinin mikroyapısının kıyaslanması 117

Resim 4.16. Delikli ince unsurun kesit ve üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri 120

Resim 4.17. 80 Watt lazer gücü ve 600 mm/s lazer tarama hızı ile üretilen 0,8 mm çaplı dik açılı çubuk elemanın mikroyapısı..... 126

Resim 4.18. 133 Watt lazer gücü ve 400 mm/s lazer tarama hızı ile üretilen 0,6 mm çaplı dik açılı çubuk elemanın mikroyapısı..... 128

Resim 4.19. 53 Watt lazer gücü ve 400 mm/s lazer tarama hızı ile üretilen 0,6 mm çaplı dik açılı çubuk elemanın mikroyapısı..... 130

Resim 4.20. 80 Watt lazer gücü ve 600 mm/s lazer tarama hızı ile üretilen 0,6 mm çaplı baskı tablasıyla 75° açılı çubuk elemanın mikroyapısı..... 131

Resim 4.21. 200 W lazer gücü ve 600 mm/s lazer tarama hızıyla üretilen 0,6 mm çaplı dik çubuk eleman kesitinin orta noktasına ait mikrosertlik test uygulaması..... 133

Resim 6.1. Üretilmiş AlSi10Mg kafes yapı test numunelerinin baskı oryantasyonları.. 189

Resim 6.2. Basma testi boyunca hücresel numunelerin deformasyon aşamaları 194

Resim 6.3. Basma testinin ardından çeşitli hücresel numunelerde çatlak oluşumları ve deformasyon türleri..... 197

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
E	Elastikiyet modülü (MPa)
GPa	Giga paskal
MPa	Mega paskal
Mg	Magnezyum
ms	Milisaniye
µm	Mikrometre
σ	Gerilme
ε	Gerinim
δ	Deformasyon
Ø	Çap (mm)
°C	Santigrat derece
υ	Poisson oranı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
3D/3B	3 Boyutlu
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum oksit
AlSi10Mg	Alüminyum silisyum on magnezyum
BDT/CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DfAM	Design for Additive MAnufacturing (Eklemeli İmalat için Tasarım)
EDS	Energy Dispersive Spectrometry (Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
FDM	Fused Deposition Modeling (Eriyik Biriktirme Tekniği)

Kısaltmalar	Açıklamalar
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Tekniği)
GAN	Generative Adversarial Networks (Çekişmeli üretici ağ)
MJ	Material Jetting (Malzeme püskürtme)
Nd:YAG	Neodimyum-Yttrium Alüminyum Granat
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SLA	Stereolithography Apparatus (Tarayarak Işıkla Kürleme)
SLM	Selective Laser MElting (Seçici Lazer Eritme)
STL	Stereolitografi
Ti6Al4V	Titanyum 6-Alüminyum 4-Vanadyum
TPMS	Triply Periodic Minimal Surfaces (Üçlü Periyodik Minimal Yüzeyler)
TO	Topoloji Optimizasyonu
UV	Ultraviyole (Mor Ötesi)

1. GİRİŞ

Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor ve maliyetli olan kafes yapılar gibi geliştirilmiş işlevselliğe ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip yapılar, tasarım esnekliği sunan Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemleri kullanılarak hızlı ve düşük maliyetle üretilebilir hale gelmiştir. Özellikle kafes yapılarda, kendisini oluşturan hücresel yapı tasarımlarının manipülasyonu ile ayarlanabilir mekanik davranışlar elde edilebilmekte ve havacılık ve otomotiv gibi ağırlığın ve işlevselliğin ön planda olduğu sektörlerde kullanılmaktadır.

Araştırma konusu

3 boyutlu baskı veya katmanlı üretim olarak da bilenen Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemi geleneksel talaşlı üretimin aksine 3 boyutlu bilgisayar destekli tasarım (3B BDT) verisinin dilimlenerek katmanlı olarak üretilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır [1,2]. 1980'lerde yavaş ve maliyetli olan prototip modeller yapmak için geliştirilen Eİ teknolojileri, hızla gelişerek günümüzde, işlevsel ve üstün nitelikli nihai ürünlerin pratik bir biçimde imalatına olanak verir hale gelmiştir. Karmaşık parçalar için düşük üretim maliyetleri, monolitik yapıları tek adımda üretebilme yetileri ve mikrometre hassasiyetinde üretim kabiliyetleri gibi avantajlarından dolayı Eİ teknolojileri, başta uzay [3], otomotiv [4], medikal [5,6] olmak üzere mimari [7], eğitim [8] ve tekstil [9] vb. gibi birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle, geleneksel yöntemlere kıyasla teorik olarak limitsiz tasarım uzayı sunan bu teknolojiler sayesinde yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip karmaşık kafes yapılar da, hızlı ve kolay üretilebilir hale gelerek önemli bir araştırma alanı olmuştur.

Katı gövdelerin, belirli bir düzende hizalanan kafes elemanlarıyla (düğümler ve düğümleri birbirine bağlayan çubuk elemanları) yer değiştirilmesiyle yüksek dayanım/ağırlık oranına ve benzersiz özelliklere sahip kafes yapılı parçalar elde edilebilir. Kafes yapılar, birleştirme elemanları kullanarak oluşturulan, yükleri taşıyabilen ve genellikle hafif ve dayanıklı yapısal sistemlerdir. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesi oldukça zor olan kafes yapılar, Eİ yöntemleri ile kolayca üretilerek bileşenin mekanik performansının artarken, ağırlık ve üretim maliyetini belirgin bir şekilde azalmasının arzulandığı çeşitli uygulamalarda etkin bir biçimde kullanılabilir (Resim 1.1). Yüksek dayanım / ağırlık oranına sahip kafes yapıları aynı zamanda gelişmiş ısıl, ses ve titreşim yalıtım özellikleri de sergileyebilmektedir [10-12]. Kafes yapılar genel olarak köpükler gibi düzensiz (stokastik) ve düzenli (periyodik)

hücresel yapılar olarak üretilebilmektedir. Birincisinde mükemmel termal ve akustik yalıtım özellikleri elde edilebilirken [13,14], diğeri ise enerji emme, mukavemet ve ayarlanabilir rijitlik gibi özelleştirilmiş mekanik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilirler [15]. Ayrıca bu yapılar, yüksek yüzey alanı-hacim oranı ile doku mühendisliği gibi diğer uygulamalarda ve kemik hücrelerinin yapışması ile kemik onarımı gibi diğer uygulamalarda da çok etkin kullanılabilmektedir [16,17].



Resim 1.1. Seçici Lazer Eritme (SLM) Eİ yöntemi ile üretilmiş kafes yapılı monolitik yanma odası [18]

Kafes yapıların üretiminde geleneksel olarak döküm, toz metalürjisi, sac şekillendirme/bağlama ve tel dokuma gibi birçok yöntemler kullanılabilmektedir [19]. Fakat bu yöntemlerle kafes yapılarının üretilmesi yüksek bir ilk yatırım maliyetinin ardından ön hazırlık ve ardıl işlem nitelikli işçiliği gerektirmektedir. Bu durum üretimi oldukça maliyetli, zaman alıcı ve zahmetli bir hale getirdiğinden geleneksel yöntemlerle kafes yapısı üretimi zaruri olmadıkça tercih edilen bir yöntem değildir. Bahsedildiği üzere, doğası gereği sınırsız tasarım esnekliği sunan Eİ teknolojileri ile, bu tür girift yapılar uzman bilgisi gerektirmeden tek bir adımda hızlı bir biçimde üretilebilmektedir. Ek olarak, Eİ teknolojileri ile katı parçaları kafes yapılar şeklinde oluşturmak, hem hammadde tüketimini hem de baskı süresini azaltarak bileşenlerin daha düşük maliyetle üretimini sağlamaktadır. Parçaların kafes yapılı üretilmelerinin diğer bir avantajı ise artan yüzey alanı/hacim oranı ile ısıl girdiye bağlı kalıntı gerilmelerin minimize edilebilmesidir [20]. Bu nedenlerden dolayı geleneksel yöntemlerin aksine Eİ işlemlerinde mümkün olan her durumda kafes yapılarının tercih edilmesi önerilmektedir [20].

Kafes yapılarının eklemeli imalatı ile geliştirilmiş performanslı ürünler üretilebilmekle birlikte, fonksiyonel bir kafes yapısının tasarımında ve üretiminde dikkat edilmesi gereken

birçok önemli faktör vardır. Dolayısıyla bu yapılar, özellikle Eİ teknolojilerinin tasarım esnekliğinden maksimum düzeyde yararlanmayı amaçlayan Eklemeli İmalat için Tasarım (İng. Design for Additive Manufacturing, DfAM) kavramının ilgi konusu haline gelmiştir. Hücresel yapılar gibi amaca yönelik en etkin tasarımı elde etmeyi hedefleyin Eklemeli İmalat için Tasarım (DfAM) yaklaşımı kişiselleştirme için yeni fırsatlar, ürün performansında iyileştirmeler ve üretim maliyetlerinde azalma sağlamaktadır. DFAM yaklaşımıyla kafes yapıların en küçük birimi olan hücresel yapılar tasarlanırken minimum duvar kalınlığı, yüzey kalitesi ve destek yapısı gibi sınırlamalar dikkate alınması gereken kriterler arasındadır. Dolayısıyla kafes yapılı sistemlerin tasarımı ve Eİ ile üretiminde, son ürün kalitesi büyük ölçüde tasarım ve proses parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle her uygulama ve malzeme için proses parametrelerinin optimizasyonu gereklidir.

Son yıllarda hızla gelişen yapay zeka algoritmaları, Eİ alanında da hızlı tasarım optimizasyonu, yeni malzeme geliştirilmesi, baskı parçalarının ayıklanması gibi uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle Üretken Çekişmeli Ağ (İng. Generative Adversarial Networks, GAN) algoritması, veri kümesinden öğrenerek karmaşık ve yenilikçi yapıları otomatik olarak üretebilme yeteneği ile eklemeli imalat için yenilikçi kafes yapı tasarımlarında etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu sayede, kafes yapılar için optimize edilmiş geometriler ve daha iyi mekanik özellikler elde edilebilir. Ayrıca, GAN hızlı ve etkili bir şekilde büyük miktarda tasarım alternatiflerini araştırarak, kullanıcıların en uygun tasarımı seçmesine yardımcı olmaktadır. Literatürde derin öğrenme temelli GAN algoritmasının kafes yapı tasarımlarına dahil edildiği sınırlı uygulama vardır. Sonuç olarak GAN ile tasarlanan kafes yapıların eklemeli imalat süreçlerine dahil edilmesiyle daha yüksek performanslı ve özelleştirilmiş kafes yapıların üretilebilirliği önemli bir araştırma konusudur.

Araştırmanın amaç ve hedefleri

Bu tezin amacı, farklı tasarım ve proses parametrelerinin Eİ ile üretilen kafes yapılarda yüzey, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesidir. Her ne kadar çalışma metallik kafes yapılar üzerine yoğunlaşmış olsa da, farklı kafes yapı tasarımlarının mekanik özelliklerine etkisinin ön çalışması için nispeten daha esnek çalışma prensibi ve proses parametre optimizasyonu gerektirmeyen fotopolimer esaslı MutiJet (MJ) baskı yöntemi kullanılmıştır. Bu ön çalışmadan edinilen tecrübe ve bilgi birikimi ile metalik kafes

elemanlarının, Seçici Lazer ile Ergitme (İng. Selective Laser Melting – SLM) Eİ yöntemiyle optimum üretimini sağlamak amacıyla farklı işlem parametreleri ve baskı oryantasyonları kullanılarak AlSi10Mg çubuk elemanları (ing. strut) üretilmiştir. Elde edilen tasarım ve üretim kriterleri ışığında, farklı bağıl yoğunluklara sahip özgün kafes yapılarına ait mekanik davranışların belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece, fotopolimer ve metal temelli Eİ yöntemi ile üretilen kafes yapılarının tasarımı, üretimi ve mekanik özelliklerinin tahmini için kapsamlı bir metodoloji sunulmuştur. Kafes yapılardaki kritik ince unsurların baskı oryantasyonuna ve işlem parametrelerine (lazer ve tarama parametreleri) bağlı gözeneklilik, pürüzlülük ve mikroyapıları belirlenmiştir. Elde edilen veriler dikkate alınarak kafes yapılarda, hücresel geometrinin, Eİ işlem parametreleri ve malzeme özelliklerinin nihai parçanın mekanik, morfolojik ve boyutsal tamlık özelliklerine etkisini tahmin etmede kullanılacak bir metodolojinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böylece uygulamaya yönelik olarak kafes yapı tasarımlarının manipülasyonu ile ayarlanabilir mekanik davranışlar elde edilmesi öngörülmüştür. Aşağıda çalışma hedeflerinin bir listesi verilmiştir.

- Kafes yapı tasarımında kullanılan teori ve kriterlerin (rijitlik kriterleri, mekanik davranış mekanizmaları ve kiriş teorileri gibi) anlaşılması,
- Teorik olarak farklı rijitlik ve mekanik davranışa sahip olması beklenen farklı bağıl yoğunluktaki kafes yapıların modellenmesi,
- Eklemeli imalat için tasarım kriterlerinin tayini. Kafes yapı tasarımlarının üretim, maliyet ve mekanik özelliklere etkilerinin araştırılması
- Parametrik kafes tasarım verilerinden makine öğrenmesi temelli yeni kafes modellerinin oluşturulması,
- Kafes yapıların MultiJet (MJ) baskı yöntemiyle üretilerek tasarım parametrelerinin ön değerlendirilmesi,
- Farklı baskı oryantasyonuna (yatay eksenle 45°, 75°, 90°) ve çapa sahip (Ø 0,2 – 1,5 mm) kafes yapı çubuklarının Seçici Lazer ile Ergitme (Selective Laser Melting - SLM) teknolojisiyle eklemeli imalatı,
- Farklı işlem parametreleri ve baskı oryantasyonları ile üretilen metal kafes yapı çubuklarının boyutsal doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğünün saptanması,
- SLM 3B yazıcı ve AlSi10Mg tozları kullanılarak dolu hacimli kafes yapı çubuk numunelerinin karakterizasyonu ve enerji yoğunluğu/gözeneklilik ilişkisinin kurulması,

- Numunelerin yüzey morfolojisi ve eriyik havuz yapısının incelenmesi, işlem parametreleriyle olan ilişkisinin anlaşılması,
- Lazer enerji yoğunluğu ve baskı oryantasyonu gibi proses ve tasarım parametrelerin tanecik ve faz oluşumu gibi mikroyapısal özelliklere etkilerinin saptanması,
- Kafes yapılı numunelerde mekanik özelliklerin belirlenmesi,
- Eİ işlem parametreleri, geometri ve malzeme ilişkisi bütüncül olarak değerlendirilip, ilgili verilerin yapının mekanik, fiziksel ve boyutsal özelliklerine etki derecesinin saptanması,
- Kafes yapıların optimum işlem parametrelerinin tahmini için analitik modelin oluşturulması,
- Kafes yapıların kırılma mekanizmaları ve mekanik performanslarının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi ve analitik sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Araştırmanın özgün yönü

Literatürde Eklemeli İmalat (Eİ) ile üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerini araştıran çok sayıda yayın bulunmaktadır [21-25]. Bu çalışmalarda; malzeme özellikleri, üretimde kullanılan işlem parametreleri ve yapısal geometri arasındaki bağlantılar genelde dikkate alınmayarak sadece katı modellerin geometrik yapısal optimizasyona dayalı birim hücrelere dönüştürülmesine odaklanılmaktadır. Bu şartlar altında üretilen kafes yapı tasarımlarının performansları düşüktür ve kritik parçalarda kullanımları riskli olabilir. Ayrıca 3B yazıcı üretici firma bilgi katalogları ve literatürden malzemeye dayalı optimum işlem parametrelerine ulaşılabilse de bu parametreler, parça geometrisi faktörünün göz ardı edilmiş olmasından dolayı kafes yapı üretimi için yetersizdir. SLM gibi toz yataklı sistemler için geometrik üretim sınırına yakın olan 1 mm veya daha küçük boyutlara sahip ince unsurlardan oluşan yapıların üretiminde özelleştirilmiş işlem parametreleri kullanılması gereklidir. Bu nedenle lazer temelli toz yataklı sistemler kullanılarak küçük çaplı (0,2 – 1,5 mm) çubuk elemanlarının üretiminde, işlem parametreleri ve yapı yönlendirmelerinin, çubuk elemanın yüzey kalitesi, morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi belirlenmelidir.

SLM sürecinde farklı tarama stratejileri, lazer gücü ve tarama hızına bağlı olarak ince yapıların yüzey, mikroyapı ve mekanik özellikleri önemli farklılıklar göstermektedir [26]. İnce unsurların SLM ile imalatı esnasında, unsuru çevreleyen toz yatağı boyunca önemli termal etkiler meydana gelmektedir. Bu durum erimemiş tozların unsur yüzeyine

sinterlenmesi, iç boşluklar, çatlaklar ve boyutsal sapmalar dahil olmak üzere çeşitli kusurların oluşmasına neden olmaktadır [27]. Bu, ince kafes yapıların kritik parçalarda etkin bir biçimde kullanımını engellemektedir. Yine her ne kadar önceki çalışmalar lazer temelli toz ergitme ile kafes yapıların üretim karakteristiklerinin anlaşılmasına katkıda bulunmuş olsa da işlem parametreleri ve baskı oryantasyonun kafes yapı çubukların boyutsal doğruluğu, mikroyapıları ve mekanik özelliklerine etkileri sistematik bir şekilde irdelenmemiştir. Bu tez çalışması, ince unsurlu yapıların eklemeli imalatındaki etkenleri bütüncül şekilde ele alarak, bu alanda literatüre önemli katkı sağlamaktadır.

Literatürde SLM yöntemiyle kafes yapılarının üretiminde genellikle Ti6Al4V ve paslanmaz çelik (316L) gibi üretim süreçleri nispeten kolay malzemeler tercih edilmiştir [28-30]. Havacılık ve otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan alüminyum alaşımları (AlSi10Mg) yüksek termal iletkenliğe, yüksek yansıtıcılığa ve dolayısıyla düşük lazer absorpsiyonuna sahip oldukları için hızlı erime ve katılaşmanın olduğu SLM yöntemi kullanılarak üretilmesi daha zordur [31]. Bu tez kapsamında, işlem parametreleri ile malzeme ilişkisini, özellikle lazer gücü ve ilerleme hızı gibi faktörleri detaylıca tanımlayarak, alüminyum alaşımlı kafes yapıların üretiminde karşılaşılan zorluklar aşılmıştır. Teorik çerçevede, farklı bağıl yoğunluklara sahip ve çeşitli mekanik davranışlar göstermesi beklenen özgün kafes yapıları modellenmiştir. Süreç tasarımı ve geometrik tasarımın birleştirildiği entegre kafes yapıları kullanılarak, optimal işlem seçimi ve kalite tahminleri için bir rehber oluşturulmuştur.

Literatürde genellikle bilinen kafes yapılarının üretim ve test süreçleri irdelenmiştir [32-34]. Özgün kafes yapı tasarımları için bazı çalışmalarda topoloji optimizasyonu gibi yöntemler kullanılsa da bu kısıtlı çözüm uzayı optimum kafes geometrisinin elde edilmesini engellemektedir. Çalışmada klasik kafes yapılara ait parametrik tasarım verileri kullanılarak eğitilen makine öğrenmesi temelli GAN modeliyle benzersiz kafes yapı tasarımları elde edilmiştir. GAN yapay zeka algoritmasıyla elde edilen bu 3 boyutlu kafes yapıları SLM tekniği ile üretilerek yüzey doğrulukları ve mekanik özellikleri bilenen kafes yapılarıyla kıyaslanmıştır.

Literatürde baskı oryantasyonuna, işlem parametrelerine ve unsur çapına bağlı olarak hatalı üretilmiş birçok kafes yapısından bahsedilmesine [35,36] karşın hata sebepleri yeterince açıklanamamıştır. Bu çalışmada, SLM teknolojisi için işlem parametrelerine bağlı olarak çubuk eleman geometrisi üzerinde oluşan termal gradyanlar termomekanik sonlu elemanlar

analizi ile belirlenerek aşırı sıcak bölgeler ve tam erimenin olmadığı bölgeler tahmin edilmiştir. Böylece üretim hataları önceden öngörülerek tasarım ve baskı parametreleri optimizasyonuyla minimize edilebilecektir.

Araştırma planı

Tezin nihai hedefi, Eİ işlem parametreleri, hücresel yapı tasarımları ve malzeme özellikleri dikkate alınarak kritik mühendislik uygulamaları için etkin kafes yapılarının üretilmesi için kapsamlı bir metodoloji geliştirmektir. Tez sistematik ilerleyen 6 ana bölümden oluşmaktadır.

Bölüm 2'de teorik altyapının oluşturulması için Eklemeli İmalat yöntemleri ve Eklemeli İmalat için Tasarım (DfAM) kriterlerinden bahsedilmiştir. DfAM ile geometri ve yapı özelleştirmesi, ürün performansını ve işlevselliğini doğrudan etkilemektedir. Optimize edilmiş tasarımlar, eklemeli imalatın sunduğu özgürlüğü kullanarak, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan karmaşık ve hafif parçaların üretimine olanak tanımaktadır. Bu kafes yapılara ait teorik altyapı da bu bölümde kurulmuştur. Bölüm 2'de ayrıca SLM üretim ve analiz esnasında gerekli fizik denklemleri ve grafikler ile lazer malzeme etkileşim mekanizması temelleri yer almaktadır.

Bölüm 2'de kurulan teorik altyapı nezdinde oluşturulan bilinen ve özgün kafes yapıları Bölüm 3'te fotopolimer reçinenin kürlenmesine dayanan MultiJet (MJ) yöntemiyle üretilmiş, boyutsal ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Bu ön değerlendirme çalışmasında ayrıca derin öğrenme ile tasarlanan kafes yapılarının mekanik testleri de yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, kafes yapı elemanlarının davranışlarının anlaşılması ve tahmin edilmesi için değerli bilgiler içermektedir.

Bölüm 4'te, SLM işlem parametreleri (lazer gücü, tarama hızı) ve yapı yönelimlerinin (yatay eksenle 45°, 75°, 90°), AlSi10Mg çubuk elemanların (Ø 0,2 – 1,5 mm) boyutsal doğruluğu, mikroyapısal morfolojisi ve mekanik performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma, lazer enerji yoğunluğunun, imal edilen numunelerin gözenekliliği, eriyik havuz boyutu ve mikrosertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bölüm 5’te SLM süreci bir sonlu elemanlar yazılımı ile (COMSOL) simüle edilmiştir. Kafes yapıların ince silindirik çubuk elemanlarının imalatı sırasında eriyik havuzdaki ısıl dağılımı araştırmak için üç boyutlu bir sayısal model oluşturulmuştur. Bu model, lazer gücü, tarama hızı, toz ve koruyucu gaz özellikleri ve çubuk eleman çapı dikkate alınarak SLM'nin sıcaklığa bağlı özelliklerini belirlemede kullanılmıştır.

Bölüm 6’da ise bir önceki bölümlerde belirlenen optimal parametreler kullanılarak farklı kafes yapılarının üretimi sağlanmıştır. Makine öğrenmesi yöntemiyle üretilen bu kafes yapı tasarımları, süreç ve geometrik tasarımı birleştiren entegre hücresel yapılı parçaların tasarım ve üretiminde kalite tahmini için bir kılavuz niteliğindedir. Ardından üretilen kafes yapıları mekanik testlere tabi tutularak tasarım ve üretim parametrelerinin yapının dayanımına olan etkileri belirlenmiştir.

Son bölümde ise bu tezden elde edilen sonuçlar tartışılmış ve gelecekteki çalışmalar ele alınmıştır.

2. EKLEMELİ İMALAT VE KAFES YAPILARIN TEMELLERİ

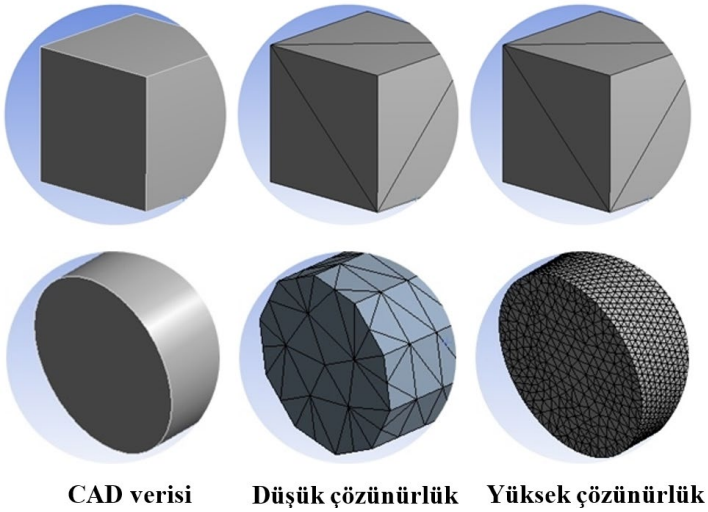
2.1. Giriş

Tezin literatür çalışması bölümü, eklemeli imalat yöntemlerinin kafes yapıların tasarımı ve üretimi üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmayı hedeflemektedir. Bu bölümde, eklemeli imalat teknolojilerinin tarihsel gelişimi, temel prensipleri ve farklı üretim yöntemleri ele alınmıştır. Ayrıca, kafes yapıların tasarımı ve mekanik özelliklerini etkileyen üretim parametreleri ve süreçler hakkında bilgi verilmiştir. Bu literatür incelemesi, kafes yapıların tasarımı ve eklemeli imalat süreçlerinin optimizasyonunda, malzeme bilimi, mühendislik ve eklemeli imalat için tasarım etkileşimlerini ayrıntılı olarak ele almaktadır. Bu bağlamda, literatür çalışması bölümü, tezin ilerleyen kısımlarında gerçekleştirilecek deneysel ve analitik çalışmalar için sağlam bir temel oluşturarak, eklemeli imal edilen kafes yapıların performansının iyileştirilmesine yönelik stratejiler ve inovasyonlar sunmayı hedeflemektedir.

2.2. Eklemeli İmalat Teknolojileri

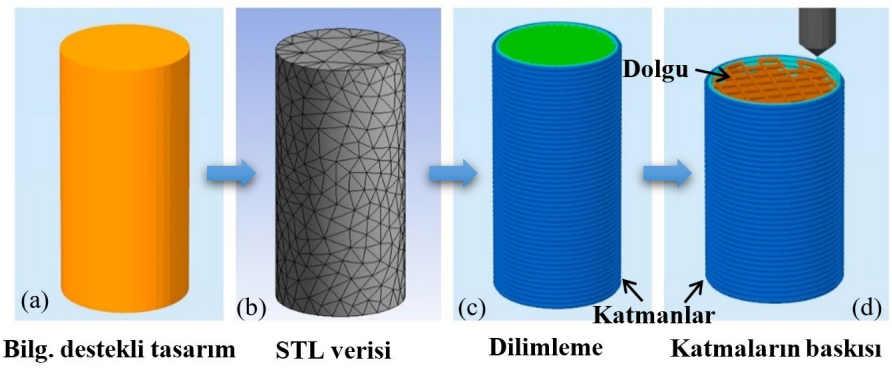
Popüler olarak 3 boyutlu (3B) baskı olarak da bilinen Eklemeli İmalat teknolojileri, ASTM tarafından "3B model verilerinden nesneler yapmak için malzemeleri birleştirme süreci" olarak tanımlanmaktadır [1]. Oldukça yeni bir üretim sürecinin bu tanımı, esas olarak, parçaların, talaş kaldırmaya dayalı geleneksel yöntemlerinin aksine, malzemenin katmanlar halinde eklenerek üretildiği bir dizi teknolojiye atıfta bulunmaktadır. Böylece fiziksel prototipler, herhangi bir başka teçhizat kullanmadan doğrudan dijital model verilerinden kolayca ve uygun maliyetli bir şekilde üretilebilir. Süreç, dilimleme yazılımında kullanılan .STL formatındaki 3 boyutlu bilgisayar destekli tasarım (3B BDT) verilerinin oluşturulmasıyla başlamaktadır. Yaygın olarak kullanılan .STL (standart üçgen dili veya yüzey mozaikleme dili), sınırlı sayıda bitişik üçgen yüzey kullanılarak geometrilerin ifade edildiği bir dosya formatıdır. Bu üçgenlerin yoğunluğu, kavisli yüzeyler için geometrik çözünürlüğü etkilemektedir (Şekil 2.1). Daha yüksek çözünürlük için üçgen ağ elemanları, karmaşık ve eğimli yüzeylerde daha yoğun (Şekil 2.1b), düzlemsel yüzeylerde ise dosya boyutunu azaltmak için daha kaba (Şekil 2.1a) olmalıdır. STL dosyası yüzey verileri dışında pürüzlülük, renk ve diğer yüzey işlevleri gibi parça özelliklerini barındırmaz. STL'deki bu

sınırlamaların üstesinden gelmek için Poligon Dosya Formatı (PLY), Eklemeli İmalat Formatı (AMF) ve 3B İmalat Formatı (3MF) gibi diğer veri formatları geliştirilmiştir.



Şekil 2.1. STL dosya formatında BDT verisinin tanımlanmasında kullanılan ağ yapısı

Eklemeli imalat için BDT modeli hazırlama süreci Şekil 2.2'de sunulmuştur. İlk olarak, model, Şekil 2.1'de açıklanan unsur geometrisine bağlı olarak üçgen ağ yapıları (İng. mesh) ile ifade edilmektedir. Ardından, STL modeli, dilimleyici yazılım kullanılarak düzlemsel katmanlardan oluşan bir istif halinde dilimlenmektedir (Şekil 2.2c). Bu katmanlar, kullanılan eklemeli imalat yöntemine bağlı olarak ekstrüderin, lazerin veya eşdeğerinin doğrusal hareketlerini (takım yollarını) tanımlamaktadır. Katman kalınlığı, baskı hızı, yapı yönü ve destek yapıları gibi baskı parametrelerini yine dilimleyici yazılım arayüzünde belirlenmektedir. Ardından, malzeme ve zaman tasarrufu için katı nesneler belirli dolgu yoğunluğuna sahip gözenekli yapıya dönüştürebilir (Şekil 2.2d). Bu parametreler aynı zamanda parçanın doğruluğunu, kalitesini ve dayanımı da doğrudan etkilemektedir [37]. Son olarak takım yolu verisi 3B yazıcıya aktarılır ve baskı süreci başlatılır.



Şekil 2.2. Eklemeli imalat süreci adımları (a) BDT modeli, (b) üçgenleme, (c) dilimleme, (d) dolgu yoğunluğunu, deseni ve takım yolunu gösteren baskı ön izlemesi

2.2.1. Eklemeli imalatın tarihi

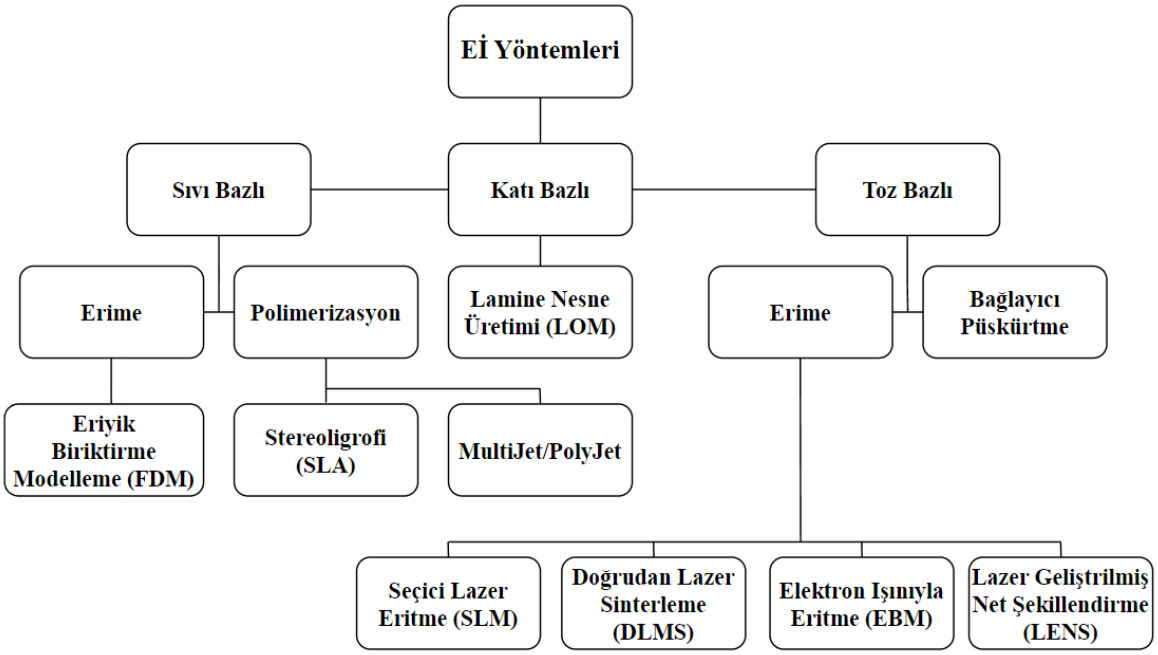
Eklemeli imalat, özellikle son yıllarda hızla gelişen ve yaygınlaşan bir üretim yöntemi olsa da, kökenleri 1980'lere kadar uzanmaktadır [38]. Eklemeli İmalat teknolojisinin kronolojik sırlaması işe şu şekilde verilebilir [39]:

- 1981: Japon araştırmacı Dr. Hideo Kodama, foto-sertleştirilebilir polimerler kullanarak üç boyutlu nesneler üretebilen bir üretim yöntemi için patent başvurusunda buldu. Bu yöntem, daha sonraki yıllarda stereolitografi (SLA) olarak adlandırıldı [40].
- 1984: Charles Hull, SLA Eİ teknolojisinin patentini aldı. Hull, 3D Systems adlı şirketi kurarak eklemeli imalat teknolojisinin ticarileşmesine öncülük etti [41].
- 1992: 3D Systems, SLA-1 adlı ilk ticari SLA makinesini piyasaya sürdü. Aynı yıl, DTM Corporation (şimdi 3D Systems'in bir parçası) seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisini geliştirdi.
- 1995: Z Corporation (şimdi 3D Systems tarafından satın alındı), bağlayıcı püskürtme (BJ) yöntemine dayalı ilk 3B yazıcıyı geliştirdi.
- 1999: Objet Geometries (şimdi Stratasys tarafından satın alındı), PolyJet teknolojisini tanıttı. Bu teknoloji, çoklu materyallerin ve renklerin aynı anda kullanılmasını mümkün kılmaktadır.
- 2001: Stratasys, malzeme ekstrüzyonu (FDM) yöntemini ticarileştiren ilk 3B yazıcıyı geliştirdi. FDM, düşük maliyetli, kullanıcı dostu masaüstü 3B yazıcıların popüler olmasına yol açtı.
- 2002: EOS, seçici lazer eritme (SLM) teknolojisine dayalı ilk ticari metal eklemeli imalat makinesini piyasaya sundu.
- 2010'lar: Eklemeli imalat teknolojileri hızla gelişmeye ve daha geniş kitlelere ulaşmaya devam etti. Yeni Eİ yöntemleri, makine ve malzeme çeşitliliği ile birlikte sektöre girdi. Biyomedikal, havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerde eklemeli imalatın kullanımı arttı.
- 2010-2020 arası: Metal eklemeli imalat alanında önemli gelişmeler yaşandı. SLM ve diğer metal Eİ yöntemleri, hafif ve karmaşık geometrili parçaların üretimi için ideal oldu.
- Günümüz: Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemleriyle birlikte pek çok sektörde kullanılmaktadır. Yeni malzemeler, üretim hızının ve parça kalitesinin arttırılması ve özelleştirilmiş üretim için uyarlanabilirlik, eklemeli imalatın yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, eklemeli imalatın tarihi, sürekli gelişen ve ilerleyen bir endüstriyi yansıtmaktadır. Geliştirilen teknolojiler ve uygulamaların genişlemesi, eklemeli imalatın öneminin ve etkisinin gelecek yıllarda daha da artacağını göstermektedir [42]. Bu nedenle, araştırmacılar ve endüstri liderleri, sürekli iyileştirme ve inovasyon ile eklemeli imalat teknolojilerinin potansiyelini en üst düzeye çıkarmaya devam etmektedir.

2.2.2. Eklemeli imalat yöntemleri

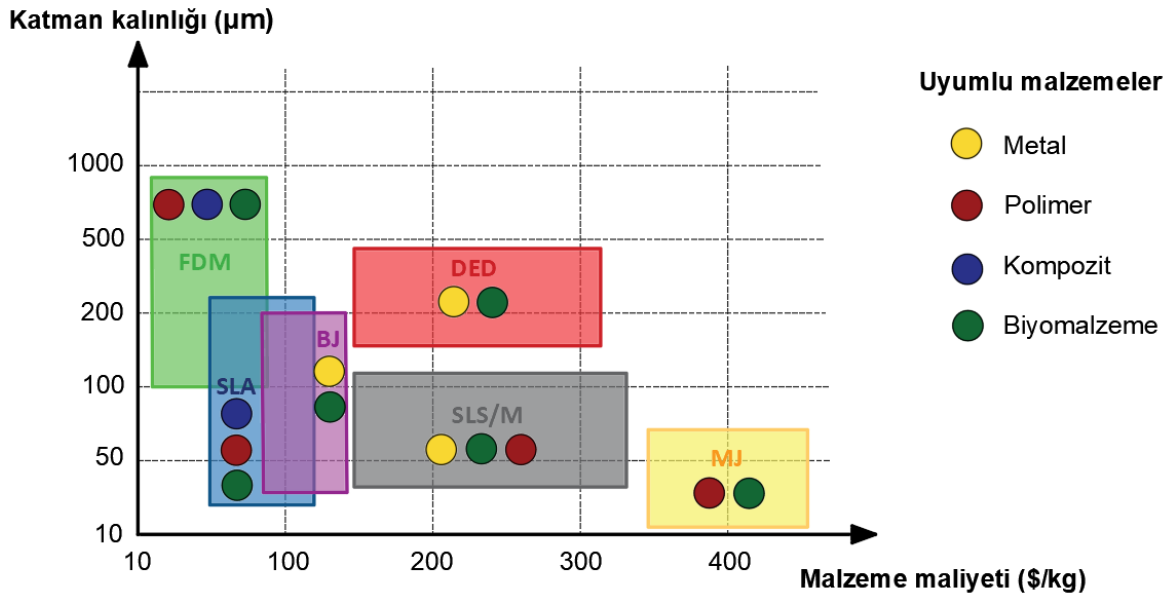
Eİ makinalarının ortak çalışma prensibi parçayı katmanlar halinde oluşturmasıdır. Fakat kullanılan sarf malzeme çeşidine ve baskı teknolojisine göre farklılık gösteren birçok Eİ tekniği mevcuttur [43,44]. Bu yöntemler; metalik tozun bir tabla üzerine serilerek lazer veya elektron ışını ile sinterlendiği/eritildiği Seçici Lazer Sinterleme/Eritme (SLS/SLM) yöntemi, fotopolimer reçinenin UV veya görünür ışık ile kürlendiği Stereolitografi (SLA) yöntemi veya termoplastik filamanın önceden ısıtılmış bir nozuldan geçirildiği ve yarı erimiş halde yığıldığı Eriyik Biriktirme Tekniği (FDM) olarak sıralanabilir. Şekil 2.3'te malzeme ve kullanım tekniğe göre Eİ yöntemlerinin tasnif şeması verilmiştir.



Şekil 2.3. Eklemeli imalat teknolojilerinin genel tasnif şeması. [45]'den uyarlanmıştır.

Çeşitli uygulamalara yönelik geliştirilen farklı Eİ yöntemleri kullandıkları malzeme ve baskı tekniğine bağlı olarak karakterize edilmektedir. Kullanılan tekniğe bağlı olarak üretilen parçanın yüzey doğruluğu, dayanımı ve morfolojik özellikleri farklılık göstermektedir.

Ayrıca üretim yöntemi maliyeti de belirlemektedir. Şekil 2.4'te bazı Eİ tekniklerinin katman kalınlıkları, maliyetleri ve kullanılabilir malzemeleri verilmiştir.



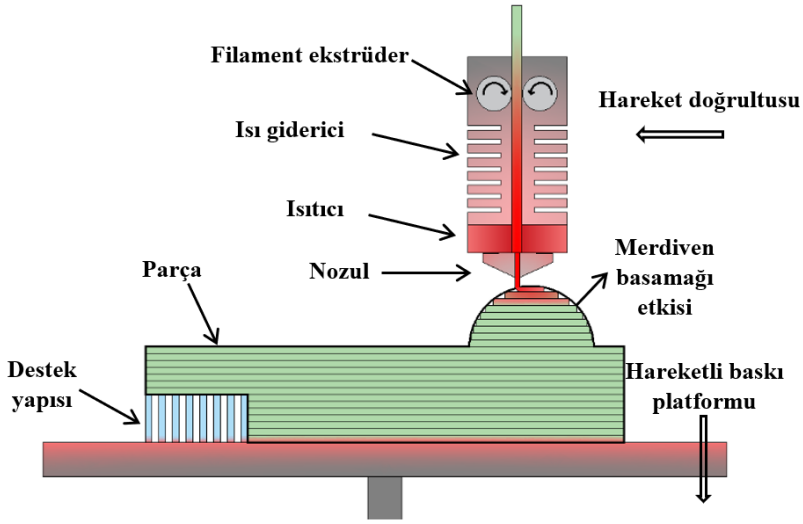
Şekil 2.4. Eİ teknolojileri için katman kalınlığı ve malzeme fiyat grafiği. Renkli daireler ilgili teknolojide kullanılabilecek malzemeleri göstermektedir [46-48].

Polimer eklemeli imalat yöntemleri

Polimer bazlı eklemeli imalat yöntemleri, özellikle plastik ve kompozit malzemelerin kullanıldığı uygulamalar için büyük öneme sahiptir. Bu yöntemler, genellikle küçük hacimli ve karmaşık geometrili polimer nesnelerin hızlı ve düşük maliyetli üretimine olanak vermektedir [45]. Birçok farklı polimer bazlı Eİ yöntemi olsa da en dikkat çekenleri Eriyik Biriktirme Tekniği (FDM), Stereolitografi (SLA) ve Malzeme Püskürtme (MJ) olarak sıralanabilir.

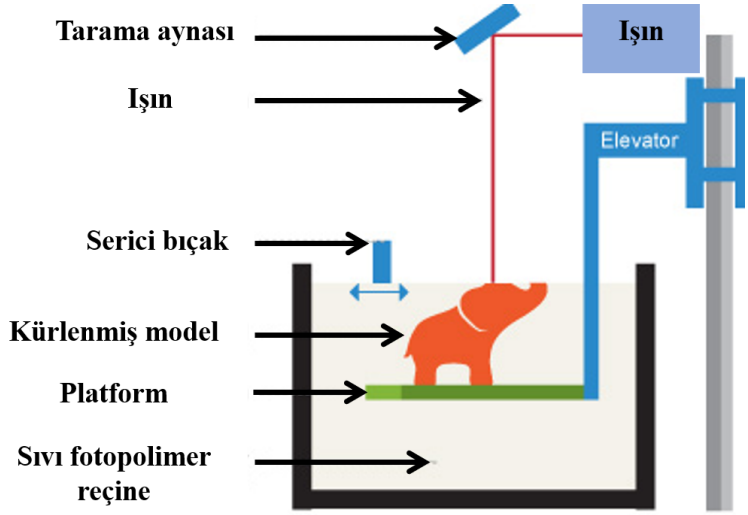
Eriyik Biriktirme Tekniği (Fused Deposition Modeling – FDM), termoplastik malzemelerin eritilerek ve katmanlar halinde ekstrüde edilerek nesnelerin oluşturulduğu bir eklemeli imalat yöntemidir [49]. FDM tekniğinde, ekstrüzyon nozulu tarafından ısıtılan ve yarı eriyik hale getirilen termoplastik malzemeler, bir yapı platformu üzerine katmanlar halinde hizalanmaktadır. Isıtılan malzeme, nozul tarafından ekstrüde edilirken soğur ve katılaşır, bu sayede nesnenin istenen şekli oluşturulur. İşlem sırasında genellikle x-y düzleminde hareket eden ekstrüder ilgili katman dilimindeki biriktirme işlemini tamamladıktan sonra yapı platformu bir katman kalınlığı (genellikle 200 µm) kadar z ekseninde aşağı iner ve bu süreç

parça tamamlanana kadar tekrarlanır. Şekil 2.5'te FDM Eİ metoduna ait işlem şematiği verilmiştir. FDM yöntemi düşük maliyeti ve sarf malzeme çeşitliliği ile en yaygın kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir.



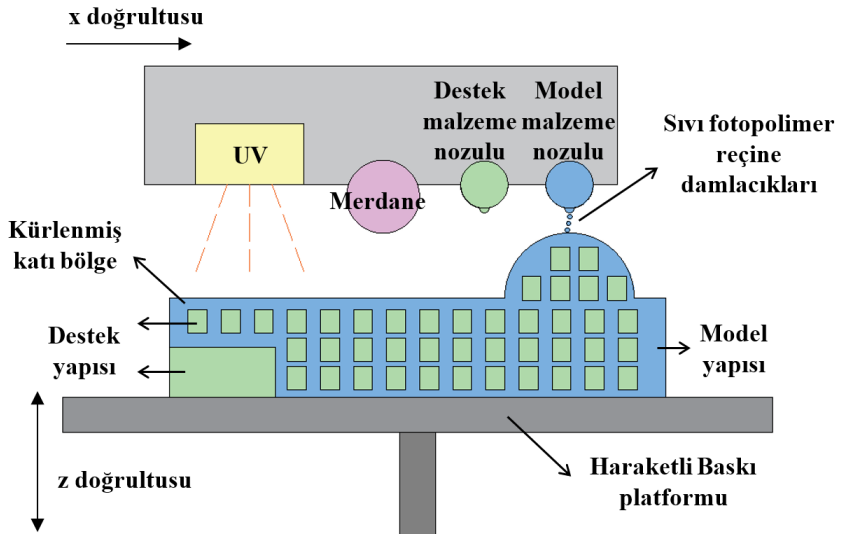
Şekil 2.5. Eriyik Biriktirme Tekniği (FDM) eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması

Stereolitografi (SLA) özel olarak tasarlanmış UV ile kürlenen fotopolimer reçineler kullanılan bir yöntemdir. Işık, tarama sistemi aracılığıyla katman şeklindeki kesiti oluşturacak şekilde yüzeye yönlendirilir ve katılaşma reaksiyonu gerçekleştirilir. İşlem tamamlandıktan sonra, platform bir katman aşağıya iner ve yeni bir reçine tabakası yayılır. Bu işlem, nesne tamamlanana kadar tekrarlanır. Şekil 2.6'da FDM Eİ metoduna ait işlem şeması verilmiştir. SLA tekniği ile oldukça hassas parçalar üretilebilir fakat elde edilen parçanın solüsyonla yıkama ve ekstra kürleme gibi ardıl işlemlere tabi tutulması gereklidir.



Şekil 2.6. Sterolitografi SLA eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması [50]

En yüksek baskı çözünürlüğüne sahip Eİ teknolojilerinden biri olan PolyJet olarak da bilenen MultiJet 3B baskı ise yine fotopolimer reçinenin UV ışıkla kürlenmesine dayanmaktadır (Şekil 2.7). Bu yöntem ile yaklaşık 16 µm tabaka kalınlığına sahip hassas parçalar üretilebilir. PolyJet 3B yazıcı, mürekkep püskürtmeli yazıcı gibi çalışmaktadır. Baskı kafası, UV ışığına maruz kaldığında katılaşan fotopolimer damlalarını püskürtür. Katmanlar, yazıcı kafası x ekseni boyunca hareket ederken bir sıra boyunca düzenlenmiş mikron düzeyinde püskürtme uçlarının eş zamanlı çalışmasıyla oluşturulur.



Şekil 2.7. PolyJet eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması [51]

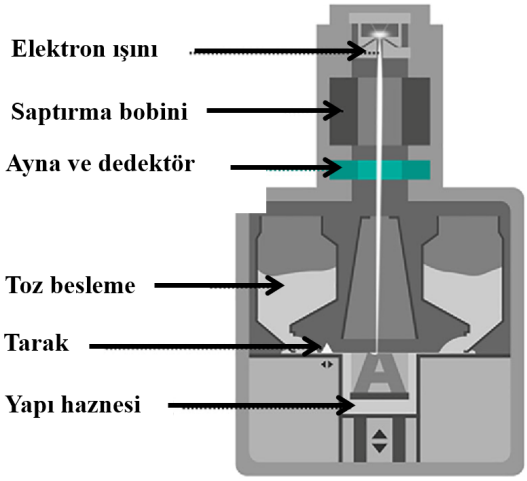
Polimer bazlı eklemeli imalat yöntemleri, günümüzde hızla büyüyen 3B baskı endüstrisinde büyük öneme sahiptir. Stereolitografi (SLA), Malzeme püskürtme (MJ) ve Eriyik Biriktirme Tekniği (FDM) gibi yöntemler sayesinde, karmaşık geometrilere sahip nesnelerin düşük hacimli üretimleri mümkün hale gelmiştir. Bu teknolojilerin kullanımı, malzeme tasarrufu, üretim sürelerinin kısalması ve maliyet avantajları gibi pek çok fayda sağlamaktadır. Gelecekte, polimer bazlı eklemeli imalat yöntemleri ve ileri teknolojilerin sürekli gelişimi ile daha hızlı, daha verimli ve daha ekonomik üretim süreçlerinin elde edilmesi beklenmektedir.

Metal eklemeli imalat yöntemleri

Metal eklemeli imalat teknolojileri, hızla gelişen 3B baskı endüstrisinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu yöntemler, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla gelişmiş mekanik performans, daha az malzeme kullanımı, karmaşık geometrilerin oluşturulması ve

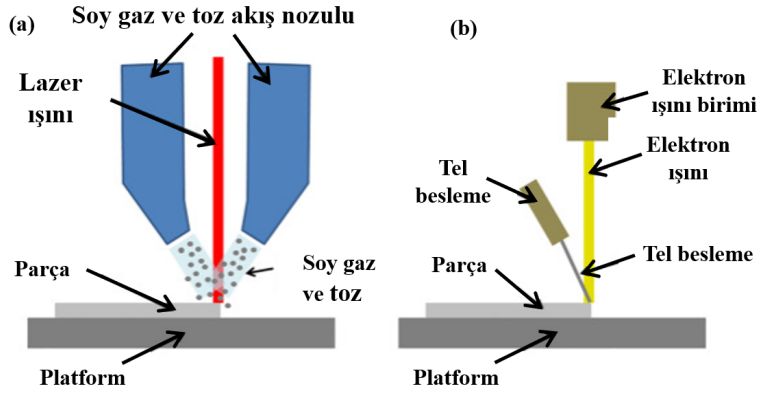
özelleştirilmiş ürünlerin üretimi gibi avantajlar sunmaktadır [52,53]. Birçok farklı metal bazlı Eİ yöntemi olsa da en dikkat çekenleri Elektron Işını Eritme (EBM) ve Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED) ve Seçici Lazer Eritme (SLM) olarak sıralanabilir.

Elektron Işını Eritme (Electron Beam Melting – EBM), elektron ışınının yüksek enerjisi kullanılarak metal toz veya tel malzemelerin katı bir nesneye dönüştürüldüğü bir eklemeli imalat yöntemidir (Şekil 2.8). EBM süreci, elektron ışınının bir vakum ortamında odaklanarak metal partiküllerinin eritilmesini ve ardından katılaşarak bir nesne oluşturmasına dayanmaktadır. Bu yöntem, özellikle yüksek mukavemetli ve sıcaklık dayanımı gerektiren bileşenlerin üretimi için uygundur. EBM, havacılık, enerji üretimi ve biyomedikal sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [54].



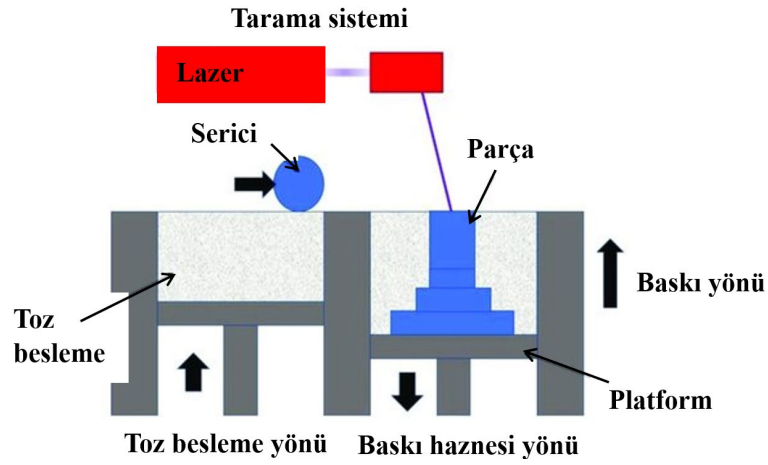
Şekil 2.8. Elektron Işını Eritme (EBM) eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması [55]

Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition – DED), metal toz veya tel malzemelerin, lazer, elektron ışını veya plazma arkı gibi enerji kaynakları kullanılarak eritildiği ve bir yapı platformu üzerinde katmanlar halinde birleştirildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. DED sürecinde, enerji kaynağı ve malzeme besleme sistemi x-y-z düzleminde hareket ederken, erimiş malzeme hızlı bir şekilde soğutulur ve katılaşır. Bu yöntem, genellikle büyük ölçekli metal bileşenlerin ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi için tercih edilir. DED, otomotiv, havacılık, enerji ve ağır makine endüstrilerinde kullanılmaktadır [56].



Şekil 2.9. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED) eklemeli imalat yöntemine ait işlem şeması (a) toz besleme, (b) tel besleme [57]

Metal Eİ yöntemlerinde en sık kullanılan yöntemlerden biri ise Seçici Lazer Eritme (İng. Selective Laser Melting, SLM) yöntemidir. SLM gibi toz yatak füzyonuna (TYF) dayanan sistemlerde 20-80 µm aralığındaki metal tozları asal gazla doldurulmuş (genellikle argon) baskı hacminde bulunan platforma serildikten sonra ilgili katmana ait kontur lazer ışını ile taranarak bu bölgedeki tozlar eritilir ve ardından hızla soğuyarak 20-60 µm kalınlığındaki katı katmanlar elde edilerek parça tamamlanır (Şekil 2.10). SLM yönteminde paslanmaz çelik (316L), Ti6Al4V ve Inconel gibi metal tozlarının yanı sıra hafifliği ve iyi mekanik özellikleri birleştiren AlSi10Mg gibi metal alaşımlarda kullanılabilir. AlSi10Mg, iyi sertliğe, dayanıklılığa ve dinamik tokluğa sahip, yaşlanma ile sertleşen ve korozyona direnci yüksek bir alüminyum alaşımdır [58]. Havacılık ve otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan AlSi10Mg, özellikle ısıl işlemden sonra iyi bir termal ve elektrik iletkenliğine sahiptir [59].



Şekil 2.10. Seçici Lazer Eritme (SLM) 3B baskı cihazına ait çalışma şeması [60]

Toz yatak füzyonu temelli sistemlerdeki odaklanmış lazer, yüksek enerji girişi ve termal gradyanlara sebebiyet vermektedir. Bu durum parça üzerinde kalıntı gerilmelerine neden

olabilmektedir. Deformasyon, çatlama ve boyutsal yanlışlık SLM'de en sık görülen kusurlar arasındadır [61]. SLM yöntemindeki lazer ışını gücü, tarama hızı, tarama deseni, katman kalınlığı gibi malzemeye bağlı bu parametreler parça üretim kalitesini doğrudan etkilemektedir [62]. Çoğu süreç geliştirme çalışmasında, en iyi parça kalitesinin elde edildiği optimum süreç ayarlarını bulmak için bu parametrelerin etkileri her malzeme için araştırılmaktadır [63]. Literatür ve firma bilgi katalogları malzemeye dayalı optimum işlem parametrelerini belirlemiş olsa da bu parametreler parça geometrisi faktörünü göz ardı etmektedir. Kafes yapısı gibi ince unsurları barındıran geometriler için özelleştirilmiş işlem parametreleri nicel gözlemlerle dayalı olarak belirlenmelidir. Ayrıca tezde kafes yapılarının üretiminde kullanılacak AlSi10Mg hafif metal alaşım tozları zayıf akışkanlığa, yüksek yansıtıcılığa ve yüksek termal iletkenliğe sahip oldukları için lazer ışını ile hızlı erime ve soğumaya dayalı SLM gibi yöntemlerle üretilmesi zordur [31]. Ayrıca, alüminyum tozları oksidasyon ve topaklaşma eğilimlidir ve düşük lazer absorpsiyonuna sahiptir [64]. Bu nedenle kafes yapıları için malzeme ve geometriye bağlı işlem parametrelerinin iyi şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak metal eklemeli imalat yöntemleri, günümüzün ileri teknoloji üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Seçici Lazer Eritme (SLM), Elektron Işını Eritme (EBM) ve Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED) gibi teknolojiler sayesinde, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve verimli şekilde karmaşık ve özelleştirilmiş metal bileşenler üretilebilir. Bu yöntemlerin kullanılması, malzeme tasarrufu, hızlı prototip oluşturma, özelleştirilmiş üretim ve sürdürülebilir üretim süreçleri gibi faydalar sağlamaktadır [65]. Gelecekte, metal eklemeli imalat yöntemlerinin gelişimi ve daha ileri teknolojilerin kullanılmasıyla, daha hızlı, daha ekonomik ve daha sürdürülebilir metal üretim süreçleri elde etmek mümkün olacaktır.

2.2.3. Yeterlilikler ve sınırlılıklar

Eklemeli imalatın başlıca avantajları arasında üretim esnekliği, geometrik karmaşıklığı olan parçaların üretilebilmesi, hızlı prototip oluşturma, kişiselleştirme ve özelleştirme, atık malzemenin azaltılması ve enerji tüketiminin düşürülmesi yer alır. Bununla birlikte, süreçlerin yavaş olması, yüksek ilk yatırım maliyetleri, malzeme ve boyut kısıtlamaları ve yüzey kalitesi ile ilgili sorunlar gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır [66]. Eklemeli imalat yöntemlerinin genel yeterlilik ve sınırlılıkları şu şekilde sıralanabilir.

Yeterlilikler:

1. Karmaşık geometrilerin üretimi: Eİ yöntemleri, geleneksel yöntemlerle zor veya imkansız olan karmaşık geometrili parçaların üretimine olanak tanımaktadır. Bu, özellikle hafiflik ve verimlilik gerektiren uygulamalar için önemlidir.
2. Hızlı prototip oluşturma: Eklemeli imalat, ürün geliştirme sürecinde hızlı prototip oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Bu sayede, tasarım sürecinde daha hızlı iterasyonlar gerçekleştirilebilir ve ürünler daha kısa sürede piyasaya sürülebilir.
3. Malzeme tasarrufu: Eklemeli imalat yöntemlerinde destek yapıları hariç üretilecek nesnenin toplam hacmi kadar malzeme kullanılmaktadır. Bu sayede, malzeme kullanımı ve atık miktarı azaltılır ve üretim maliyetleri düşmektedir.
4. Özelleştirilmiş üretim: Eİ teknolojileri, her bir müşteri için özelleştirilmiş ürünlerin ve bileşenlerin üretimine olanak tanımaktadır. Bu, özellikle tıbbi uygulamalar ve özelleştirilmiş endüstriyel bileşenler için önemli avantajlar sunmanktadır.
5. Ara üretim aşamalarının azalması: Geleneksel üretim yöntemlerinde parçaların işlenmesi, montajı ve son işlemleri için birden fazla aşama gereklidir. Eİ ile bu aşamaların çoğu azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir.

Sınırlılıklar:

1. Üretim hızı: Çoğu eklemeli imalat yöntemi, geleneksel yöntemlere göre daha düşük üretim hızlarına sahiptir. Bu, büyük ölçekli ve seri üretim için eklemeli imalat yöntemlerinin uygun olmadığı anlamına gelmektedir.
2. Yüzey kalitesi: Eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey kalitesi, genellikle geleneksel yöntemlerle üretilen parçalardan daha düşüktür. Yüzey kalitesini artırmak üzere yapılan ardıl işlemler ise maliyeti yükseltmektedir.
3. Malzeme seçenekleri: Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılabilen malzemeler, geleneksel yöntemlere kıyasla sınırlıdır. Bu nedenle, bazı uygulamalar için Eİ teknolojileri uygun olmayabilir.
4. Parça boyutu kısıtlamaları: Eklemeli imalat süreçlerinde, üretilebilecek parça boyutları belirli sınırlarla kısıtlanmıştır. Bu sınırlamalar, özellikle büyük parçaların üretimi için cihazların fiziksel boyutları ve üretim tekniğinden kaynaklanmaktadır.
5. Yüksek enerji tüketimi: Eklemeli imalat yöntemleri, yüksek enerji tüketimi gerektiren süreçlerdir. Bu, eklemeli imalatın çevresel etkilerini ve maliyetlerini artırabilir.

6. İş gücü ve ekipman maliyetleri: Eklemeli imalat süreçlerinin karmaşıklığı ve yüksek enerji gereksinimi nedeniyle, özel ekipman ve eğitimli iş gücü gerekmektedir. Bu, ilk yatırım maliyetlerini ve eğitim sürelerini artırabilir.

Eklemeli imalat yöntemleri, önemli avantajlar sunmakla birlikte, bazı sınırlılıklara da sahiptir. Karmaşık geometrilerin üretimi, hızlı prototip oluşturma ve malzeme tasarrufu gibi yeterlilikler, özellikle tıp, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde büyük faydalar sağlar. Bununla birlikte, üretim hızı, yüzey kalitesi ve malzeme seçenekleri gibi sınırlılıklar, bu teknolojinin geleneksel yöntemlerle rekabet etmesini zorlaştırabilir. Gelecekte, eklemeli imalat yöntemlerinin sürekli gelişimi ve ileri teknolojilerin kullanılmasıyla, bu sınırlılıkların üstesinden gelinerek daha hızlı, daha verimli ve daha ekonomik üretim süreçleri mümkün olacaktır.

Eİ teknolojisi için genel bir sınırlılıklar ve yeterlilikler değerlendirilmesinin yanı sıra her bir tekniğin ayrı ayrı avantaj ve dezavantajlarının da belirlenmesi gereklidir [67]. Bu, üretilecek ürününün kalitesini ve performansını maksimize etmek için önemlidir. Çizelge 2.1'de farklı Eİ teknolojilerinde karşılaşılan bazı zorluklar ve bu problemleri çözmeye yönelik öneriler sunulmuştur [68]. Tasarım anlamında yeterlilik ve kısıtlamalara ise Bölüm 2.3 Eklemeli İmalat için Tasarım kısmında değinilmiştir.

Çizelge 2.1. Eİ yöntemlerinde karşılaşılan genel problemler ve çözüm önerileri [68]

	Karşılaşılan Problemler	Çözüm Önerileri
SLA	Zayıf/kırılgan yapılar, mekanik testler için uygun değil	Model yapısını güçlendirecek malzemeler geliştirilmeli
	Güneşe maruz kalma ve katılaşma süresi nedeniyle parça bozulmaları	Katılaştırma süresini kısaltacak karışımlar geliştirilmeli; güneşe maruz kalmamalı veya parçalar kaplanmalı
	Karmaşık modellerin üretimi zor	İmalat durumunu değerlendirecek yazılım geliştirilmeli
	Alternatif malzeme kullanımı sınırlı	Alternatif malzemeler geliştirilmeli
	Destek yapıları ve ek işlemler gereklidir	Tasarım optimizasyonu alanında iyileştirmeler yapılmalı
	Katılaşmayan malzeme zehirli olabilir	Malzeme ile doğrudan temasından kaçınılmalı ve ortam temiz tutulmalı
SLS	Toza dayalı süreç nedeniyle pürüzlü yüzeyler	Hassas yüzeyli parçalarda tercih edilmemeli veya yeni işlemler (yüzeyi iyileştirecek) geliştirilmeli
	Zayıf mekanik özellikler (konuma bağlı)	Model yapısını güçlendirecek malzeme geliştirilmeli veya uygun model yapım konumu seçilmeli
	Sınırlı metal toz çeşitliliği	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
	Model ve imalat parçaları arasında boyutsal farklar	İmalat için modeli değerlendirecek yazılım geliştirilmeli
	Zehirli gaz oluşabilir	Ortam temiz tutulmalı

Çizelge 2.1. (devam) Eİ yöntemlerinde karşılaşılan genel problemler ve çözüm önerileri [68]

FDM	Yavaş işlem ve kötü yüzey kalitesi	İşlem hızı, katman kalınlığı ve malzeme alanında iyileştirmeler yapılmalı
	Model ve imalat parçaları arasında boyutsal farklar	Modeli imalat için değerlendirecek yazılım gerekli
	Dayanım parça oryantasyonuna bağlıdır. Anizotropik özellikler yoğundur	Uygun model yapım konumu seçilmeli
	Mevcut malzeme termoplastiklerle sınırlıdır	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
3DP	Sınırlı malzeme çeşidi	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
	Kötü çözünürlük düzeyi	Malzeme püskürten nozul sık ve fazla olmalı
	Yetersiz mekanik özellikler	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
MJ	Zayıf dayanımlı plastik malzeme	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	İmalatı değerlendirme mümkün değildir	Malzeme püskürten nozul sık ve fazla olmalı
	Damlacık malzeme birikmesi kontrolü	Yüzey gerilimi artırıcı malzeme geliştirilmeli
LENS	Kötü yüzey kalitesi; genellikle ek işlem gerekir	Toz taneleri inceltilmelidir. Saptırıcı bobinler geliştirilmeli
	Zayıf mekanik özellikler	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	Yüksek maliyet	Maliyeti azaltma çalışmaları yapılmalı

2.2.4. Son trendler ve pazar

Son yıllarda, eklemeli imalat teknolojilerindeki gelişmeler ve pazarın hızla büyümesi, endüstriyel ve akademik çevrelerde önemli bir ilgi alanı haline gelmiştir. Eklemeli imalat (Eİ) alanındaki son trendler, teknolojinin sürekli gelişmesi ve yeni uygulama alanlarının ortaya çıkmasıyla birlikte şekillenmektedir [69]. Eİ alanındaki son trendler ve pazar payındaki gelişmeler şu şekilde sıralanabilir:

Son trendler

1. Metal 3B baskı: Geleneksel plastik malzemelerin yanı sıra, endüstriler artık metal malzemelerle 3B baskı yapmaya yönelmektedir. Metal 3B baskı, daha yüksek dayanıklılık ve daha güçlü mekanik özellikler sunarak, özellikle otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde büyük avantajlar sağlamaktadır.
2. Biyobaskı: 3B biyobaskı, biyolojik dokuların ve organların üretiminde kullanılan bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu teknoloji, özellikle doku mühendisliği ve rejeneratif tıp alanlarında önemli potansiyele sahiptir.

3. Yapay zeka ve makine öğrenimi entegrasyonu: Yapay zeka (İng. Artificial Intelligence, AI) ve makine öğrenimi, eklemeli imalat süreçlerinin optimizasyonu, malzeme seçimi ve tasarım kararlarının daha etkili hale getirilmesi için kullanılmaktadır.
4. Hibrit imalat sistemleri: Eklemeli imalat ve geleneksel imalat yöntemlerinin birleştirildiği hibrit sistemler, üretim süreçlerinin hızlandırılması ve daha karmaşık parçaların üretilmesi için kullanılmaktadır.
5. Kafes yapılar: Kafes yapılar, hafif, dayanıklı ve enerji emici parçalar üretmek için kullanılan üç boyutlu ağ benzeri yapıları ifade etmektedir. Kafes yapı tasarımları, malzeme tasarrufu ve yüksek dayanım/ağırlık oranı ile daha etkili üretim süreçleri sunmaktadır.
6. Kişiselleştirilmiş üretim: Eklemeli imalat, kişiselleştirilmiş ürünlerin tasarımını ve üretimini mümkün kılarak, müşteri taleplerini daha iyi karşılayabilen ürünler sunmaktadır.
7. Küresel ekonomi: Eklemeli imalat, üretim sürecinde atık ve kayıp malzeme miktarını azaltarak, küresel ekonomiye katkı sağlamaktadır. Bu sayede daha sürdürülebilir üretim yöntemleri ve geri dönüşüme uygun ürünler geliştirilmektedir.

Gelecekte, eklemeli imalat teknolojilerindeki bu ve diğer gelişmeler, sektörün daha da büyümesine ve daha geniş kapsamlı uygulamalara yayılmasına katkı sağlayacaktır. Öngörülen sektör eğilimi öngörüleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Akıllı üretim ve endüstri 4.0: Eklemeli imalatın Endüstri 4.0 dönüşümünde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Akıllı üretim süreçlerine entegre edilen Eİ, daha esnek, verimli ve sürdürülebilir üretim sistemlerine olanak tanıyacaktır.
2. Çoklu malzeme kullanımı: Çoklu malzeme 3B baskı, farklı malzemelerin tek bir parçada kullanılmasını sağlayarak, ürünlerin performansını ve fonksiyonel olmasını artırmaktadır. Bu teknoloji, gelecekte çok daha karmaşık ve fonksiyonel ürünlerin üretilmesine imkan tanıyacaktır.
3. Sürdürülebilirlik ve ekolojik tasarım: Eklemeli imalat, enerji ve malzeme kullanımında daha verimli olduğu için, sürdürülebilir ve çevre dostu üretim yöntemleri olarak önem kazanacaktır. Ayrıca, geri dönüşüm ve yeniden kullanımın kolaylaşması, küresel ekonomiye katkıda bulunacaktır.
4. 3B baskı hizmetlerinin yaygınlaşması: Gelecekte, 3B baskı hizmetleri daha yaygın ve erişilebilir hale gelecektir. Bu durum, bireysel tüketicilere ve küçük işletmelere, daha

önce büyük şirketlerin ve endüstrilerin erişebileceği 3B baskı teknolojilerine erişim imkanı sağlayacaktır.

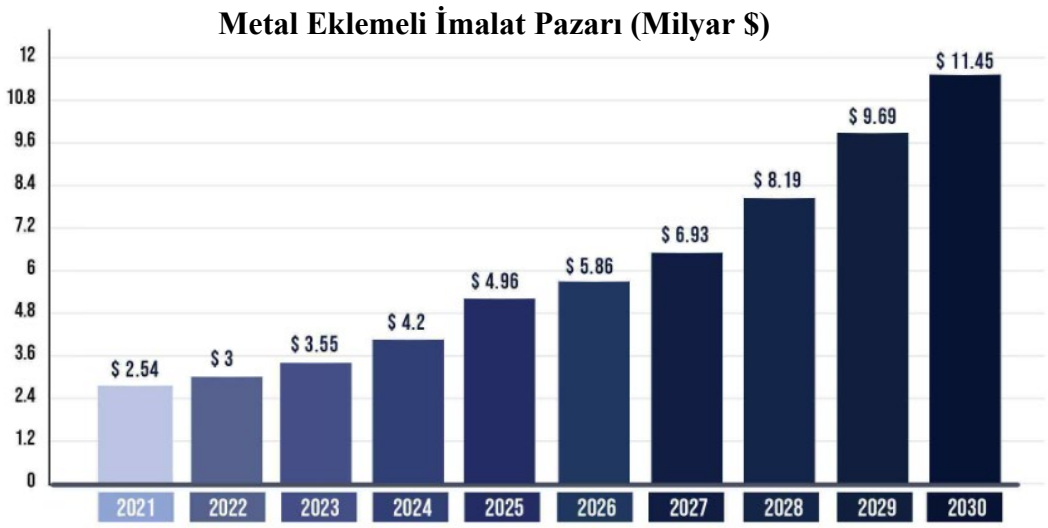
5. Yeni malzemelerin geliştirilmesi: Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzemelerin sürekli olarak geliştirilmesi, yeni ve gelişmiş malzemelerin ortaya çıkmasına yol açacaktır. Bu da, ürünlerin mekanik özelliklerinin ve işlevselliğinin daha da artırılmasını sağlayacaktır.

Eklemeli imalat alanındaki bu son trendler ve gelecekteki potansiyel gelişmeler, sektörün sürekli değişim ve yeniliklerle dolu olduğunu göstermektedir. Bu sürekli gelişme, eklemeli imalatın daha fazla endüstri ve uygulama alanında etkili olmasına ve ekonomik büyüme ve sürdürülebilir üretim hedeflerine katkıda bulunmasına yardımcı olacaktır.

Pazar analizi

Eklemeli imalat, hızla gelişen ve dikkat çeken bir üretim yöntemi olarak son yıllarda önemli bir pazar payına sahip olmaya başlamıştır. Eklemeli imalat yöntemleri, karmaşık parçaları ve bileşenleri katman katman inşa etme kabiliyeti sayesinde, daha önce imkansız ya da çok zor olan tasarımların üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, otomotivden havacılığa, tıptan elektroniğe kadar birçok sektörde eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Küresel eklemeli imalat pazar büyüklüğünün 2021'de 13,84 milyar ABD doları değerinde olduğu ve 2022'den 2030'a kadar %20,8 yıllık bileşik büyüme oranı (CAGR) ile büyümesi beklenmektedir. 2021'de dünya çapında toplam 2,2 milyon adet 3B yazıcı satılmıştır ve birim sevkiyatlarının 2030 yılına kadar 21,5 milyon adede ulaşması beklenmektedir. Metal eklemeli imalat yöntemlerinin pazar payı ise gelişen teknoloji ve azalan fiyatlarla yükselme eğilimindedir (Şekil 2.11) [70].



Şekil 2.11. Metal eklemeli imalat teknolojileri pazar değeri ve pazar öngörüleri [70]

Pazarın coğrafi dağılımına bakıldığında ise, Kuzey Amerika ve Avrupa'nın eklemeli imalat pazarında önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2.11). Bu bölgelerde yer alan ülkelerde yüksek teknolojiye yapılan yatırımlar ve inovasyonun teşvik edilmesi, eklemeli imalat sektörünün büyümesine önemli katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, Asya-Pasifik bölgesi de hızla büyüyen ekonomileri, artan üretim kapasiteleri ve teknolojik ilerlemelerle eklemeli imalat pazarında önemli bir potansiyele sahip olmaktadır [71].

Eklemeli imalat teknolojisine ait pazar analizi, sektördeki güçlü büyüme trendlerinin yanı sıra bazı kısıtlara da işaret etmektedir. Özellikle yüksek maliyetler, teknolojik standartların ve sertifikasyonların eksikliği ve siber güvenlik riskleri, eklemeli imalat sektörünün yaygınlaşmasını engelleyen başlıca faktörlerdir. Bununla birlikte, teknolojik ilerlemeler ve maliyetlerin düşmesi, eklemeli imalat teknolojilerinin gelecekte daha geniş kitlelere ulaşmasını ve sektördeki büyümenin sürdürülmesini sağlayacaktır. Ayrıca, endüstri ve akademik çevreler arasındaki iş birliği, eklemeli imalat teknolojileri ve malzemeleri konusunda standartların ve sertifikaların geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Eklemeli imalat konusunda yapılan pazar analizine göre, bazı sektörlerde Eİ teknolojilerinin benimsenmesi daha hızlı gerçekleşmektedir. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisi, hafif ve dayanıklı bileşenlerin üretiminde Eİ teknolojilerinin sunduğu avantajlardan faydalanmaktadır. Aynı zamanda, tıp ve sağlık sektörü, biyobaskı ve kişiselleştirilmiş protezler gibi alanlarda eklemeli imalatın potansiyelini değerlendirmektedir. Enerji, inşaat

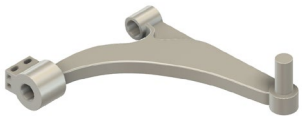
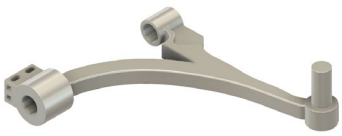
ve elektronik endüstrileri de gelecekte eklemeli imalat teknolojilerini daha fazla benimseyerek pazarın büyümesine katkı sağlayacak sektörler arasında yer almaktadır [72].

Sonuç olarak, eklemeli imalat teknolojilerinin pazar analizi, sektörün küresel çapta önemli bir büyüme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Teknolojik gelişmeler, maliyetlerin düşmesi ve endüstrilerin Eİ yöntemlerine adaptasyonu, pazardaki büyüme trendinin sürekliliğini destekleyecektir. Bununla birlikte, sektörün karşılaştığı kısıtların ve zorlukların üstesinden gelmek için, endüstri liderleri, akademisyenler ve politika yapıcılar arasında iş birliği ve koordinasyonun sağlanması gerekmektedir. Bu sayede, eklemeli imalat teknolojileri, daha sürdürülebilir, verimli ve yenilikçi üretim süreçlerine katkıda bulunarak, pazarın büyümesini sürdürebilir kılacaktır.

2.3. Eklemeli İmalat için Tasarım

Eklemeli İmalat için Tasarım (İng. Design for Additive Manufacturing, DfAM), Eİ'nin benzersiz yeteneklerini ön plana çıkaran ürün tasarımı sürecidir. DfAM yaklaşımı; Eİ ile üretilecek parça tasarımında yaratıcılık, uygulanabilirlik, ekonomi ve estetik de dahil olmak üzere imalat kısıtlamaları ve tasarım kriterlerini de dikkate almayı içermektedir [73]. Tasarımcı, form, uyum ve işlev olarak adlandırılan F3 veya FFF olarak bilinen parçaların özelliklerini tanımlar ve açıklar, tasarım hedeflerini ve tasarım doğrulama kriterlerini belirler. Form, parçanın geometrik yapısını ifade etmektedir. Şekil, boyut, kütle ve parçanın nasıl görüldüğü gibi özellikler, form kapsamında değerlendirilir. Uyum, parçaların birbirleriyle olan fiziksel ilişkisini ifade etmektedir. Parçaların konumları, montajları ve birbirlerine göre toleransları bu kapsamda değerlendirilir. İşlev, ürünün tasarımını ve amaçlanan kullanımını tanımlar. Bir ürün birden fazla amaç için özelleştirilebilir. Bu nedenle, geleneksel üretim için tasarlanmış parçaların tasarımlarında herhangi bir değişiklik olmadan Eİ teknolojisi kullanılarak üretilmesi genellikle gereksizdir. Çünkü bu durumda eklemeli imalatın sunabileceği tasarım esnekliğinden faydalanmayacak ve dolayısıyla üretim maliyeti daha da yüksek olacaktır. Bu nedenle, eklemeli imalatın benzersiz avantajlarından yararlanmak için geleneksel tasarım, eklemeli imalat için uyarlanmalı veya yeniden tasarlanmalıdır [74]. Arabalarda bileşenlerinden alt kol salıncağına ait Eİ ile replikasyon, Eİ ile uyum ve Eİ için tasarım karşılaştırmaları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Araba bileşenlerinden alt kol salıncağına ait Eİ ile replikasyon, Eİ ile uyum ve Eİ için tasarım karşılaştırması

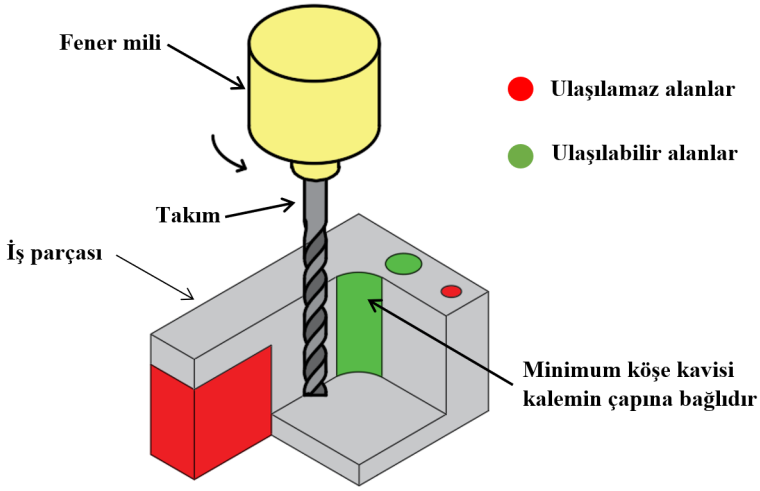
	Eİ ile replikasyon	Eİ ile uyum	DfAM
Tanım	Parçanın geleneksel yöntem için tasarımında da herhangi bir değişiklik yapılmaz. Amaç, mevcut bir ürünü minimum teslim süresiyle çoğaltmaktır. Bu, üretim maliyetini, hızı ve parça ağırlığını etkilemez	Form etkilenir. Böylece Eİ kısıtlamaları (çıkıntılar, destek yapıları vb.) ortadan kaldırılır. Eİ uyumlu tasarım ile baskı ve ardıl işlem süresi kısalır. Ancak parçanın uyum ve fonksiyon kriterleri dikkate alınmaz.	Tüm parça, Eİ'nin benzersiz özelliklerini en üst düzeye çıkarmak ve sınırlamalarını en aza indirmek için yeniden tasarlanır. Parçanın tüm form-uyum-fonksiyon özellikleri tanımlanır.
Şekil			
Güvenlik faktörü	1,96	1,75	14
Ağırlık (gr.)	4159	2969	2444

Çizelge 2.2.'de görüldüğü gibi, DfAM ile gerilme yığılmaları ve parça ağırlığı azaltılmış yüksek performanslı ürün elde edilmiştir. Geleneksel tasarım süreçlerinde gerilim yığılmalarını azaltma stratejisi, deneyim ve bilgiye dayanmaktadır. DfAM'da ise topoloji optimizasyonu [75] ve üretken tasarım [76] gibi bilgisayar ve yapay zeka tabanlı yinelemeli tasarım süreçleriyle geniş tasarım uzayında optimum çözümler elde edilmektedir. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi imkansız olan bu karmaşık modeller, eklemeli imalatın benzersiz üretim yetenekleri kullanılarak hızlı, uygun maliyetli ve gelişmiş mekanik özelliklerle sahip nihai parçalar elde edilebilir.

2.3.1. Eklemeli imalatın talaşlı imalat ile kıyaslanması

En yaygın talaşlı imalat teknolojisi olan bilgisayar sayısal kontrollü (İng. Computer numerical control - CNC) işleme, katı blok malzemeden talaşların yüksek dönme hızına sahip bir takımla çıkarılmasına dayanmaktadır (Şekil 2.12). Dönen takım, BDT modelinden alınan verilerden oluşturulan takım yollarını takip ederek son parçayı ortaya çıkarır. Hem metaller hem de plastikler, yüksek boyutsal doğruluk ve gelişmiş toleranslarla CNC'de işlenebilir. Seri üretim ve tek seferlik işler için kullanılabilen CNC, Eİ sarf malzemelerinin

yüksek fiyatları nedeniyle büyük hacimli metal parçalar üretmek için en ekonomik yöntemdir [77]. Bu nedenle Eİ, tasarım esnekliği sunmasına rağmen, yüksek tolerans ve mekanik özelliklerin çok önemli olduğu havacılık endüstrisinde henüz CNC'nin yerini alamamıştır.



Şekil 2.12. 3 eksenli CNC işleme şeması. Eksen sayısı artırılarak ve küçük çaplı takım kullanılarak ulaşılamayan alanlar ve küçük çaplı delikler işlenebilir.

Bununla birlikte, 3B baskı ile karşılaştırıldığında, CNC'nin çıkarımsal doğası nedeniyle daha fazla tasarım kısıtlaması vardır. Çizelge 2.3'te, CNC işlemede göz önünde bulundurulması gereken tasarım kısıtlamalarını ve eklemeli imalat yönteminde bu veya benzeri kısıtlamaların olup olmadığını göstermektedir.

Çizelge 2.3. CNC işlemede tasarım kısıtlamaları ve Eİ'deki eşdeğerleri veya çözümleri

CNC işlemede dikkate alınması gereken kısıtlamalar	Eİ'de bu veya benzeri kısıtlama var mı?
Sınırlı kesme uzunluğu: Parmak freze takımlarının kesme derinliği genellikle çaplarının 3-4 katıdır. Daha büyük derinlik-genişlik oranlarında takım deformasyonları, talaş boşaltma sorunları ve titreşimler daha belirgin hale gelir.	Katmanlı yapısından dolayı Eİ'de böyle bir sınırlama yoktur. Ayrıca Eİ'de takım deformasyonları ve titreşimler ihmal edilebilir düzeydedir.
Keskin Köşeler: CNC'de yüksek hızlarda dönen silindirik takımlar nedeniyle iş parçasının köşeleri her zaman bir kıvrıma sahiptir. Bu kıvrımlar küçük çaplı takımlar kullanılarak azaltılabilse de tamamen ortadan kaldırılamaz.	Eİ'deki çeşitli katman üretimi yöntemleri, lazer ışını veya dairesel nozul ekstrüzyonu (sürekli veya damla) gibi yöntemlere dayanır. Bu nedenle, Eİ parçalarının köşeleri, lazer spot boyutuna veya nozul delik çapına bağlı olarak belirli bir yarıçapa sahiptir. Ancak takım çapları mikron seviyesinde olduğu için (nozul için 400 µm, lazer için 50-100 µm) köşe kıvrımları oldukça küçüktür.

Çizelge 2.3. (devam) CNC işlemede tasarım kısıtlamaları ve Eİ'deki eşdeğerleri veya çözümleri

CNC işlemede dikkate alınması gereken kısıtlamalar	Eİ'de bu veya benzeri kısıtlama var mı?
Takım Erişimi: CNC işlemede, takım o alana ulaşmadan malzeme çıkarılamaz. Bu nedenle, kanallar gibi iç detaylar CNC ile işlenemez.	Katmanlı üretim yöntemi sayesinde tüm iç detaylar Eİ'de kolayca üretilebilir. Ayrıca, iç detayları üretmek için karmaşık ve özel çok eksenli takım yollarına gerek yoktur. Tüm parça detayları, 2 boyutlu takım yollarının üst üste bindirilmesiyle elde edilebilir. Ancak iç detaylarda oluşabilecek destek yapısı ve bu yapıların süreç sonunda nasıl ortadan kaldırılacağı tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır.
Geometri Kısıtlaması: Karmaşık parçalar çok eksenli CNC ile işlenebilse de bu, her parçanın işlenebileceği anlamına gelmez. Ulaşılması zor yerlerin işlenmesi takım geometrisine ve parça yapısına bağlıdır. Ayrıca parça karmaşıklığına bağlı olarak imalat adımları ve maliyet artmaktadır.	Eİ'de geometri kısıtlaması yoktur. Basit parçalarla aynı zaman, maliyet ve emekle karmaşık parçalarda üretilebilir.
İnce cidarlar: İnce cidarlara veya diğer ince özelliklere sahip parçalar, CNC işleme için zordur. İnce cidarlar, yüksek torklu takımın kesme kuvvetiyle kolayca kırılabilir. Minimum et kalınlığı metaller için 0,8 mm, plastikler için 1,5 mm olmalıdır **[77]**.	Eİ işleminde kesme kuvveti ve titreşim oluşmaz. Bu nedenle baskı takımının çapına (lazer: Ø 50-100 µm, nozul: Ø 400 µm) bağlı olarak çok ince özellikler ve ince cidarlar üretilebilir.
Alttan Kesmeler: Alttan kesmeler, standart takımlarla işlenemez. Alt kesimler için T-yuvası ve kırlangıç kuyruğu tiplerine ayrılan özel aletler kullanılmalıdır. İç duvarlarda alttan kesmeli parçalar tasarlandığında, iç duvarlar arasında yeterli boşluk sağlamalıdır. Boşluk, alttan kesme derinliğinden en az 4 katı daha büyük olmalıdır **[77]**.	Eİ'de destek malzemesi, yatay eksenle belirli bir derecenin (genellikle 45 derece) üzerindeki alttan kesmeler için kullanılır. Destek malzemesi ayrı olabileceği gibi sinterlenmemiş / kürlenmemiş bir model malzeme de olabilir. Destek yapısı ve model geometrisinin temas ettiği alanlarda bozuk yüzeyler görülebilir.
Malzeme israfı: Talaşlı imalat teknolojisinde, katı bloktan malzeme çıkarılarak işlem gerçekleşir. Hammadde ağırlığının nihai bileşen ağırlığına oranı, Buy-to-Fly (BTF) oranı olarak adlandırılır. Genellikle havacılık gibi hammaddelerin çok pahalı olduğu sektörlerde kullanılan bu oran çıkarmalı yöntemlerde 10'a kadar çıkabilmektedir. Bu, parçanın blok ağırlığının yalnızca yüzde 10'unu oluşturduğu ve yüzde 90'ının hurda olduğu anlamına gelir.	Destek yapısı kullanılmazsa, Eİ'de BTF oranı 1 (bir)'dir . Bu, atık malzeme olmadığı anlamına gelir. Ayrıca, Eİ yöntemlerinde tasarım optimizasyonları ile parça ağırlığı önemli ölçüde azaltılabilir. Bu nedenle, Eİ yöntemi daha uygun maliyetli ve daha çevre dostudur.
Dişler: Hassas dişler, kırılma riskini azaltan diş açma araçları kullanılarak CNC'de işlenebilir. CNC işleme, diş uzunluğu nominal çapın en az 1,5 katı olan M2'ye kadar diş açmak için kullanılabilir.	Eİ'de dişler veya diğer bağlantı elemanlarını oluşturmak için özel takımlara gerek yoktur. Ancak Eİ ile üretilen küçük boyutlu dişler, CNC'de üretilen kadar hassas değildir.
Küçük delikler ve oyuklar: Çapı 2,5 mm'ye kadar olan delikler ve oyuklar geleneksel CNC ile işlenebilir. Bu sınırın altındaki herhangi bir şeyin imalatında, özel aletler (mikro matkap) ve uzmanlık bilgisi gerektiren mikro işleme yöntemi kullanılır.	Mikron düzeyinde delikler ve oyuklar, Eİ ile herhangi bir ekstra yöntem veya alet gerektirmeden üretilebilir. Ancak boşlukta veya delikte bir destek yapısı oluşmuşsa çıkarılması zordur.

CNC işleme nihai parçaları mükemmel doğruluk, tekrarlanabilirlik ve çok iyi toleranslarla üretme fırsatı sunmaktadır. CNC işleme, yüksek mekanik özelliklere ve iyi yüzey kalitesine sahip parçalar üretebilmesi nedeniyle farklı mühendislik alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Eklemeli imalatta anizotropi ve gözenekler gibi süreksizlikler meydana gelebilir ve parçaların mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, talaşlı yöntemler kullanılarak karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesi ya çok maliyetlidir ya da üretilmesi imkansızdır. Ayrıca, CNC yöntemi, eklemeli imalata kıyasla uzman bilgisi ve uzun teslim süreleri gerektirir. CNC imalatında parça işlevselliğini etkilemeyen fazla kütleler genellikle işlenmez. Çünkü bu, zaman, para ve takım aşınmasına neden olur. Ancak Eİ'de durum tam tersidir çünkü eklenen herhangi bir ekstra malzeme baskı süresini, maliyetini ve ağırlığını artıracaktır. Özetle, CNC işleme, işlemesi nispeten kolay olan büyük hacimli parçaların imalatında işleme süresi ve maliyeti açısından avantajlı iken, Eİ, karmaşık geometriye sahip parçaların imalatında tercih edilebilir.

CNC işleme ve eklemeli imalat yöntemleri birlikte de kullanılabilir. Böylece Eİ ile üretilen parçaların pürüzlü yüzey kalitesi CNC ile iyileştirilebilir. Bu hibrit üretim sisteminin tasarım aşamasında talaşlı imalat ile kaldırılacak kalınlık miktarı (0,5 mm yeterlidir) dikkate alınmalıdır. Ayrıca montaj aparatları da parça ile entegre olarak tasarlanabilir. Böylece parça CNC tezgah platformuna daha hassas ve hızlı bir şekilde monte edilebilir [37]. Delikler ve yuvalar gibi unsurları talaşlı imalatla oluşturmak da daha pratik olabilir. Çünkü eklemeli imalatta delikler ve yuvalar, çıkarılması zor olan destek yapıları ile doldurulabilir.

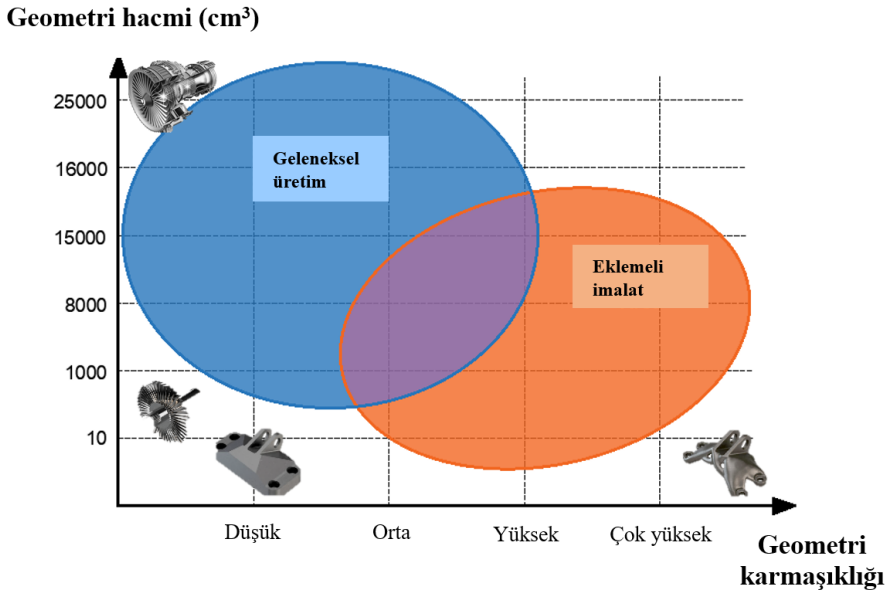
2.3.2. Eklemeli imalat için tasarımın temel prensipleri

Eİ, sınırsız tasarım esnekliği sunuyor gibi görünse de, Eİ için tasarım sürecinde dikkate alınması gereken bazı faktörler vardır. Eİ ile tasarıma başlamadan önce ürünün 3B baskıya uygunluğu değerlendirilmelidir. Tasarımcı tarafından Eİ için tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gereken temel faktörler aşağıdaki gibidir.

Baskı limitleri

3B yazıcılarda baskı hacmi baskı yöntemine ve modellere göre değişmekle birlikte genel olarak 16000 cm^3 (250x250x250 mm) veya daha azdır. Daha büyük parçalar için özel yazıcılar kullanılabilir veya parçalar modüler olarak üretilip daha sonra montajlanabilir.

Ayrıca geleneksel yöntemler, düşük karmaşıklığa sahip büyük blok parçaların üretilmesinde daha uygun maliyetli ve daha hızlıdır. Şekil 2.13'te parçanın hacmine ve karmaşıklığına bağlı olarak eklemeli imalat veya geleneksel imalatın tercih edilebileceği bölgeler verilmektedir. Tasarımcı, mevcut parçanın hacmine ve karmaşıklığına göre imalat yöntemini belirlemelidir. Alternatif olarak, eklemeli imalattan yararlanmak için mevcut tasarım güncellenebilir. Böylece, düşük hacimli parçalar, karmaşık bir şekle sahip olsalar bile Eİ ile hızlı bir şekilde yeniden tasarlanabilir ve üretilebilir.



Şekil 2.13. Parçanın hacmine ve karmaşıklığına bağlı olarak eklemeli imalat veya geleneksel imalat tercih bölgeleri ([78]'dan uyarlanmıştır)

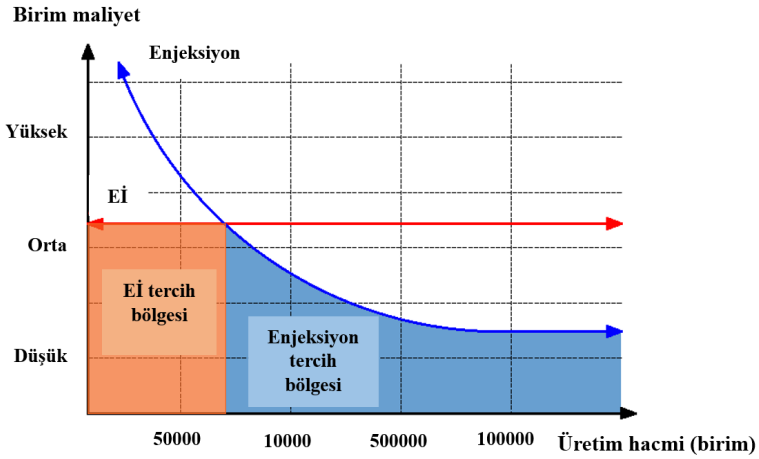
Üretim parametreleri

Eİ için tasarım yapılırken yöntem ve süreç parametreleri iyi bilinmelidir. Çünkü lazer yoğunluğu, katman kalınlıkları ve tarama deseni gibi parametreler, yöntemin sınırlamalarını veya yeteneklerini belirlemektedir. Genel olarak tarama hızı, tarama aralığı ve lazer gücündeki artış yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilerken, artan enerji yoğunluğu da yüzey kalitesini artırmaktadır [79]. Ayrıca parçanın doğruluğu ve kalitesi de minimum katman kalınlığına ve eleman boyutuna bağlıdır. Minimum unsur boyutu, kullanılan yazıcının yanı sıra baskı yönteminden kaynaklanan diğer faktörlerle ilgili olabilir. Örneğin, SLM yönteminde, parçanın etrafındaki toz, parça yüzeyine kısmen kaynaşmakta ve yüzey kalitesi ile boyutsal doğruluğu etkilemektedir [80]. Bu nedenle, SLM'de derin ve küçük çaplı delikler üretilmeye uygun değildir [37]. Bu durumu önlemek için deliğin bulunduğu alan minimum

eritme gerektirecek şekilde yeniden tasarlanabilir. Ayrıca katman kalınlığı, baskı yönü, toz büyüklüğü ve lazer gücü gibi faktörler değiştirilerek doğruluğu yüksek küçük delikler elde edilebilir.

Maliyet

Geleneksel veya geleneksel olmayan üretim yöntemleri, kaba parçaları eklemeli imalattan daha hızlı ve uygun maliyetli bir şekilde üretebilir. Örneğin, Şekil 2.12'de gösterilen parçanın kırmızı bölgeleri olmadığı düşünülürse, 3 eksenli CNC işleme ile üretmek daha hızlı ve daha ucuz olacaktır. Bu nedenle tasarım değişikliği gerektirmeyen ve stratejik önemi olmayan parçaların geleneksel yöntemlerle üretilmesi daha avantajlıdır. Diğer bir deyişle işlevsiz redüktör kapağının döküm yöntemiyle üretilmesi ekonomik iken, Eİ, verimliliği önemli ölçüde artıran mikroakışkan kanallara sahip karmaşık motor bloğunun üretilmesi için daha ekonomiktir. Ayrıca uygun fiyatlı yöntem üretilecek adet sayısına göre farklılık gösterebilmektedir. Örneğin, enjeksiyon kalıbı oldukça pahalıdır ve uzun bir teslim süresi gerektirir. Bu yüzden sadece seri üretim parça üretiminde tercih edilmelidir. Üretim hacmine bağlı olarak Eİ ve enjeksiyon kalıbı için birim maliyet grafiği Şekil 2.14'te verilmiştir. Enjeksiyonla kalıplamada, kalıp üretim maliyetleri yüzbinlerce dolar olabilir. Ancak daha sonra milyonlarca parça seri üretilebilir. Üretilen parça sayısı arttıkça ilk kurulum maliyeti paylaşılacağı için parça başı maliyet düşecektir. Eİ'de, kalıp üretim süresi ve maliyeti olmadığı için, üretim hacmi birim başına maliyeti etkilemez.

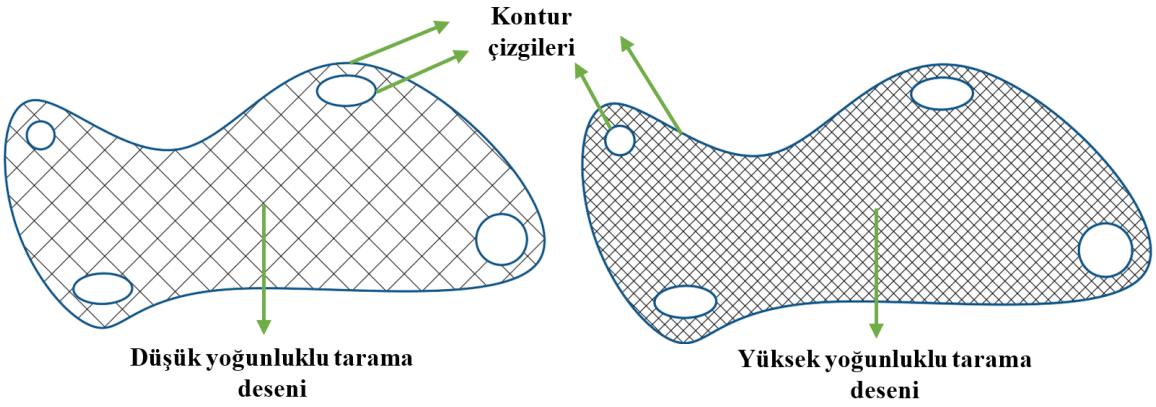


Şekil 2.14. Eİ ve enjeksiyon kalıplama için birim maliyet grafiği ([81]'den uyarlanmıştır)

Üretim süresi

Üretim süresinin uzunluğu tasarımın iyi ya da kötü olduğu anlamına gelmese de maliyetleri en aza indirmek için oldukça önemlidir. Örneğin, SLM baskı sürecinde parçanın uzun kısmının dikey (z ekseni) eksende konumlandırılması, katman sayısını ve dolayısıyla yeniden serme sayısını artırır. Yeniden serme süresi, kullanılan metal yazıcıya bağlı olarak katman başına 4-15 s arasında değişmektedir [37]. Bu, 100 x 10 x 10 mm^3 boyutlarındaki dikdörtgen prizmanın konumuna bağlı olarak 300 dakikalık (50 µm katman kalınlığı ve 10 saniye toz serme süresi için) üretim süresi farkı olabileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca metal yazıcılarda baskı yapılmadan önce baskı odası soy gazlarla (argon, nitrojen veya vakum) doldurulmalı ve ısıtılmalıdır. Baskı hacminden arındırma ve yapı haznesinin ön ısıtılması olarak bilinen oksijen giderme işlemi birkaç saat sürebilir. Bu nedenle birçok parçanın aynı anda ve uzun kenarları yatay eksende yönlendirmek baskı süresi açısından tercih edilmelidir.

Geleneksel yöntemlerin aksine eklemeli imalatta ekstra malzeme eklemek maliyetli ve zaman alıcı olduğundan içi dolu ve büyük hacimli tasarımlardan kaçınılmalıdır. Ayrıca, SLM gibi yöntemlerde malzeme birikimi, yüksek enerji girdisi nedeniyle daha yüksek kalıntı gerilmelere yol açmaktadır. Baskı süresini, kalıntı gerilmeleri ve kullanılan malzeme miktarını azaltmak için sıklıkla kullanılan bir yöntem, parçada boşluklar oluşturmaktır. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi bu boşlukları oluşturmak için önce parçanın dış yüzeyini oluşturacak konturlar üretilir. Daha sonra parçanın içi farklı desenlerde ve dolgu oranlarında taranır. Parça içi boş bir yapıya sahip olduğu için kullanılan malzeme miktarı, baskı süresi ve parça ağırlığı azalmakta ancak parça mukavemeti de düşmektedir. DfAM stratejileri parçanın mukavemetini önemli ölçüde etkilemeyen ancak boşluk miktarını en üst düzeye çıkaran tasarımı elde edecek şekilde geliştirilmelidir.

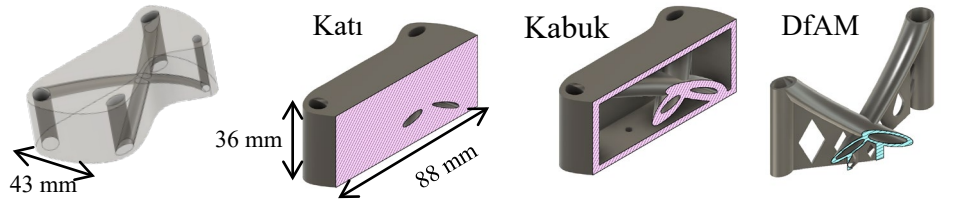


Şekil 2.15. Farklı yoğunluktaki iç tarama desenleri

Baskı oryantasyonu

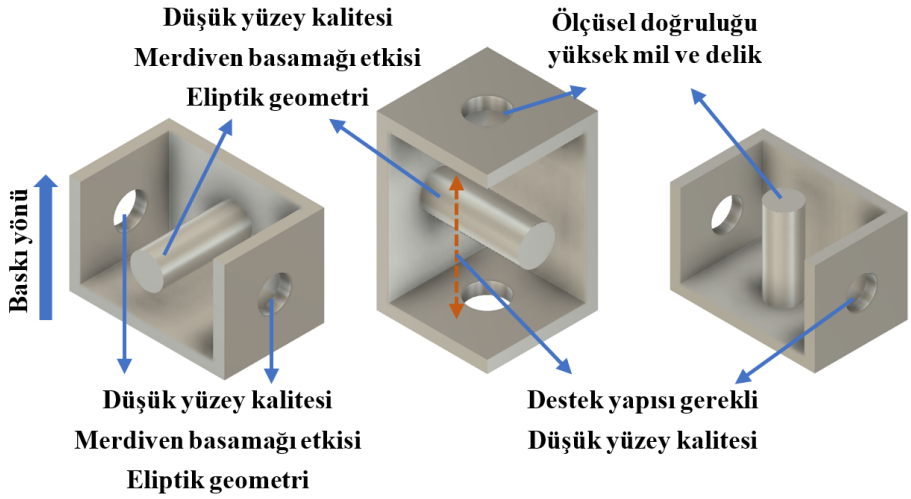
Parçanın platforma hizalanma doğrultusu (oryantasyonu), malzeme tüketimini ve baskı süresini önemli ölçüde etkilemektedir. Destek yapıları, baskı yönüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Daha fazla destek yapısının baskısı, ekstra malzeme, zaman ve enerji tüketimi anlamına gelmektedir (Çizelge 2.4). Ayrıca baskı işleminden sonra destek yapısını çıkarmak için ardıl işlemler gereklidir. Bu işçiliği ve maliyeti artırmaktadır. Destek yapısı yalnızca baskı süresi ve maliyeti artırmakla kalmaz, aynı zamanda temas ettiği parçanın yüzey kalitesini de önemli ölçüde düşürür. Bu nedenle DfAM, üretiminde desteğe ihtiyaç duymayan veya minimum desteğe ihtiyaç duyan parçalar tasarlamayı hedefler. Destek yapıları zaruri ise, kolayca çıkarılabilecek şekilde tasarlanmalıdır. İç kısımlarında sökülmesi mümkün olmayan destek yapıları olmamalıdır. İç yapıdaki destekler kaçınılmazsa, destek yapısı parçanın mukavemetini artıran kalıcı bir özellik olarak tasarlanabilir. Destek yapılarının ince duvarlar olarak tasarlanması, baskı süresini ve kullanılan malzeme miktarını da önemli ölçüde azaltır (Çizelge 2.4). Ayrıca topoloji optimizasyonunda ağırlığı ve maliyeti azaltmak için kullanılan dairesel boşluklar yerine DfAM'da, su damlası veya eşkenar dörtgen gibi destek gerektirmeyen boşluklar tercih edilmelidir.

Çizelge 2.4. Üniform olmayan borulara sahip paslanmaz çelik dispersiyon ekipmanının farklı tasarım stratejileri ve baskı özellikleri



Üretim süresi	19 sa 6 dk	12 sa 19 dk	3 sa 44 dk
Maliyet ($)	588	418	230
Ağırlık (gr)	225	112	20

Baskı yönlendirmesinde dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise delikler ve silindirik yapılardır. Delikler ve silindirik yapılar yatay eksenle hizalı olarak üretildiğinde destek yapısına bağlı kusurlar ve merdiven basamağı etkisi gözlemlenebilir. Ayrıca geometri yer çekimi etkileri nedeniyle daireselden hafif eliptik şekle kayabilir (Şekil 2.16). Diğer yandan tek bir düzlemdeki geniş yatay yüzeyler, yüksek kalıntı gerilmelere neden olmaktadır.

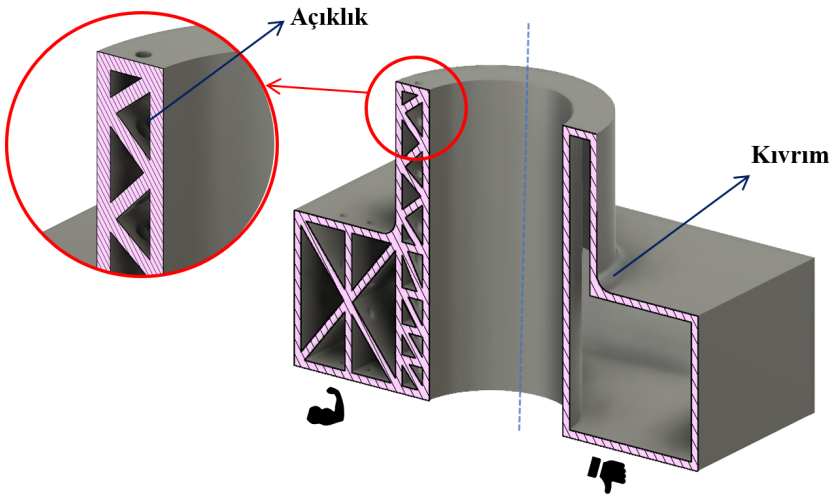


Şekil 2.16. Baskı oryantasyonunun delik ve mil geometrilerinin yüzey kalitesine etkisi

Parça dayanımı

Parça oryantasyonunda, destek yapısı faktörü dışında dayanım etkileri de göz önüne alınmalıdır. Parçanın mukavemeti, malzeme özellikleri ve yüzey kalitesi de baskı yönüne göre değişmektedir. Katmanlı üretimin tekniğinin en önemli dezavantajlarından biri olan anizotropi, dikey baskı yönünde meydana gelmekte ve mukavemeti önemli ölçüde etkilemektedir. FDM yönteminde yoğun görülen anizotropi etkileri toz yatak füzyonuna

dayanan sistemlerde daha seyrek görülmektedir. SLM yönteminde anizotropi sıcak izostatik presleme (HIP) gibi ardıl işlemlerle giderilebilir. Anizotropi dışında metal baskılı parçanın mukavemetini azaltan gözeneklilik ve mikro çatlaklar da HIP ile azaltılabilmektedir. Ayrıca kalıntı gerilmelerde, eklemeli imal edilen metal parçalarının dayanımı etkilemektedir. Kalıntı gerilmeler, ani ısınma ve hızlı soğuma nedeniyle katmanlar arasındaki kesme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Fazla malzemenin kaynaştığı bölgelerde, önemli termal girdi nedeniyle daha fazla kalıntı gerilme mevcuttur [82]. Yüksek kalıntı gerilmeli alanlar deformasyona eğilimlidir. Bu nedenle, baskıdan sonra kalıntı gerilme giderme gibi ısıl işlemler uygulanmalıdır. Alternatif olarak, tarama desenleri gibi kalıntı gerilmeleri azaltan baskı stratejileri DfAM aşamasında belirtilmelidir. Bu kapsamda kiriş yapıları, parça dayanımına çok etki etmeden belirli bir alanda fazla malzeme birikmesinin önüne geçmede kullanılabilirler. Böylece kalıntı gerilmeler ve deformasyonlar önlenirken, aynı zamanda kullanılan malzeme miktarı ve baskı süresi azaltılır. Şekil 2.17, kabuk geometrisinin mukavemetini artırmak için kullanılan kiriş yapısını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi fazla tozun tahliyesi için küçük açıklıklar kullanılmalıdır. Farklı geometrik unsurların birleşim bölgelerine ise kıvrımlar eklenerek gerilme yığılmaları engellenerek parça mukavemeti arttırılabilir.

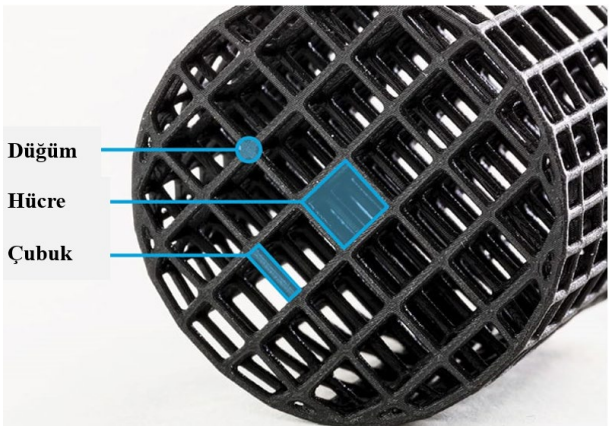


Şekil 2.17. Kabuk geometrinin dayanımı artırmak için kullanılan kiriş yapısı

2.4. Hücresel Kafes Yapıları

Hücresel kafes yapılar, hafif ve dayanıklı bileşenler üretme potansiyeli nedeniyle endüstride giderek daha fazla dikkat çeken yenilikçi bir malzeme tasarımı yaklaşımıdır. Bu yapılar, son yıllarda havacılık, otomotiv, inşaat ve biyomedikal endüstrilerindeki yenilikçi uygulamalar

için büyük bir potansiyele sahiptir. Tekrarlı hücresel birimlerin bir araya getirilmesiyle elde edilen kafes yapıları, düğümler ve çubuk elemanları olmak üzere iki farklı temel birleşenden oluşurlar. Belirli oryantasyonlardaki çubuk elemanları düğümlerle birbirlerine bağlanarak tekrarlı sürekli bir form elde edilir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Kafes yapı örneği ve temel bileşenleri [83]

Karmaşık geometrileri hızlı ve nispeten ucuz şekilde üretebilmesine olanak veren eklemeli imalat sistemleri ile birlikte geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor, zaman alıcı ve maliyetli olan kafes yapılarına ilgi artmıştır. Hücresel yapılar gibi ağırlığı azaltılmış fonksiyonel yapıların eklemeli imalatı, kişiselleştirme için yeni fırsatlar, bileşen performansında iyileştirmeler ve üretim maliyetlerinde azalma sağlamaktadır [84]. Fakat üstün performanslı hücresel yapıların eklemeli imalatı için minimum duvar (cidar) kalınlığı, yüzey kalitesi ve destek yapısı gibi sınırlamalar da iyi tanımlanmalıdır. Literatürde Eİ teknolojilerindeki üretim kısıtlamalarının üstesinden gelmek için çeşitli tasarım metodolojileri incelenmiştir. Tang ve diğerleri (vd.,) destek malzemelerinin çıkartılması ve minimum unsur kalınlığı gibi kısıtlamaları dikkate alarak karmaşık geometrilerin Eriyik Biriktirme Tekniği (FDM) yöntemiyle üretimi için optimizasyon çalışmaları yürütmüştür [22]. Benzer bir çalışmada, Jin vd., Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi kullanılarak üretilen kafes yapılarının maksimum unsur uzunluğunu, minimum delik çapını ve unsur kalınlığını optimize etmiştir [85]. McGregor vd., Eİ ile üretilen kafes yapılarının izlenmesi, kalifikasyonu ve kontrolü için tarama temelli ölçüm yöntemi önermiştir [86]. Masood vd., tekrarlayan birim hücrelere ve farklı gözenekliliğe sahip yapıların FDM baskısı için yeni bir yöntem önermiştir [87]. Wang vd., çeşitli gözeneklilikteki in vitro yapı iskelelerinin bozulma esnasındaki yapısal, mekanik ve sito-uyumluluk değişikliklerini değerlendirmişlerdir [88]. Hücresel yapı tasarım sürecinde, uygulama alanına bağlı olarak üretim kısıtlamaları, fiziksel ve boyutsal özellikler

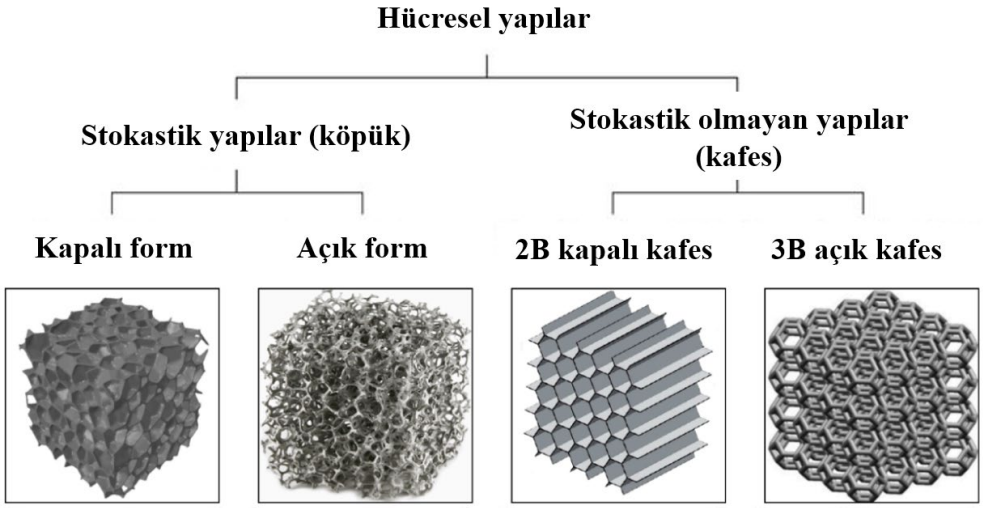
ve işlevsellik de dikkate alınmalıdır [89]. Vran vd., optimize edilmiş gözeneklilik ve hücre yapısı tasarımı ile yüksek enerji absorpsiyon özelliklerinin elde edilebileceğini göstermiştir [90]. Mu vd., foto kürlenebilir reçine bazlı gözenekli polimer yapılar üretmiş ve bunları enerji absorbe ediciler, pil üretimi ve su arıtımı için gözenekli membranlar gibi farklı uygulama alanlarında kullanmıştır [91]. Brackett vd., birim hücrelerin hacim fraksiyonlarını ara yoğunluklarıyla eşleştirerek optimize edilmiş kafes yapılarının Eİ kullanılarak üretilmesini araştırmıştır [92]. Diğer yandan kafes boyutu, birim hücre ölçeği ve çubuk eleman çapları gibi tasarım değişkenlerinin hücresel yapının mekanik özelliklerine etkisi üzerine çalışmalar da yapılmıştır [29]. Değişken yoğunluğa sahip hücresel yapılar, mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için topoloji optimizasyonu kullanılarak tasarlanabilir [93,94]. Katı izotropik malzemeye dayalı bir göreli yoğunluk haritalama yöntemi [95] kullanılarak, hücresel yapılar optimize edilebildiği gibi, kübik yapı üzerinde homojenizasyona dayalı topoloji optimizasyon işlemleri de gerçekleştirilebilir [96]. Benzer bir yaklaşımla, Li vd., jiroid yapısı üzerinde çalışılmış ve baskı yönüne bağlı olarak tasarım optimizasyonlarını belirlemiştir [97].

Özetle tekrarlayan geometrik hücrelerden oluşan periyodik bir dizilimli kafes yapılar önemli avantajlar sağlamaktadır. Hücresel kafes yapıları, düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen yüksek mukavemet ve rijitlik sunmaktadır. Bu özellik, malzeme kullanımını azaltarak ve bileşenlerin ağırlığını düşürerek enerji verimliliği ve tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca hücresel yapılar, enerji dağılımını iyileştirerek yorulma direncini artırmakta ve yapıların uzun süreli performansını güçlendirmektedir. Benzer şekilde hücresel kafes yapıları, darbe yüklerini emme ve dağıtma yeteneği sayesinde enerji emilimini artırmakta ve bileşenlerin darbelere karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Yine hücresel yapılar, termal ve akustik yalıtımı iyileştirerek enerji tasarrufu sağlayabilirler. Özetle hücresel kafes yapılar, hücre geometrisi, boyutlar ve malzemeler açısından kolayca özelleştirilebilir. Bu, özel uygulamalar için optimize edilmiş performans sağlamakta ve malzeme kullanımını en üst düzeye çıkarmaktadır.

2.4.1. Kafes yapıların sınıflandırılması

Hücresel yapılar, farklı özellikleri ve yapılarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Genel olarak, hücresel yapılar iki ana kategoriye ayrılabilir: Stokastik (köpük) ve stokastik

olmayan (kafes) yapılar (Şekil 2.19). Bu yapıların sınıflandırılmasında, hücre geometrisi, yapı özellikleri ve malzeme türü gibi faktörler göz önünde bulundurulur.



Şekil 2.19. Hücresel yapıların sınıflandırılması [98]

Stokastik yapılar açık form ve kapalı form olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu yapılar, rastgele oluşumlu hücreler ve bağlantılar içeren köpük benzeri malzemelerdir. Açık form stokastik yapılar, hücre sınırlarının açık olduğu ve hücreler arasında serbestçe dolaşım sağlayan kanalların bulunduğu rastgele düzenlemelere sahip hücresel yapılarıdır. Açık form yapılar, düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen iyi mekanik özellikler sunarlar. Bu, hafif bileşenlerin üretimine olanak tanımakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca açık formundan dolayı sıvı ve gazların hücreler arasında serbestçe hareket etmesine izin vererek filtreleme, soğutma ve diğer sıvı veya gaz ile çalışan uygulamalar için kullanılabilirler. Yine açık form yapıları, ısı dağılımı ve ısı transferine izin veren yapıları ile termal yönetim uygulamaları için uygun olabilir [99]. Kapalı form stokastik yapılar ise hücrelerin birbirinden izole olduğu ve hücreler arasında sıvı veya gaz geçişine izin vermeyen rastgele düzenlemelere sahip hücresel yapılarıdır. Kapalı form yapıları, hücrelerin birbirinden izole olması nedeniyle, yüksek termal ve akustik yalıtım sağdıkları için enerji tasarrufu ve gürültü kontrolü uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca kapalı formdaki yapılar, yüksek enerji emilimini ve darbe direncine sahiptir. Bu yetenekleri, otomotiv ve spor ekipmanları gibi darbelere maruz kalan bileşenler için kullanışlıdır. Kapalı form yapılar, hücre büyüklüğü ve duvar kalınlığı gibi parametrelerin kontrolü ile mekanik özelliklerin optimize edilmesine olanak tanıyarak belirli uygulamalar için özel olarak tasarlanmış hücresel yapıların üretiminde kullanılabilirler [23].

Stokastik olmayan (kafes) yapılar, belirli bir geometri ve bağlantı düzenine sahip hücresel yapıları ifade etmektedir. Bu tür yapılar, belirli mühendislik gereksinimlerine göre tasarlanabilir ve optimize edilebilir. Kafes yapıları genel olarak 2B ve 3B olmak üzere iki farklı şekilde değerlendirilir. 2B kafes yapılar, düzlemde boyunca hizalanmış hücrelerden oluşan tekrarlı unsurları ifade etmektedir. Bu yapılar, birbirine bağlanan düzlemsel çubuklar veya plakalar şeklinde olabilir. 2B kafes yapılar, malzeme kullanımını en aza indirirken yüksek dayanım performansı sunarlar. Ayrıca geometri ve bağlantı düzenine göre değişen elastikiyet özellikleri de sunabilirler [51]. Diğer taraftan 3B kafes yapılar ise üç boyutlu uzayda konumlandırılmış düzenli ve tekrarlı unsurlarından oluşmaktadır. Bu yapılar, 2B düzlemsel kafes yapılarından daha kompleks geometri ve bağlantılara sahiptir ve optimize edilmiş mekanik, termal ve akustik özellikler sunarlar. 3B kafes yapılar, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık sunarak hafif ve dayanıklı bileşenlerin üretimine yardımcı olurlar. Ayrıca unsurların oryantasyonu ile yüksek enerji emilimi ve darbe direnci elde edilebilir. 3B kafes yapılar, belirli mekanik ve termal özellikler sunmak için hücre geometrisi, bağlantı düzeni ve malzeme seçimi ile özelleştirilebilir. Bu sayede, uygulamanın gereksinimlerine göre optimize edilmiş yapılar elde edilebilir.

2.4.2. Kafes yapı teorileri

Hücresel yapılar, içlerinde boşluklar olan birbirine bağlı katı çubuk veya yüzey elemanlarından oluşan bir tür ağ sistemidir. Hücresel yapılar için klasik teoriler, birçok araştırma grubu tarafından iyi bir şekilde geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir [13,14,100]. Açık veya kapalı hücresel yapılar için, hücresel bileşenlerin geometrik hacim oranı bağıl yoğunluk (RD) ve gözeneklilik (ρ) kullanılarak belirlenebilir. Bu iki değişken arasındaki korelasyon Eş. 2.1'de verilmiştir.

$$RD + \rho = 1 \tag{2.1}$$

Kafes yapılarının mekanik özelliklerini tahmin etmek için birçok farklı analitik metot önerilmesine rağmen en bilineni ilgili mekanik hasar modlarına ilişkin ilkelerden türetilmiş öngörülere dayanan Asby-Gibson modelidir (Çizelge 2.5) [10,14].

Çizelge 2.5. Eğilmenin veya gerinme baskın olduğu mekanik davranışlar için Gibson-Ashby ilişkileri [101]

Mekanik Davranış	Mekanik Özellikler	Denklem
Eğilme Baskın	Young Modülü	$E^* = CE_s\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{n\cong 2}$
	Kopma dayanımı	$\sigma^* = C\sigma\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{n\cong 1,5}$
Gerinme Baskın	Young Modülü	$E^* = CE_s\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{n\cong 1}$
	Kopma dayanımı	$\sigma^* = C\sigma\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{n\cong 1}$

Burada kafes yapısına ait mekanik özellikler (E*, σ*), aynı hacimdeki katı yapının mekanik özelliklerinin (E_s, σ_s) kafes ve katı yapının öz kütlesine (ρ^*,ρ_s) bağlı bir fonksiyonudur. c sabiti ve n katsayısı sırasıyla kafes yapısına ve kafesin mekanik davranış tipine bağlı olarak değişmektedir. Üs (n), eğilme veya gerinme baskın olabilen yapı davranışına bağlıdır. Kafes yapı türüne bağlı olarak gerinme baskın yapılar için n değeri genellikle 1 iken eğilme baskın yapılarda üs değeri 1 ile 2 arasında değişmektedir. Bu mekanik davranış sınıflandırma ise Maxwell'in kararlılık kriteri (Eş. 2.2 ve Eş. 2.3) tarafından belirlenmiştir [102]. Maxwell'in kararlılık kriterine göre, kafes yapılarında iç ve dış yükler nedeniyle oluşan çekme ve basma kuvvetlerinin çubuk unsurları boyunca sönümlenir. Bu nedenle dış yüklerin kafes yapı unsurları içindeki iç kuvvetlerle sağlam bir şekilde dengelenebilmesi için, yeterli sayıda çubuk eleman ve uygun düğüm bağlantısı bulunmalıdır. Maxwell, yüklerin mekanik olarak sağlam bir şekilde karşılanması için gereken bir dizi matematiksel koşul önermiştir [101].

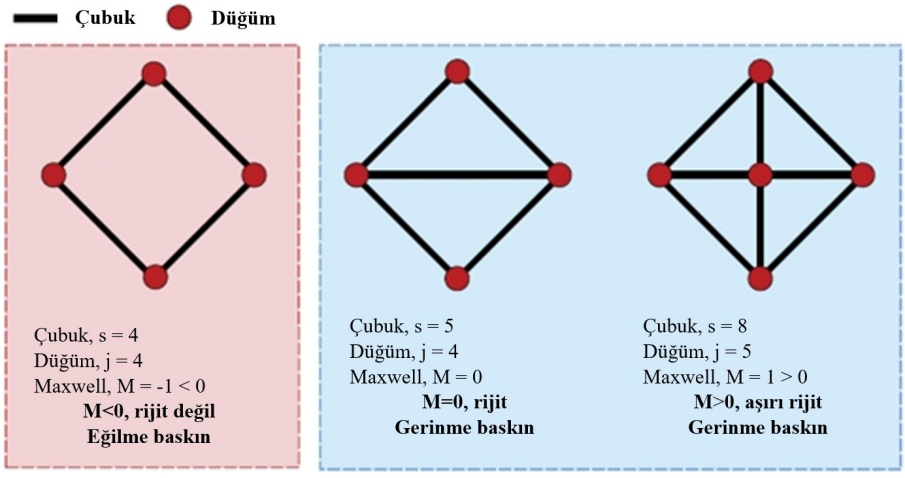
2B yapılar için $M = s - 2j + 3$ (2.2)

3B yapılar için $M = s - 3j + 6$ (2.3)

Burada 'j' düğüm sayısı ve 's' birim hücredeki çubuk eleman sayısıdır. $M < 0$ olduğu durumlarda yapının rijit olmadığı ve eğilme baskın mekanik davranış göstereceği düşünülürken, $M > 0$ durumunda rijit yapının gerinme baskın davranış göstermesi beklenir. Şekil 2.20, farklı kafes yapıları için Maxwell kararlılık değerlerini göstermektedir. Şekil 2.20a'daki $M < 0$ olan kafes yapı yüklendiğinde eğilir ve kinematik olarak kararsız bir yapı

sistemini gösterir. Şekil 2.20a'daki M = 0 olan üçgen kafes yüklendiğinde rijittir. Çünkü enine çubuk gerilmelere karşı direnç göstermektedir. Şekil 2.20c'deki M > 0 olan çerçeve aşırı kısıtlıdır ve gerinme baskın mekanik özellik göstermektedir. Örneğin bu tip yapılarda yatay çubuğun boyu kısaltılırsa, hiçbir dış yük uygulanmadığı halde dikey olan gerilmeye maruz kalacaktır [103]. Kısaca gerinme baskın yapıların daha çok eksenel yüklere maruz kalırken eğilme baskın yapılar daha çok eğilme yüklerine maruz kalmaktadır.

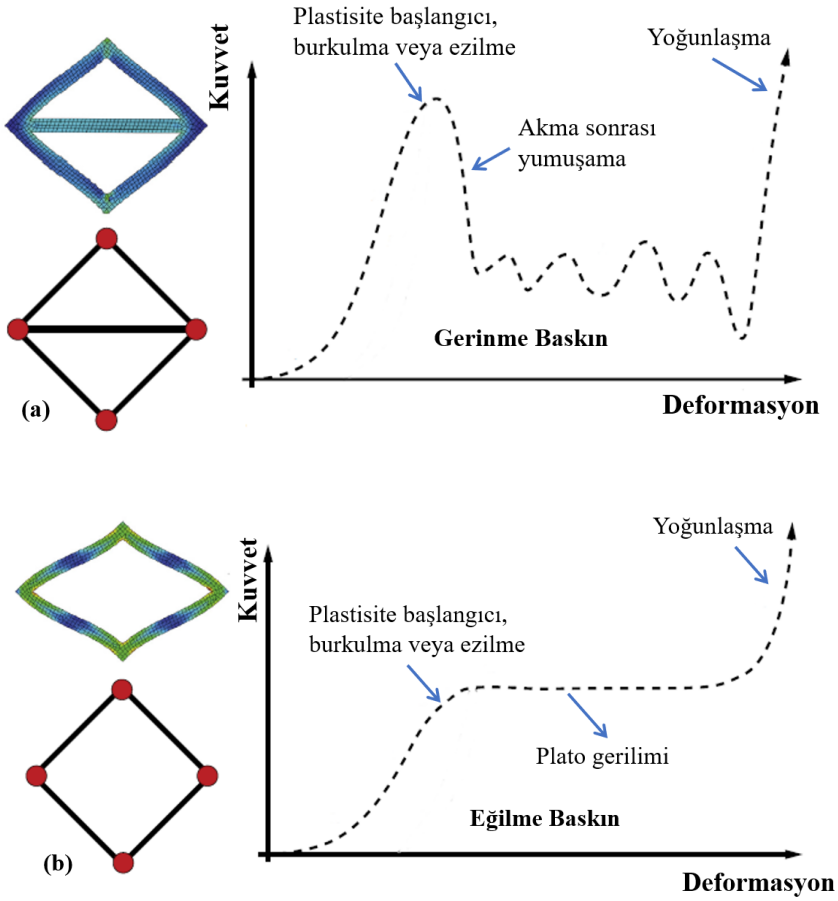
Maxwell kriterinin kullanışlılığına rağmen, Eİ uygulanmasında potansiyel olarak hatalı tasarım kararları verme potansiyeli ve tasarım optimizasyonu için kaçırılan fırsatlarla sonuçlanan nüanslar vardır. Çünkü Eklemeli imalat, Maxwell kriteriyle doğru bir şekilde modellenemeyen karmaşık ve zor geometrilerin üretilmesine olanak verir. Kriterde kullanılan varsayımlar, bu karmaşık yapılar için her zaman geçerli olmayabilir. Ayrıca Eİ yöntemlerinde yoğun olarak görülen anizotropi nedeniyle mekanik özellikler baskı doğrultusuna bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca Eklemeli imalat prosesleri, malzeme özelliklerini ve performansını önemli ölçüde etkileyebilecek gözeneklilik, kalıntı gerilmeler ve mikro çatlaklar gibi çeşitli kusurları ortaya çıkarabilir. Maxwell kriterinde, süreç kaynaklı bu kusurları hesaba katılmaz. Bu nedenle kafes yapıların eklemeli imalatında ileri düzey teorik ve pratik araştırılmaların yapılması gereklidir.



Şekil 2.20. Potansiyel düzlemsel kafes konfigürasyonlarının şematik gösterimi [103]

Eğilme ve gerinme baskın hücresel yapıların mekanik özellikleri arasında önemli farklılıklar vardır. Eğilme baskın yapılar çubuk/ince duvarların eğilme deformasyonuna karşı daha düşük direnci nedeniyle, gerinme baskın yapılara kıyasla genellikle daha düşük modül ve mukavemet sergiler. Şekil 2.21, farklı hücresel yapı mekanizmalarının gerilme-gerinim

özelliklerini göstermektedir. Şekil 2.21a'de gösterildiği gibi, gerinme baskın yapılar daha yüksek ilk kırılma dayanımına sahiptirler. Bu yapılarda ayrıca, dalgalı gerilmeye sahip deformasyonun başlangıcından önce bir akma yumuşaması süreci yer almaktadır. Diğer yandan, eğilmenin baskın olduğu yapılarda (Şekil 2.21.b), klasik plato gerilme-uzama eğrisini görülmektedir.



Şekil 2.21. (a) Gerinme baskın ve (b) eğilme baskın kafes yapılarına ait tipik kuvvet deformasyon grafiği

Mekanik davranışların doğru tahminlerini ve hücresel yapıların optimal tasarımlarını sağlamak için bu yapıların analiz edilmesi kritik öneme sahiptir. Kafes yapılarının deformasyon analizinde iki farklı temel kiriş teorisi kullanılabilir. Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileri, yapısal mekanikte temel kavramlardır ve çeşitli yükleme koşullarına tabi ince yapıların, özellikle çubuk elemanların, davranışlarını analiz etmek için basitleştirilmiş yöntemler sunarlar. Euler-Bernoulli kiriş teorisi, kirişlerin eğilme davranışını analiz etmek için kullanılır. Bu teoride kirişin kesit düzlemi boyunca düz kalacağı varsayılmaktadır [104]. Bu teori, kirişin yüksekliğinin uzunluğuna göre önemli ölçüde büyük olmadığı durumlar için uygundur. Temel denklemler kirişin eğilme momenti, kesme

kuvveti ve elastik deformasyonları arasındaki ilişkiyi belirler. Euler-Bernoulli denklemi (Eş. 2.4), kirişin yer değiştirmesi ile uygulanan yük arasındaki ilişkiyi açıklamada kullanılır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{d^2}{dx^2}\left(EI\frac{d^2w}{dx^2}\right) = q(x) \tag{2.4}$$

Burada, *w(x)* eğrisi, kirişin tek boyutlu bir nesne olarak modellendiğini varsayımı ile x konumdaki kirişin z yönündeki yer değiştirmesini tanımlar. *q*, yayılı bir yüktür, başka bir deyişle birim uzunluk başına bir kuvvettir. *E*, elastik modüldür ve *I*, kiriş kesitinin ikinci alan momentidir. *I*, uygulanan yüke dik olan ve kesitin ağırlık merkezinden geçen eksene göre hesaplanmalıdır [104].

Timoshenko kiriş teorisi, Euler-Bernoulli teorisine kıyasla daha genel bir yaklaşımdır ve kirişin kesitlerinin düzlemde düz kalmayabileceğini dikkate alır [105]. Bu, kısa ve kalın kirişler için daha gerçekçi bir model sunar. Timoshenko teorisi, kesme deformasyonları ve kesme esnekliği gibi ek faktörleri dikkate alarak, yapısal davranışı daha doğru bir şekilde tahmin etmektedir. Eksenel etkileri olmayan statik Timoshenko kiriş teorisinde, kirişin yer değiştirmeleri Eş. 2.5'te verildiği gibi varsayılır.

$$u_x(x,y,z) = -z\varphi(x);\ u_y(x,y,z) = 0; u_x(x,y,z) = w(x) \tag{2.5}$$

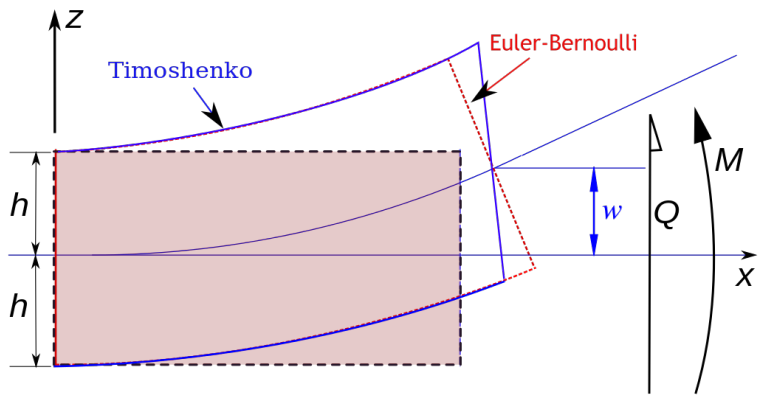
Burada *x, y, z* kiriş üzerindeki noktanın koordinatları, u_x, u_y, u_z, yer değiştirme vektörünün üç koordinat yönündeki bileşenleridir. *φ*, yüzey normalinin kirişin orta yüzeyine olan dönme açısıdır ve *w*, orta yüzeyin z yönündeki yer değiştirmesidir. Temel denklemler, Eş. 2.6 ve Eş. 2.7'de verilen adi diferansiyel denklemlerin birleştirilmiş halidir.

$$\frac{d^2}{dx^2}\left(EI\frac{d^2\varphi}{dx^2}\right) = q(x) \tag{2.6}$$

$$\frac{dw}{dx} = \varphi - 1\frac{1}{\kappa AG}\frac{d}{dx}\left(EI\frac{d^2\varphi}{dx^2}\right) \tag{2.7}$$

Burada *A* kesit alanı, *E*, elastik modül ve *G*, kesme modülü belirtmektedir. *I*, bölgenin ikinci momentidir. Timoshenko kayma katsayısı olarak adlandırılan *κ* geometriye bağlıdır. Bu değer dörtgen kesitli kiriş için genelde 5/6'dır [106].

Kafes yapılar söz konusu olduğunda, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileri, kafes yapıdaki elemanların yer değiştirmeleri, gerilmeleri ve deformasyonlarını analiz etmek için kullanılan yaygın teorileridir. Bu iki teorinin deformasyon farklılığı Şekil 2.22'de dikdörtgen kesitli kiriş üzerinde gösterilmiştir. Bu teoriler sayesinde mühendisler, yapıların taşıma kapasitesini, hafiflik ve mukavemet gibi performans ölçütlerine göre optimize edebilir ve güvenli yapı tasarımları oluşturabilirler.



Şekil 2.22. Euler-Bernoulli kirişi (kırmızı) ve Timoshenko kirişinin (mavi) deformasyonu [107]

2.4.3. Kafes yapıların eklemeli imalatı

Kafes yapıların üretiminde farklı yetenek ve verimliliğe sahip döküm, toz metalürjisi, sac şekillendirme/bağlama ve tel dokuma gibi birçok geleneksel yöntem kullanılmaktadır [19]. Fakat bu yöntemlerle kafes yapılarının üretilmesi yüksek bir ilk yatırım maliyetinin ardından ön hazırlık ve ardıl işlem nitelikli işçiliği gerektirmektedir. Bu durum üretimi oldukça maliyetli zaman alıcı ve zahmetli bir hale getirdiğinden geleneksel yöntemlerle kafes yapısı üretimi zaruri olmadıkça tercih edilmemektedir. Doğası gereği tasarım esnekliği sunan Eİ teknolojileri ile işlevsel ve hafif parçalar hızlı bir şekilde üretilebilir. Böylece kafes yapıları Eİ sistemleriyle uzman bilgisi gerektirmeden tek bir adımda hızlı bir biçimde üretilebilir.

Kafes yapıların eklemeli imalat ile üretilmesi, bir dizi önemli avantaj sağlar. Bu avantajlar, daha etkili tasarım ve mühendislik çözümleri, malzeme optimizasyonu, üretim süreçlerinde iyileştirmeler ve sürdürülebilirlik olarak sıralanabilir [108]. Bu avantajlardan en önemlisi eklemeli imalat, mühendislere ve tasarımcılara karmaşık geometriler ve özelleştirilmiş yapılar oluşturma özgürlüğü sunmasıdır. Bu sayede özelleşmiş uygulamalar için kafes yapıların mekanik, termal ve akustik performansı optimize edilebilir. Eklemeli imalat için

tasarım ve üretim süreçleri geleneksel yöntemlerle üretime kıyasla daha hızlı ve pratiktir. Hızlı üretim süreci ve minimum ön ve ardıl işlem gereksinimi sayesinde eklemeli imalat özellikle küçük hacimli üretim ve özelleştirilmiş parçalar için daha ekonomiktir. Ayrıca Eİ, birden fazla fonksiyonu tek parçalı bileşenlere entegre etme yeteneğine sahiptir. Eİ teknolojileri sayesinde böylece parça sayısı azaltılarak montaj süresi ve işçilik maliyeti düşürülebilir ve ürünün genel performansı iyileştirilebilir. Yapı performansı kullanılan malzemeye de bağlıdır. Eklemeli imalat, metal alaşımlar ve reçineler gibi gelişmiş malzemelerin kullanılmasının önünü açmaktadır. Böylece Eİ yapıları hafifletirken mukavemet ve rijitlik özelliklerini koruyan veya artıran optimize edilmiş geometriler üretmeye olanak tanımaktadır.

2.5. Lazer Malzeme Etkileşim Mekanizması

Lazer İngilizce "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" teriminin kısaltmasıdır ve Türkçe olarak "Uyarılmış Işınım Emisyonu ile Işık Artırımı" olarak ifade edilmektedir [109]. İlk lazer 1960'larda Theadore Maiman tarafından keşfedilmiştir [110]. İlk keşfedilen lazer bir Ruby (Yakut) lazer idi. Lazerin temelleri Einstein'in 1916'da yayınladığı Uyarılmış Emisyon temelli fotoelektrik etki makalelerine dayanmaktadır [111]. Bu makalede lazer ışınımının temelleri yer almaktadır. Einstein sıcak "I" objesinden yayılan ışınımı, uyarılmış yörüngede bulunan N_2 tane elektronun, N_1 elektronlu alt seviyeye geçerken ışıması ve alt seviyede tekrar absorbe edilmesi olarak tanımlamıştır (Eş. 2.8).

$$AN_2 - BIN_1 = I \tag{2.8}$$

Eşitlik tekrar düzenlenirse (Eş. 2.9);

$$I = \frac{AN_2}{1+BN_1} \approx \frac{AN_2}{BN_1} \tag{2.9}$$

ifadesi elde edilir. Burada A ve B olasılık faktörüdür.

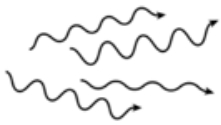
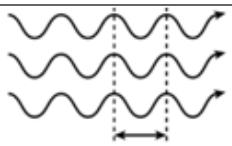
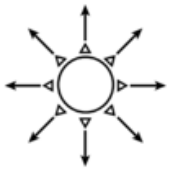
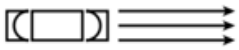
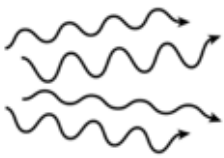
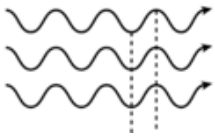
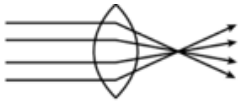
Yine N_2/N_1 oranı Boltzmann Dağılımı olarak bilinmektedir. Boltzmann Dağılımı bir sistemin belirli durumda olma olasılığını enerji (kinetik) ve sıcaklığın fonksiyonu olarak veren bir olasılık dağılımıdır (Eş. 2.10) [112].

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\left[\frac{-hc}{\lambda kT}\right]} \quad (2.10)$$

Burada h Plank sabiti ($6{,}626\times10^{-34}$ J·s), k ise Boltzman sabitidir ($1{,}380\times10^{-23}$ J/K).

Lazer, ışık kaynaklarının özel bir türüdür ve normal ışıktan (ör. güneş ışığı veya akkor ampul) önemli farklara sahiptir. Lazer ışınının standart ışıktan 4 temel farkı bulunaktadır (Çizelge 2.6). Burada uyumluluk, fotonların frekansı fazı ve doğrultusu aynı olan iki dalga şekilde hareket etmesi anlamına gelmektedir.

Çizelge 2.6. Lazer ışını ve ışık arasındaki temel farklılıklar [109]

	Normal ışık	Lazer ışınımı	Açıklama
Tek Dalga boyu (Monokromatik)	 Çeşitli dalga boyu	 Uniform dalga boyu	Normal ışıkta farklı dalga boyları bulunurken, lazer ışını tek bir dalga boyuna sahiptir.
Yönlülük			Işık her yöne yayılır iken lazer ışını tek bir yönde yayılmaktadır.
Uyumluluk		 Tepe ve çukur noktalar hizalı	Lazer ışınında elektromanyetik dalgalar ışıktan farklı olarak uyumludur.
Enerji Yoğunluğu			Lazerde odak noktasında ışığa kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sağlanmaktadır.

Lazerler, çeşitli dalga boylarında çalışabilen ve farklı uygulamalar için kullanılabilen bir dizi tür ve sınıfa ayrılır. Bu lazerlerden başlıcalarına ait çalışma prensipleri ve uygulama alanları şu şekilde özetlenebilir:

Gaz lazer, aktif lazer ortamı olarak bir gaz karışımı kullanır. Helyum-neon (HeNe) lazer ve karbondioksit (CO_2) lazer en bilinen gaz lazerleridir. HeNe lazerler, düşük güçlü kırmızı ışık üretir ve spektroskopi ve interferometri gibi hassas ölçüm uygulamalarında kullanılır. CO_2 lazerler, yüksek güçte kızılötesi ışık üretir ve endüstriyel kesme, kaynak ve malzeme işleme için kullanılır.

Katı hal lazer, aktif lazer ortamı olarak katı bir kristal kullanır. En bilinen katı hal lazeri, neodimyum-yttrium alüminyum garnet (Nd:YAG) lazeridir. Nd:YAG lazerler, kızılötesi dalga boyunda çalışır ve malzeme işleme, medikal uygulamalar ve lazer iletişimi için kullanılır.

Yarı iletken lazer, aktif lazer ortamı olarak yarı iletken malzemeler kullanır ve elektrik akımı ile pompalanır. Diyot lazerler, kompakt, enerji verimli ve uzun ömürlüdür. Çeşitli dalga boylarında çalışabilen diyot lazerler, optik iletişim, lazer işaretleme, barkod okuyucular ve medikal uygulamalar için kullanılır.

İyon lazer, plazma durumunda bulunan iyonize gazları aktif lazer ortamı olarak kullanır. Argon ve kripton iyon lazerleri örnek olarak verilebilir. İyon lazerleri, genellikle çok renkli ışık üretir ve spektroskopi, holografi ve florometri gibi uygulamalar için kullanılır.

Eksimer lazer, aktif lazer ortamı olarak yarı iletken gazlar ve soğuk plazma kullanır. Eksimer lazer, kısa dalga boyunda ultraviyole ışık üretir ve hassas malzeme işleme, yüzey işleme, litografi ve oftalmolojik cerrahi gibi uygulamalar için uygundur.

Fiber lazer, aktif lazer ortamı olarak katkılı optik fiber kullanır ve optik lif boyunca lazer ışını iletilir. Fiber lazerler, enerji verimli, kompakt ve bakım gerektirmeyen yapısıyla bilinir. Bu lazerler, lazer işaretleme, malzeme işleme, kesme ve kaynak gibi endüstriyel uygulamaların yanı sıra telekomünikasyon ve tıbbi uygulamalarda da kullanılır.

Femtosaniye lazer, ultra kısa darbe süreleriyle (tipik olarak 10^{-15} saniye) çalışan lazerlerdir. Bu tür lazer, yüksek darbe enerjileri ve yüksek tekrarlama oranları sağlar. Femtosaniye lazerler, mikro işleme, biyomedikal görüntüleme, spektroskopi ve lazer cerrahi gibi uygulamalar için kullanılır.

Çizelge 2.7. Farklı tür lazerlerin fotonik özellikleri

Lazer Türü	Lazer enerji kaynağı	Dalga boyu, λ (μm)	Frekans, *v*, (Hz)	Enerji (eV)*
CO_2	Moleküler titreşim	10,6	$2,8 \times 10^{14}$	0,12
CO	Moleküler titreşim	5,4	$5,5 \times 10^{14}$	0,23
Nd:YAG	Moleküler titreşim	1,06	$2,8 \times 10^{14}$	1,16
He-Ne	Moleküler titreşim	0,632	$4,7 \times 10^{14}$	1,95
Argon iyon	Moleküler titreşim	0,488	$6,1 \times 10^{14}$	2,53
Eksimer	Atomik elektron orbitleri	0,249	$1,2 \times 10^{15}$	4,9
Serbest elektron	Manyetik saptırıcı	1×10^{3}-10^{6}	1×10^{8}-10^{11}	1×10^{-2}-10^{-5}

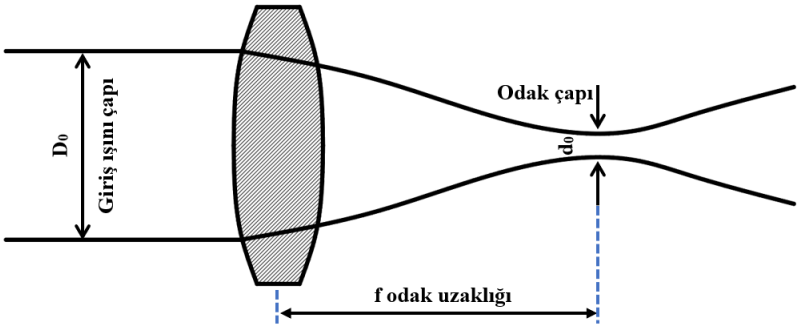
*E=hv; 1 eV=$1,6 \times 10^{-19}$ J

Farklı yapı ve malzemeleri barındırılan lazerler ve ilgili dalga boyu frekans ve enerji gibi fotonik özellikleri Çizelge 2.7'de özetlenmiştir. Çeşitli fotonik özelliklere ve farklı çalışma mekanizmalara sahip bu lazerler özelleşmiş uygulamalarda kullanılmaktadır. Uygulama da kullanılacak lazer türü belirlenirken ihtiyaç duyulan dalga boyu, güç, uyumluluk ve maliyet gibi etkenler göz önünde bulundurulmalıdır. SLM eklemeli imalat yönteminde genellikle fiber lazer tercih edilmektedir. Çünkü kompakt ve hafif tasarımları, fiber lazeri SLM makinelerine entegre etmek için ideal bir seçenek haline getirmektedir. Ayrıca fiber lazer düşük bakım gerektirir ve uzun ömürlüdür. Öte yandan fiber lazerler, diğer lazer türlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği sunarak SLM işleminin maliyetini düşürürler. Bunlara ek olarak fiber lazer, yüksek ışın kalitesi ve iyi odaklanma hassasiyeti sağlayarak SLM işlemlerini hızlandırır ve üretim sürelerini kısaltır. Ayrıca fiber lazerler, çeşitli dalga boylarında çalışabilme özelliğine sahiptir. Böylece SLM cihazların farklı metal tozlarının işlenmesi ve daha geniş bir malzeme yelpazesiyle çalışabilmesini sağlarlar.

2.5.1. Gauss ışını ve lazer ışın kalitesi

Gauss ışınları enine elektrik alanları ve yoğunluk dağılımları Gauss fonksiyonu ile tanımlanabilen elektromanyetik ışınlardır [113]. Lazerler Gauss profiline oldukça yakın ışınlar üretirler (TEM00 modu). Bir mercek tarafından kırınım gerçekleştiğinde, Gauss ışını başka tip bir Gauss ışınına dönüşür (sadece ışını matematiksel olarak tanımlayan değişkenler

seti farklılaşır). Hassas odaklanma ve boşluksuz ışın sağlandığı için Gauss ışınları lazer optiğinin çok önemli birleşenidir. Lazerin odak büyüklüğünün tespiti için Şekil 2.23'te şematik olarak gösterilen ve Eş. 2.11'de verilen formülasyon kullanılabilir.



$$d_0 = \frac{M^2 4\lambda f}{\pi D_0} \tag{2.11}$$

Şekil 2.23. Lazer odaklanmasının şematik gösterimi

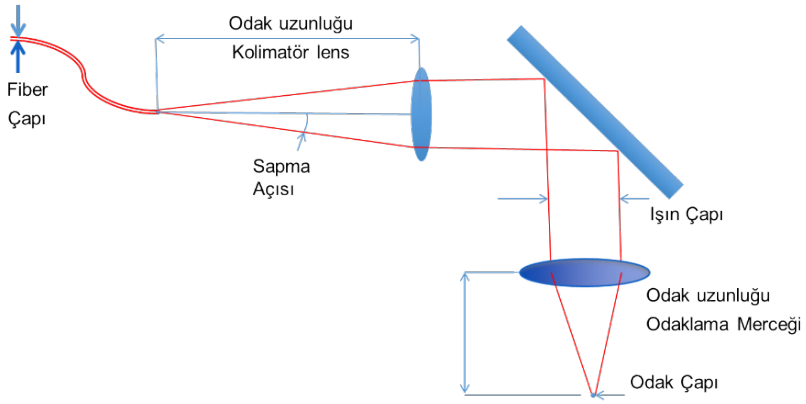
Burada d_0 odak çapı, D_0 gelen ışın çapı, M^2 ışın modu (kalitesi), λ dalga boyu, f frekansıdır. Eş. 2.11 sadeleştirildiğinde, odak çapı Eş. 2.12'de verilen eşitlikle hesaplanabilir.

$$d_0 = 2.44\frac{\lambda f}{D_0} \tag{2.12}$$

SLM yönteminde olduğu gibi ışığın fiberler vasıtasıyla aktarılması (Şekil 2.24) durumunda ise odak çapı Eş. 2.13'te gösterildiği gibi belirlenir.

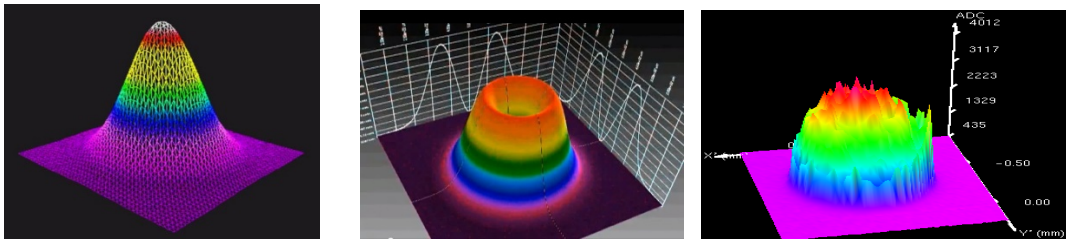
$$Işın\ Çapı\ =\ Kolimatör\ lens\ odak\ uzunluğu\ x\ Tan\ (Sapma\ açısı) x\ 2$$

$$Odak\ Çapı = Fiber\ Çapı\ x\ \frac{Odaklama\ merceği\ odak\ uzunluğu}{Kolimatör\ lens\ odak\ uzunluğu} \tag{2.13}$$



Şekil 2.24. Fiber lazerler için odak çapı [114]

Işın kalitesi faktörü veya ışın yayılım faktörü olarak da adlandırılan M^2 faktörü, bir lazer ışınının kalitesinin bir ölçüsüdür. Lazer ışını kalite parametresi M^2, bir ışının, ışın parametre ürününün (BPP), aynı dalga boyundaki ideal bir Gauss parametre ürününe oranıdır. Farklı lazer kalite faktörlerinde elde edilen gauss ışın profilleri Şekil 2.25'te verilmiştir. Çizelge 2.8'de ise bazı lazer türlerine ait ışın kaliteleri verilmiştir.



Gauss ışın profili (M^2=1) M^2 >1 M^2 ~ 10

Şekil 2.25. Bazı ışın kalite faktörleri ve gauss dağılım profilleri [115]

Odak derinliği, odaklanan ışının yaklaşık olarak aynı yoğunluğa sahip olduğu mesafedir. Odak noktası büyüklüğünün ± % 5 oranında değiştiği mesafe olarak tanımlanmaktadır.

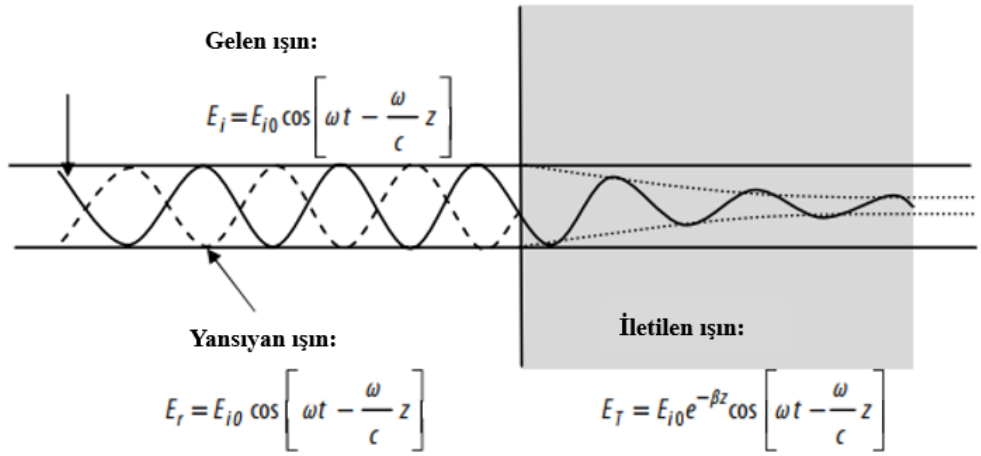
Çizelge 2.8. Bazı lazer türlerine ait ışın kaliteleri [116]

CO_2 Lazer		ND:YAG Lazer		Fiber Lazer	
Güç (W)	M^2	Güç (W)	M^2	Güç (W)	M^2
<500	1,1 – 1,2	0-20	1,1 – 1,5	Tek Mod 100-1000	1,1-1,2
800 - 1000	1,2 - 2	20 - 50	1,5 - 5		
1000 - 2500	1,2 - 3	50 - 150	5 - 15	Çoklu Mod >1000	~15'e kadar
>5000	2 - 5	150 - 500	10 - 20		

2.5.2. Elektromanyetik radyasyonun malzemeyle etkileşimi

Elektromanyetik radyasyon, elektrik ve manyetik alanların salınımıyla yayılan enerji dalgalarıdır. Lazer, elektromanyetik radyasyonun özel bir türüdür ve ışığı yüksek düzeyde yoğunlaştırarak, düşük dağılıma sahip ve yönlendirilebilir hüzmelere dönüştürür. Özetle, elektromanyetik radyasyon enerji dalgalarıdır ve lazerler bu enerjiyi yoğun, yönlendirilebilir ışık hüzmesi şeklinde kullanır. Elektromanyetik radyasyon bir yüzeye çarptığında, dalga

Şekil 2.26'da gösterildiği gibi hareket eder. Bazı radyasyonlar yansıtılır, bazıları emilir ve bazıları iletilir.



Şekil 2.26. Lazer ışını malzeme etkileşimi [116]

Elektromanyetik dalganın başka bir ortama geçmesiyle oluşan absorpsiyonu Beer-Lambert yasası (Eş. 2.14) ile açıklanır;

$$I = I_0 e^{-\beta z} \tag{2.14}$$

Burada β absorbsiyon katsayısıdır. Bu katsayı ortama, radyasyonun dalga boyuna ve güç yoğunluğuna bağlıdır.

Işın malzemeye geldiğinde elektromanyetik alan birleşenlerinden elektrik alanın enerjisi atomik nükleonları titreştiremeyecek kadar küçüktür. Fakat fotonlar bağlı veya serbest elektronlarla etkileşerek onlar titreştirebilir. Elektron titreştiği için ya her yöne (yansıyan ve iletilen radyasyon) yeniden yayılacak ya da kafes fotonları (katı veya sıvı bir yapı içindeki bağlanma enerjisi) tarafından sınırlandırılacaktır ki bu durumda yayılma olmadığı için enerjinin emildiği kabul edilecektir. Fotonların neden olduğu bu titreşim, yapıdaki bağlı moleküller boyunca iletilir. Yapıdaki bu titreşimler ısı olarak açığa çıkar. Bu ısı akışı Fourier'in ısı iletimi yasaları (Eş. 2.15) tarafından tanımlanır;

$$\frac{q}{A} = \frac{-kdT}{dx} \tag{2.15}$$

Yani dx kalınlığında bir tabakadan birim zamanda iletimle geçen ısı, sıcaklık farkı ΔT ve ısı geçişine dik alan A ile doğru orantılı, tabakanın kalınlığıyla da ters orantılıdır.

Yeterli enerji emilmesi durumunda moleküler titreşim yoğunlaşır ve malzemenin moleküler bağları zayıflar. Ardından malzeme mukavemet gösteremez ve erir. Daha fazla enerji girişiyle beraber güçlü moleküler titreşimlerle moleküler bağlar iyice zayıflar ve malzeme buharlaşır. Buharın bağlı elektronları hala bir miktar radyasyon emebilir ve yeterli emilim ile elektronlar serbestçe çalkalanır ve gazın bir plazma olduğu söylenebilir. Fakat femtosaniye darbeleri (10^{-15} s) ile ısıl iletim için yeterli zaman yoktur ve bu nedenle malzemelerde yıldızların iç kısmı gibi katı hal plazması oluşur. Bir iletken içindeki elektron çarpışmaları arasındaki ortalama boş zamanın 10^{-13} s civarındadır ve bu yaklaşık 1 ps'lik (darbe başına 10^{-12} s) son derece kısa lazer darbeleri için, malzemenin dengede olmayan iki sıcaklık içermesinin mümkün olduğu anlamına gelir. Bu sıcaklıklar elektron sıcaklığı ve atom sıcaklığıdır. Bu çok kısa darbelerdeki ısı dağılım ise Fourier olmayan iletim yöntemleri ile açıklanmaktadır [117].

2.5.3. Malzemede yansıma ve absorpsiyon mekanizması

Malzeme yüzeyine gelen ışınların bir kısmı absorbe edilirken bir kısmı yansıyacaktır. Absorpsiyon katsayısının değeri yansıtıcılığı etkileyen etkilerle bağlı olarak değişmektedir (Eş. 2.16).

$$Yansıma\ opak\ malzemeler\ için;\ Yansıma\ =\ 1 - Absorpsiyon$$

$$Transparan\ malzemeler\ için;\ Yansıma\ = 1 - (Geçirgenlik\ +\ Absorpsiyon) \tag{2.16}$$

Metallerde radyasyon ağırlıklı olarak elektron bulutu içindeki serbest elektronlar tarafından emilir. Bu serbest elektronlar, katı atomik yapıyı bozmadan salınım ve yeniden ışınım yapabilirler. Bu yüzden metallerin yansıtıcılığı genellikle yüksektir. Elektromanyetik dalga yüzeye ulaştığında, yüzeydeki tüm serbest elektronlar bir fazda titreşir ve gelen ışına 180º faz açılı bir elektrik alan üretilir. Bu alanın toplamı geliş açışının yansıma açısına eşit olduğu bir ışın olacaktır. Metal yapı içindeki bu durum, radyasyonun metallerde önemli bir derinliğe

(sadece bir ila iki atom çapına) nüfuz edemediği anlamına gelmektedir. Metaller böylece opaktır ve parlak görünürler [116].

Havadaki dielektrik veya metal yüzeyden normal geliş açıları için yansıma katsayısı (Eş. 2.17), ilgili malzeme için kırılma indisi n ve sönümlenme katsayısı k kullanılarak hesaplanabilir:

$$R = \frac{[(1-n^2)+k^2]}{[(1+n^2)+k^2]} \tag{2.17}$$

Burada R yansıtma sabitidir. Metal gibi opak malzemeler için absorbsiyon A olmak üzere;

$$A = 1 - R$$

$$A = \frac{4n}{[(1+n^2)+k^2]} \tag{2.18}$$

olarak belirlenir. Çizelge 2.9'de bazı malzemeler için yansıma sabitleri verilmiştir. Alüminyum ve bakır yüksek yansıtıcılığa sahipken titanyum ve alaşımları nispeten daha düşük yansıtıcılığa sahiptir. Bu nedenle AlSi10Mg malzemenin SLM ile üretiminde lazer işlem parametrelerine dikkat edilmelidir.

Çizelge 2.9. 1,06 µm dalga boylu ışınım için bazı malzemeleri kırılma indisleri ve yansıma katsayıları [118]

Malzeme	k	n	R	Malzeme	k	n	R
Al	8,50	1,75	0,91	Sn	1,60	4,70	0,46
Cu	6,93	0,15	0,99	Ti	4,0	3,8	0,63
Fe	4,44	3,81	0,64	W	3,52	3,04	0,58
Mo	3,55	3,83	0,57	Zn	3,48	2,88	0,58
Ni	5,26	2,62	0,74	Cam	0	1,5	0,04
Pb	5,40	1,41	0,84				

Eş. 2.19'da verildiği gibi, *d* derinliğindeki *E* elektrik alanının genliğindeki değişim, vakumda ortamındaki λ dalga boyu için Beer-Lambert yasası ile belirlenir.

$$E = E_0 e^{\left(\frac{-2\pi k d}{\lambda}\right)} \tag{2.19}$$

Güç yoğunluk (Eş. 2.20), genliğin karesiyle orantılıdır ve bu nedenle yoğunluğun derinlik ile değişimi şu şekilde verilir:

$$I = I_0 e^{\left(\frac{-4\pi k d}{\lambda}\right)} \tag{2.20}$$

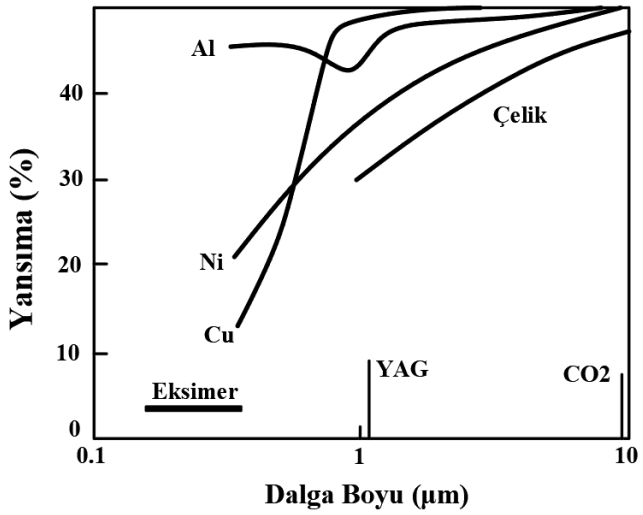
Örneğin, Çizelge 2.10'de görüldüğü gibi demirin 1,06 μm dalga boylu radyasyon için sönümlenme katsayısı k=4,49'dur. Güç yoğunluğu 0,038 μm derinlikte 1 / e^2 kadar (yani, geliş değerinin 0,13 katı) düşecektir. Yine 10,6 μm dalga boylu radyasyon (k = 32.2) için bu derinlik 0,052 μm olmaktadır. Çizelge 2.10'de verilen Brewster açısı ise ışığın iki farklı ortam arasında geçerken, polarize olduğu ve yansıma kaybının minimum olduğu belirli bir geliş açısıdır. Bu açı, ortamların kırılma indislerine bağlıdır ve Snell Yasası [119] kullanılarak hesaplanabilir. Brewster açısında, yansıyan ışık tamamen "p" polarize olur ve yüzeyde minimum yansıma ile ışık geçişi sağlanır. Bu özellik optik sistemlerde ve polarize ışık kaynaklarının oluşturulmasında kullanılır.

Çizelge 2.10. Farklı malzemeler için kırılma indisi ve Brewster açısı [116]

Malzeme	λ (μm)	k	n	Brewster açısı
Al	1,06	8,50	1,75	60,2
	10,6	34,20	0,108	88,3
Fe	1,06	4,49	3,81	75,2
	10,6	32,20	5,97	88,2
Ti		3,48	2,88	70,8
Cam		-	1,5	56,3

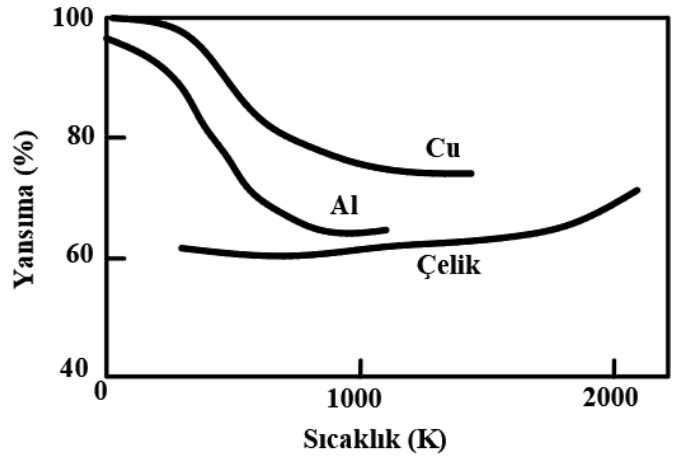
2.5.4. Işın malzeme etkileşimine etkisi eden faktörler

Başta dalga boyu olmak üzere malzeme sıcaklığı, malzeme pürüzlülüğü gibi birçok faktör lazer malzeme etkileşime etki etmektedir. Daha kısa dalga boylarında, foton enerjisi artar ve daha fazla elektronla etkileşir. Böylece yansıtıcılık düşer ve yüzeyin emiciliği artar. Şekil 2.27'de bazı malzemelerin dalga boyuna bağlı yansıtıcılık özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Bazı malzemeler için dalga boyuna bağlı olarak yansıtma oranlarındaki değişim [116]

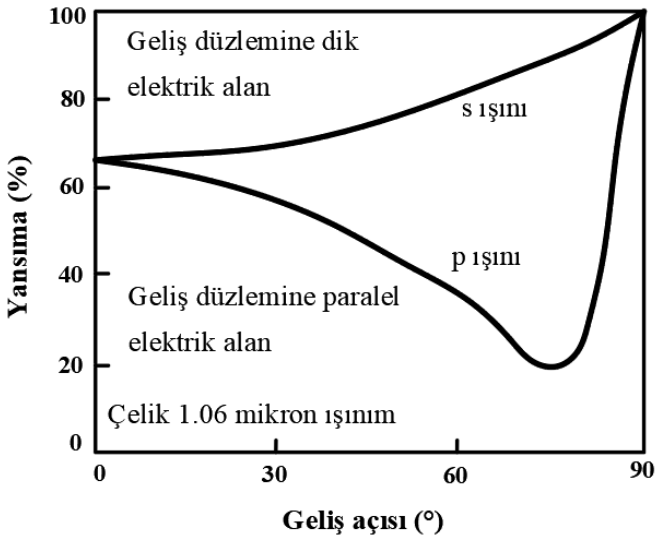
Malzeme sıcaklığı yükseldikçe fonon popülasyonunda bir artış olacak ve daha fazla fonon-elektron enerji değişimi meydana gelecektir. Bu durumda, elektronların salınım yapması ve yeniden yayılmasından ziyade yapı içinde etkileşmesi daha olasıdır. Dolayısıyla, bazı metaller için sıcaklık artışı ile yansıtıcılıkta bir düşüş ve emicilikte bir artış meydana gelmektedir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Malzeme yansıtıcılığının sıcaklık ile değişimi [116]

Işığın geliş açısı ve polorizasyonunun yansıma ve absorbiyona etkisi ilk olarak Drude tarafından araştırılmıştır [120]. Elektromanyetik dalgaların polarizasyon durumlarını tanımlamak için "s" ve "p" ışınları kullanılır. "p" ışını, elektromanyetik dalganın elektrik alanı vektörünün, yansıma düzlemine paralel olduğu durumu temsil eder. Bu durumda, gelen ışığın elektrik alanı vektörü, gelen ve yansıyan ışınların bulunduğu düzlemle aynı yönde

bulunur. “s” ışını, elektromanyetik dalganın elektrik alanı vektörünün, yansıma düzlemine dik olduğu durumu temsil eder. Bu durumda, gelen ışığın elektrik alanı vektörü, gelen ve yansıyan ışınların bulunduğu düzlemle dik yönde bulunur.



Şekil 2.29. 1,06 μm polarize ışınımdaki çelikte meydana gelen yansıma [116]

Yansıtıcılığın geliş açısı ile değişimi Şekil 2.29'da gösterilmektedir. Yüzey elektronları sadece belirli geliş açılarda titreşerek yüzeyden ayrılırlar. Matrisin bu değişimi için fotonun emilmesi gereklidir. Bu nedenle elektrik vektörünün ışının geliş düzlemiyle aynı doğrultuda olduğu durumda yüksek etkileşim elde edilir. Diğer yandan elektron düzlemi ışının geliş düzlemine dikse ışık çoğunlukla yansır. Bu nedenle SLM gibi lazer malzeme ilişkisinin olduğu sistemlerde polarizasyon lazer enerji verimliliği ve üretim kalitesi için önemlidir. İdeal yansıma açıları kullanarak, lazer enerjisi daha verimli hale getirilir ve yüzeyde emilen enerji miktarı artırılır. Bu sayede, SLM sürecinde daha yüksek kaliteli parçalar elde edilir.

3. KAFES YAPI TASARIM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Karmaşık kafes yapıların eklemeli imalatı nispeten yeni bir konsepttir ve giderek daha fazla popülerlik kazanmaktadır. Bu yaklaşımda, katı gövdeler, tekrarlanan özel tasarım hücresel yapılarla yer değiştirilerek hafifletilebilir. Bununla birlikte hücresel yapıların tasarımı mekanik özellikleri de önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bölümün amacı, farklı tasarım parametrelerinin (rijit, aşırı rijit ve rijit olmayan durumları temsil eden 3 farklı hücre tipi ve hücre boyutu) kafes numunenin elastik modülü ve maksimumum gerilme değerleri üzerindeki etkilerinin saptanmasıdır. Çalışmada, polimer tabanlı kafes yapıların tasarımı, imalatı ve mekanik özelliklerinin tahmini için kapsamlı bir metodoloji sunulmaktadır. Bu ön çalışmada malzeme püskürtme temelli 3B yazıcı kullanılarak, %54 ila %70 arasında değişen poroziteye ve farklı birim hücre yapılarına sahip sert, yarı saydam ve ışığa duyarlı polimer kafes yapı numuneleri üretilmiştir. Gerinme ve eğilme ağırlıklı mekanik davranışlar elde etmek için özgün tasarlanmış ve bilinen birim hücreler kullanılmıştır. Özel tasarım birim hücre numunelerinin kırılma mekanizmaları ve performansı, sayısal simülasyon ve basma testleri ile belirlenmiştir. Hücresel yapıların elastik modülü hem Gibson-Ashby hem de Hooke denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Birim hücre yapısının ve boyutunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Sonuçlar, gerinme ağırlıklı diyagonal modelin daha iyi mukavemet özellikleri (%250'ye kadar) gösterirken, eğilme ağırlıklı merkezi modelin daha iyi uzamaya (%120'ye kadar) sahip olduğunu göstermektedir. Genel olarak, birim hücre boyutlarının azaltılmasıyla mekanik özelliklerin geliştirildiği görülmektedir. Sonuç olarak, birim hücre unsurlarının yapım optimizasyonu, aynı malzeme kullanılarak sert veya elastik davranış özellikleri sergileyen yapıların elde edilmesine olanak tanıyan özelleştirilmiş kafes yapılar için yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

3.1. Giriş

Eklemeli imalat yöntemleri karmaşık hücresel yapıların başarılı bir şekilde üretilebilmesini mümkün kılmaktadır. Amaca yönelik en etkili yapıları elde etmeyi hedefleyen Eklemeli İmalat için Tasarım (DfAM) yaklaşımı ise bu kafes yapı tasarımlarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. DfAM parça işlevselliğini en üst düzeye çıkarırken maliyeti ve üretim süresini en aza indirmeyi hedeflemektedir. Kafes yapılar gibi hafifletilmiş fonksiyonel yapıların eklemeli imalatı, özelleştirme, bileşen performansında iyileştirmeler ve üretim maliyetlerinde azalmalar gibi yeni fırsatlar sunmaktadır [84]. Eİ yöntemlerinin gelişmiş

üretim yeteneklerine rağmen kafes yapılar tasarlanırken minimum duvar kalınlığı, yüzey kalitesi ve destek yapıları gibi kısıtlamalar da iyi tanımlanmalıdır. Çünkü hücresel yapıların minimum duvar kalınlığı ve malzemesi, kullanılan Eİ yöntemiyle doğrudan ilişkilidir. Meisel ve diğerleri (vd.,) PolyJet Eİ teknolojilerinin minimum üretilebilir unsur boyutu, destek yapı çıkarma esnasında hassas unsurların korunabilme başarısı ve kendini destekleyen maksimum unsur açısı gibi temel üretim kısıtlamalarını araştırmışlardır [121]. Lucklum vd., projeksiyon tabanlı stereolitografinin, 100 μm'ye kadar unsur boyutuna sahip kafes yapılı 3B fotonik materyallerin üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir [122]. McGregor vd., kafes yapıların taranması için bir yöntem geliştirmiş ve üretimde esnasında Eİ kafes yapıların izlenmesi, kalifikasyonu ve kontrolü için bu yöntemi kullanılabilir hale getirmişlerdir [86].

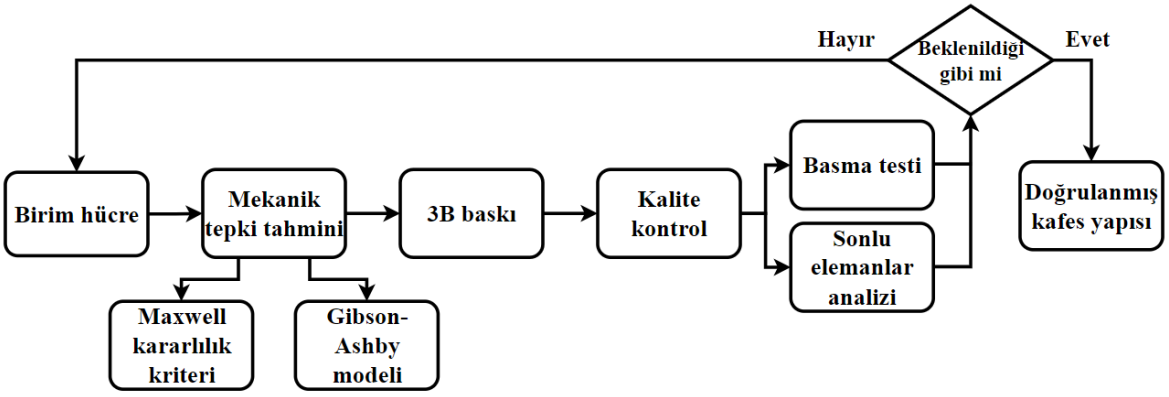
İstenen fonksiyonelliğe katkıda bulunacak özelliklerin bir araya getirildiği hafif ve düşük maliyetli hücresel bir yapı elde etmek için, istenen özellikleri karşılayacak şekilde özel tasarlanmış hücresel yapılar gereklidir. Hafif yapıların etkili bir şekilde üretimi için çeşitli tasarım yaklaşımları geliştirilmiştir [123-125]. Lui vd., PolyJet Eİ teknolojisini kullanarak polimer kafes yapıların üretiminde malzeme sarfiyatını ve baskı süresini geleneksel baskı tekniklerine kıyasla %80'e kadar azaltan bir geçmeli yerleştirme (snap-fit) yöntemi önermişlerdir [124]. Weeger vd., yumuşak kafes yapılarının PolyJet baskısı için dijital bir tasarım ve doğrusal olmayan simülasyon yaklaşımı sunmuşlardır [125]. Brackett vd., birim hücrelerin hacimsel oranlarını ara yoğunluklarıyla eşleştirerek optimize edilmiş kafes yapılar tasarlamış ve üretmişlerdir [92]. Ayrıca, çubuk eleman çapı, boyu ve oryantasyonu gibi tasarım değişkenlerinin hücresel yapıların mekanik özellikleri üzerinde etkisini araştıran çalışmalar da mevcuttur [29,126]. Geliştirilmiş fiziksel ve mekanik özellikler için farklı yoğunluklarda topoloji optimizasyonuna dayalı hücresel yapı tasarımları ele alınabilir [29]. Benzer bir yaklaşımla Liu vd., tarafından hareketli şekil değiştirebilen bileşen/boşluk (MMC/MMV) topoloji optimizasyonu çerçevesinde kademeli kafes yapılar tasarlamak için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir [94]. Ayrıca katı izotropik bir malzemeye dayalı bağıl yoğunluk haritalama yöntemi kullanılarak [95], hücresel yapılar optimize edilebileceği gibi, kübik yapı üzerinde homojenleştirme tabanlı topoloji optimizasyon işlemleri de gerçekleştirilebilir [96]. Benzer bir yaklaşımla, Li vd., giroid yapı üzerinde çalışmalar yapmış ve üretim yönüne bağlı olarak tasarım optimizasyonları gerçekleştirmişlerdir [97].

Hücresel yapı tasarım sürecinde, uygulama alanına bağlı olarak üretim kısıtlamaları, fiziksel ve boyutsal özellikler ve işlevsellik de dikkate alınmalıdır [89]. Vrana vd., optimize edilmiş gözeneklilik ve hücre yapısı tasarımı ile yüksek enerji soğurma özelliklerinin elde edilebileceğini göstermiştir [90]. Mu vd., ışıkla sertleşen reçine bazlı gözenekli polimer yapılar üretmiş ve bunları pil üretimi, enerji sönümleme ve gözenekli ince filmler gibi farklı uygulama alanlarında kullanmıştır [91]. Egan vd., doku mühendisliği için malzeme püskürtme (PolyJet) baskılı yapı iskelelerinin fizibilitesini ve yeteneklerini göstermiştir [127]. Mueller vd., enerji emilimini artırmak için PolyJet baskılı eğilme baskın kafeslere aşamalı olarak derecelendirilmiş çekirdek-kabuk çubuk elemanları ekleyen bir kafes yapısı önermiştir [128].

Son olarak, Eİ teknolojisi ile hücresel yapıların üretimi, imalat teknolojisindeki en önemli gelişmelerden biridir. Topoloji optimizasyonu ve DfAM yaklaşımları ile geliştirilen hücresel yapılar, hafifliği ve iyileştirilmiş performansı ile birçok endüstride yaygın olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Bununla birlikte, bu umut verici çalışma alanını daha da geliştirmek için optimum hücre konfigürasyonları ve iyi tanımlanmış tasarım kılavuzları sağlanmalıdır. Bu bölümde kafes yapı tasarımlarının üretim, boyutsal doğruluk ve mekanik özelliklere etkisinin anlaşılabilmesi için polimer MultiJet teknolojisine dayalı kapsamlı bir ön çalışma ele alınmıştır.

3.2. Metodoloji

Hücresel yapının tasarım ve geliştirme adımları için izlenen metodoloji Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



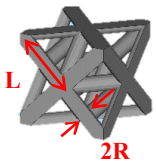
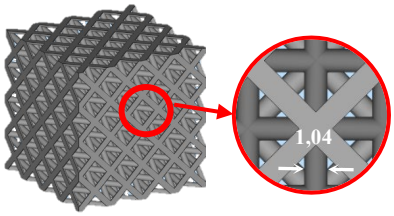
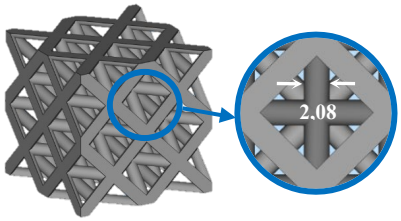
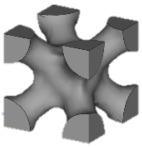
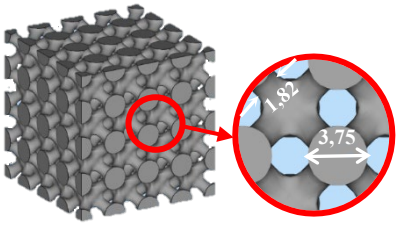
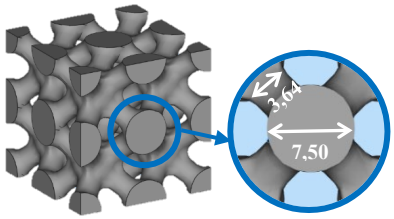
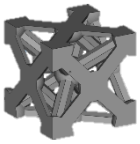
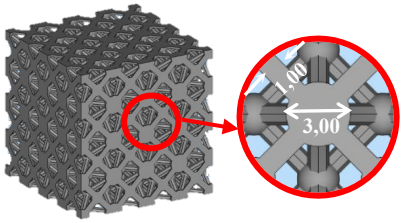
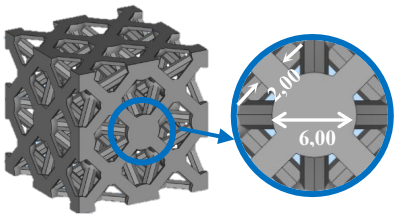
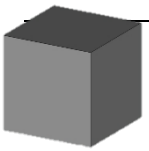
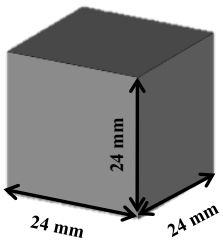
Şekil 3.1. Hücresel yapı tasarım, test ve geliştirme adımları

3.2.1. Hücresel yapı tasarım süreci

Kafes tabanlı yapılar genellikle yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına sahiptir ve özelleştirilmiş işlevsellik gereksinimlerini karşılamak için uyarlanabilir [129]. Örneğin, çubuk elemanları ve düğümlerin düzeni değiştirilerek dayanımı yüksek rijit bir yapı veya darbe emici rijit olmayan bir yapı elde edilebilir. Ayrıca kafes yapılar gelişmiş ısı, ses ve titreşim yalıtım özellikleri de sergileyebilmektedir [10-12].

Bu çalışmada, üç farklı birim hücre tasarımından (oktet, diyagonal ve merkezi) oluşan çubuk tabanlı kafes yapılar kullanılmıştır (Çizelge 3.1). Bu birim hücreler üç farklı rijitlik davranışını temsil etmektedir; (i) yetersiz rijit (eğilme baskın / merkezi model), (ii) yeterli rijit (eğilme baskın / oktet model) ve (iii) aşırı rijit (gerinme baskın / diyagonal modeli). Bu birim hücreler bir araya gelerek basma testi standartlarındaki kafes yapı numunelerini oluşturmuştur. Test numuneleri rijit hücresel plastik basma testi standartlarına [130] göre kübik formda (24 x 24 x 24 mm^3) modellenmiştir. Konformal kafes yapıları daha sonra, herhangi bir renk, malzeme veya diğer ortak model niteliklerini temsil etmeden yalnızca üç boyutlu nesnenin yüzey bilgilerini depolayan STL dosya formatında dışa aktarılmıştır. Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi kafes yapı numuneleri, üç farklı birim hücre (Oktet, Diyagonal, Merkezi) ve iki farklı boyut (6x6x6 mm^3 ve 12x12x12 mm^3) kullanılarak üretilmiştir. Bu konfigürasyonlarda 1 mm'lik minimum unsur boyutu kullanılmıştır. Daha küçük unsur boyutları, destek malzemenin yapıdan çıkarılmasında zorluklara neden olmaktadır. Hücre tipi ve boyutunun mekanik özellikler üzerindeki etkisini anlamak için, aynı hücre tipleri için gözeneklilik (boşluk hacminin toplam hacme oranı), malzeme ve baskı parametreleri gibi dayanımı etkileyen diğer faktörler sabit tutulmuştur. Test küpünün göreceli yoğunluğa ters orantılı olarak değişen boşluk oranı Çizelge 3.1'de verilmiştir. Göreceli yoğunluk, bir maddenin (kafes yapısı) yoğunluğunun referans malzemenin (katı küp) yoğunluğuna oranı olarak tanımlanabilir.

Çizelge 3.1. Gözenekli yapıların BDT modelleri ve yapılara ait kütle, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.

Hücre tipi	Birim hücre boyutu	Kafes modeli	Unsur boyutu (mm)	Ağırlık (gr)	Özgül yoğunluk	Göze-neklilik
	Oktet 6 6x6x6 (mm x mm x mm)		1,04	4,53	0,27	%70
	Oktet 12 12x12x12 (mm x mm x mm)		2,08	4,85	0,29	
	Diyagonal 6 6x6x6		Maks: 3,75 Min: 1,82	7,49	0,45	%54
	Diyagonal 12 12x12x12		Maks: 7,50 Min: 3,64	7,61	0,46	
	Merkezi 6 6x6x6		Maks: 3,00 Min: 1,00	4,90	0,29	%68
	Merkezi 12 12x12x12		Maks: 6,00 Min: 2,00	5,24	0,32	
	Solid			16,62	1	0

3.2.2. Mekanik davranış tahmini

Mekanik tepki tahmininde kullanılan modeller ve eşitlikler Bölüm 2.4.2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Eş. 3.1'de tekrar verilen Maxwell denklemine göre, diyagonal modelde aşırı rijit gerinme baskın davranış beklenirken, merkezi modelde M değeri sıfırdan küçüktür ve eğilme baskın tepkiler öngörülmektedir. Oktet modelde ise M değeri sıfırdır. Bu modelin tam rijit olduğu ve eğilme baskın davranışın gözlemleneceğini tahmin edilmektedir.

$$M = s - 3j + 6 \tag{3.1}$$

Deshpande vd., oktet yapı için Eş. 3.1'deki göreli yoğunluk denklemini Eş. 3.2'deki gibi çubuk elemanına ve yarıçapına bağlı olarak tekrar düzenlemişlerdir [131,132].

$$\rho_{theory} = 6\sqrt{2}\pi(R/L)^2 \tag{3.2}$$

Burada R çubuk elaman çapıdır ve L çubuk elaman uzunluğudur (Çizelge 3.1'de vurgulanmıştır). Eş. 3.2'de hesaplanan teorik özgül yoğunluğun Çizelge 3.1'de verilen değerden yaklaşık %12 saptığı bulunmuştur. Bu fark, bu yaklaşımda kenardaki çubuk elamanlarının tam dairesel kesitte kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Pratikte ise birim hücrelerin sorunsuz bir şekilde birleştirilmesi için yarım daire şeklindedirler.

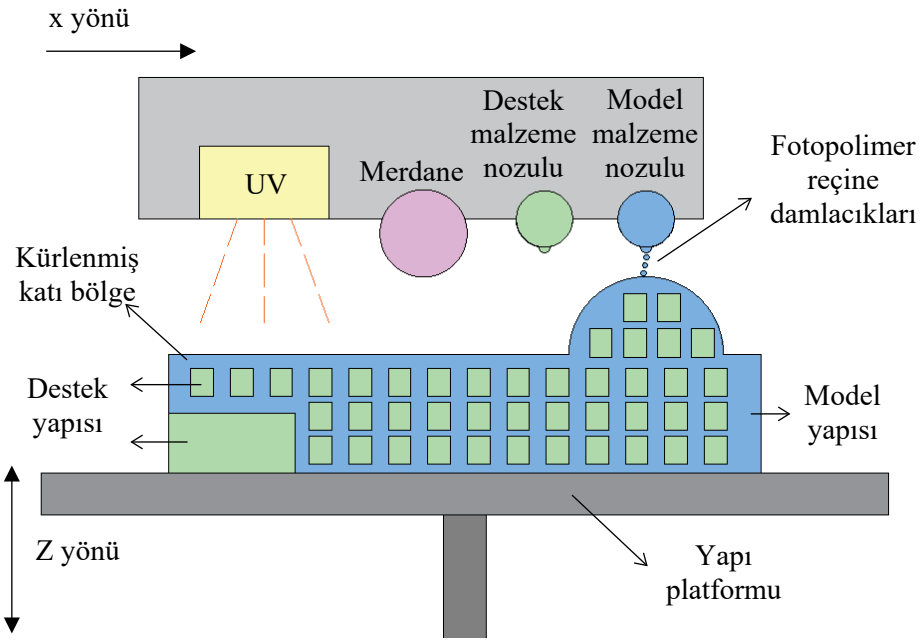
3.2.3. Hücresel yapıların PolyJet 3B baskısı

Bu bölümde, Çizelge 3.1'de verilen hücresel yapıları üretmek için yüksek baskı çözünürlüğüne sahip Eİ teknolojilerinden biri olan PolyJet (MultiJet 3B baskı olarak da bilinir) 3B baskı tekniği kullanılmıştır. PolyJet 3B baskı teknolojisinde, voksel veya 3B piksel olarak ifade edilen modeller, ultraviyole (UV) ışığıyla (Şekil 3.2'de tekrar verilmiştir) sertleştirilen fotopolimer reçine kullanılarak üretilmektedir. Kafes yapıları üretiminde ticari bir PolyJet makinesi olan Stratasys Objet30 Prime, sarf malzeme olarak ise RGD720 (yarı saydam amber akrilik bazlı fotopolimer reçine) kullanılmıştır. Üretimde katman kalınlığı 16 µm olarak belirlenmiştir. 3B baskı makinesinin tedarikçisinden temin edilen fotopolimer reçine malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir [132].

Çizelge 3.2. Ürün veri sayfasından alınan RGD 720'nin mekanik özellikleri [132]

Özellik	Standart	Birim	Değer
Çekme dayanımı	ASTM D-638-03	MPa	50-65
Kırılma uzaması	D-638-05	%	15-25
Elastisite modülü	D-638-04	MPa	2000-3000
Eğilme dayanımı	D-790-03	MPa	80-110
Bozulma sıcaklığı	D-648-06	°C	45-50

PolyJet 3D yazıcı, bir mürekkep püskürtmeli yazıcı gibi çalışır. Baskı kafası, UV ışığına maruz kaldığında katılaşan fotopolimer damlacıkları püskürtür. Katmanlar, yazıcı kafası x ekseni boyunca hareket ederken bir sıra boyunca düzenlenmiş mikron düzeyinde püskürtme nozullarının eşzamanlı çalışmasıyla oluşturulur.

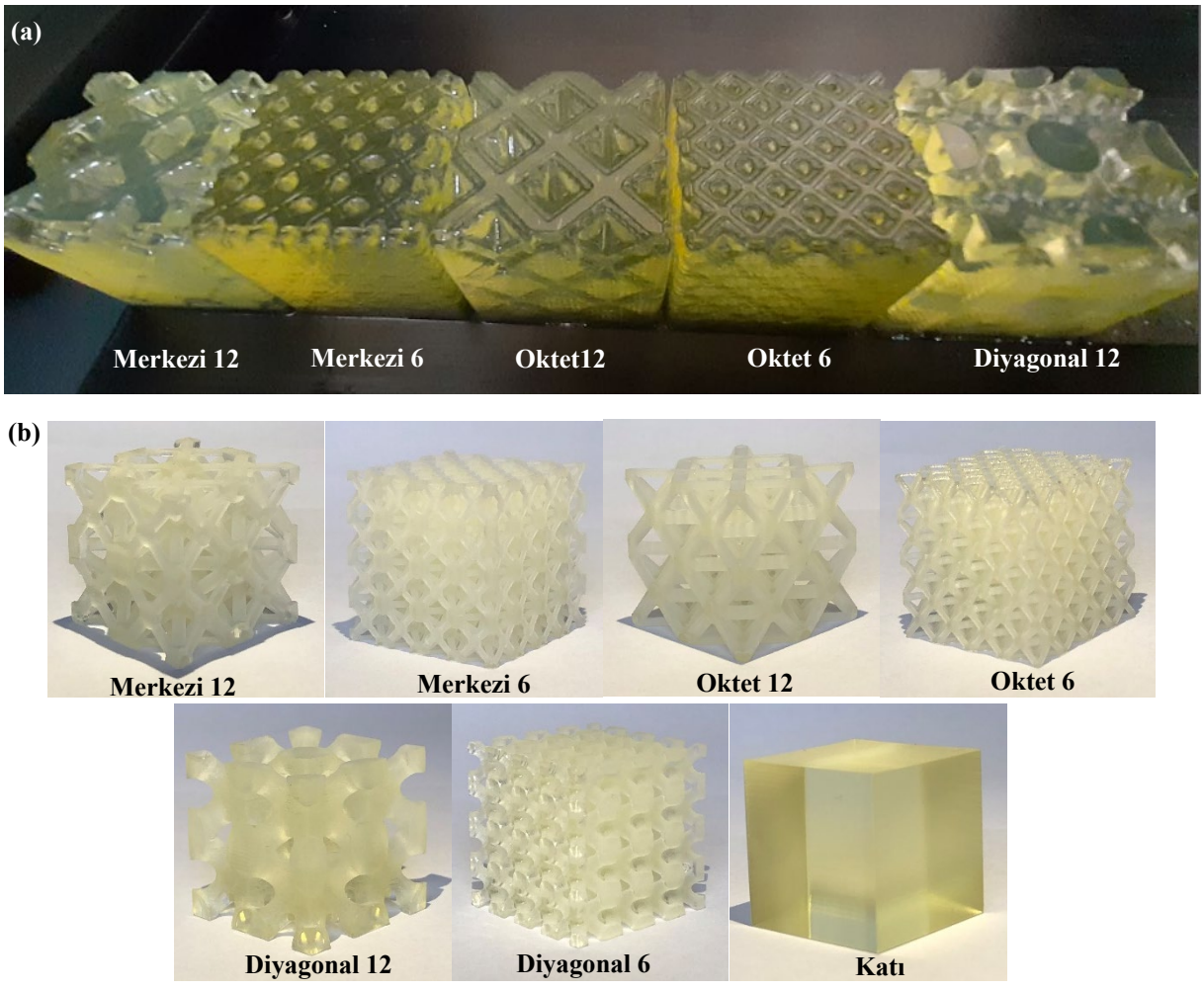


Şekil 3.2. PolyJet teknolojisi süreç şeması [51]

Çıkıntılı unsurların üretilebilmesi için kimyasal olarak çözünebilir jel benzeri fotopolimer bazlı SUP 706 hidrofobik destek yapıları kullanılmıştır (Şekil 3.2'de tekrar gösterildiği gibi). Baskı işleminden sonra mekanik özelliklere katkı sağlamayan destek yapıları, NaOH bazlı solüsyon içeren 35°C sıcaklıktaki çalkalama tankında altı saat daldırmak suretiyle kimyasal olarak çözünmüştür. Resim 3.1, basıldığı gibi ve desteğin çıkarılmasının ardından elde edilen numuneleri göstermektedir. Hassas ve gözenekli yapılarda dar alanlara sıkışan destek yapısının çıkarılması oldukça zordur. Bu nedenle mikro gözenekli parçalar için destek

yapısının tamamen çıkarılmasının imkansız hale geldiği yazdırılabilir minimum hücre boyutunu belirlenmelidir.

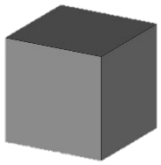
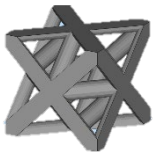
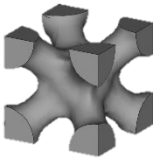
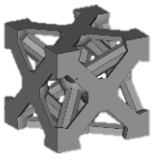
PolyJet teknolojisinde destek malzemesi ayrıca yapının yüzey kalitesini ve görünümünü de etkilemektedir. Destek malzemesi ile kaplanmış yüzeylerde mat bir yüzey elde edilirken, desteksiz yüzeyler parlak bir yüzeye ve dolayısıyla daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptir [133]. Pürüzlük muhtemelen kafes yapılarının nihai mekanik özelliklerine ihmal edilir düzeyde etkilemektedir. Ayrıca, destek malzemesi (bu durumda SUP 706) çıkarılmamış yapısal parçaların mekanik özellikleri, desteksiz olana göre bazı farklılıklar gösterebilir. Fakat destek yapısı jel benzeri bir malzeme olduğundan yüksek yük taşıma kabiliyetine sahip değildir ve yapının mekanik özelliklerine etkisi ihmal edilebilir. Ancak yapıya eklenen ağırlık özellikle kafes yapılarında istenmeyen bir durumdur. Bu tez çalışmasında hedefleri korumak için her iki etki ihmal edilmiştir.



Resim 3.1. 3B baskılı kafes yapı modelleri (a) üretildiği gibi, (b) destek yapısı çıkarma işlemi sonrası

Eklemeli imalat yönteminde poroziteler, tarama açıları ve özellikle yapı yönelimlerine bağlı olarak mekanik anizotropi görülmektedir [134]. PolyJet ve stereolitografi gibi kimyasal reaksiyona dayalı teknolojiler, yapı yönelimlerine bağlı olarak bir miktar mekanik anizotropi gösterse de bu etki malzeme ekstrüzyonu ve toz yataklı teknolojilere kıyasla oldukça azdır [135]. Mevcut çalışmada, test edilen kafes yapı tasarımlarının doğru kıyaslanabilmesi için tüm kafes yapıları aynı yönelimde üretilmiştir.

Çizelge 3.3. Hücresel yapıların (24 x 24 x 24 mm^3) üretim istatistikleri

Hücresel yapı	Birim hücre boyutu (mm x mm x mm)	Kullanılan model malzeme (gr)	Kullanılan destek malzeme (gr)	Üretim süresi (sa : dk)	Maliyet (yaklaşık $)
Katı 	-	25	4	04:57	14
Oktet 	6x6x6	13	20	05:03	10,7
	12x12x12	13	18	05:03	10,3
Diyagonal 	6x6x6	16	16	04:58	11,5
	12x12x12	16	15	04:58	11,3
Merkezi 	6x6x6	13	20	05:03	10,7
	12x12x12	13	18	04:58	10,3

Üretim süresi, parça ağırlığı, kullanılan malzeme miktarı ve yaklaşık maliyet gibi Eİ için hücresel yapı tasarımı kapsamında ele alınan üretim istatistikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Katı modele kıyasla malzeme kullanımı diyagonal model için %36, oktet ve merkezi model için %48 oranında azaltılmıştır. Öte yandan, destek malzemesi kullanımı diyagonal için

yaklaşık 4 kat, diğerleri için 5 kat artırılmıştır. Yazıcıda kullanılan birim destek malzemesi maliyeti, model malzemesi maliyetinin üçte biridir. Böylece, katı yapı benzer hacimli hücresel yapıyla yeniden tasarlandığında baskı süresinde bariz bir değişiklik olmazken, genel üretim maliyetinde yaklaşık %25 kazanç elde edilmektedir.

3.2.4. Basma testi

Hücresel yapıların elastik modül, akma dayanımı ve uzama gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesinde basma testi kullanılmıştır. Testler, 50 kN sıkıştırma kapasiteli Instron 3369 üniversal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katı hücresel plastik basma testi standartları [130] doğrultusunda kübik numunenin (24 x 24 x 24 mm^3) üst yüzeyinden basma kuvveti uygulanmıştır. Her kafes yapısı için beş farklı numune test edilmiştir. Basma hızı 3 mm/sn olarak ayarlanmıştır. Yapı tamamen yoğunlaşana veya kırılana kadar basma testi devam etmiştir. Test numunelerinde meydana gelen hasarları tespit etmek için sıkıştırma testi sırasında video kaydı alınmıştır.

3.2.5. Nümerik model

Farklı birim hücrelere sahip standart test numunelerinin basma testi, ANSYS sonlu elemanlar analiz yazılımının statik yapısal modülü kullanılarak simüle edilmiştir. Kafes yapıları, tetrahedron ağ (İng. mesh) elemanları ve ağdan bağımsız analiz sağlayan yama uyumlama yöntemi (İng. patch conforming) ile örüntülenmiştir. Burada ağ boyutu, önceki ağ boyutuna kıyasla sonuçlarda %5 değişiklik elde edilene kadar rafine edilmektedir. Elastik bölgenin ötesindeki gerinimleri (plastik deformasyon) saptamak için malzemenin doğrusal olmama durumunu içeren tam ölçekli elasto-plastik analiz kullanılmıştır. Bu, ANSYS'ta, Newton-Rapson Yöntemi'ne dayalı düzeltmelerle lineer yaklaşımların yinelemeli bir serisi kullanılarak gerçekleştirilir (Eş. 3.3). Kuvvet yakınsamasını sağlamak için, 30 alt adımlı artımlı bir yük artışı kullanılmış ve Eş. 3.3 kuvvet dengesizliği kalıntısı (denklemin sağ tarafı) kabul edilebilir derecede küçük olana kadar tekrar tekrar çözülmüştür.

$$[K^T]\{\Delta u\} = \{F\} - \{F^{nr}\} \tag{3.3}$$

Burada K^T rijitlik matrisi, Δu yer değiştirme matrisidir ve $\{F\} - \{F^{nr}\}$ kuvvet dengesizliği matrisidir.

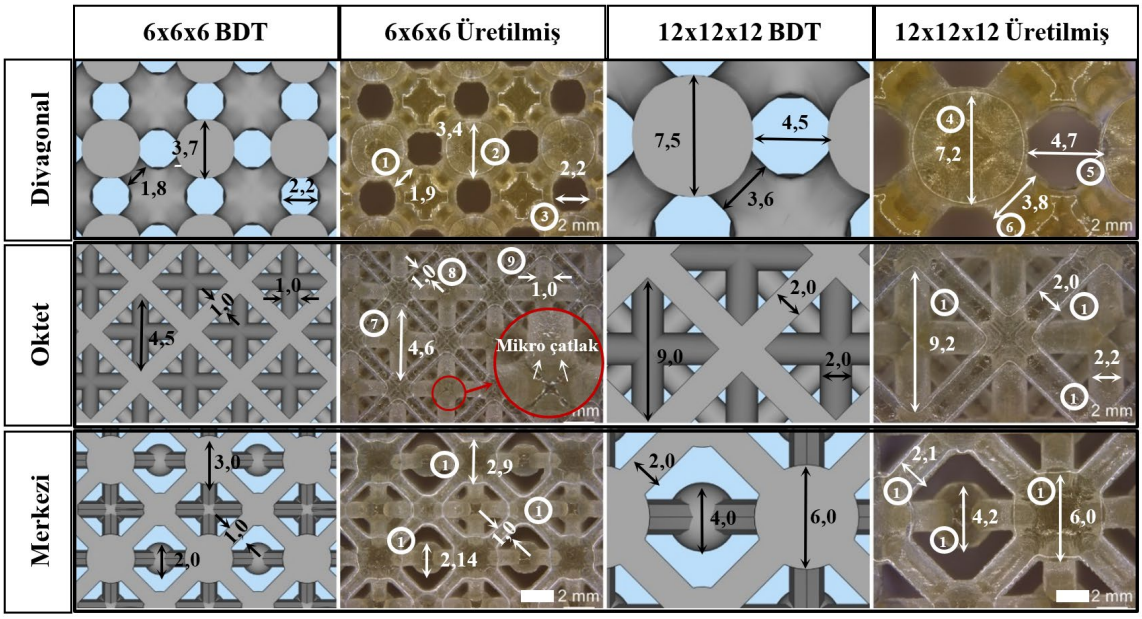
Akma sonrası davranış, ilk akma noktasının ötesinde artan gerilme ve gerinim ile birlikte malzemede ortaya çıkan gerinim sertleşmesi tepkisi ile karakterize edilmiştir. Ayrıca, analizde çift doğrusal gerilme-gerinim eğrisi varsayılmıştır. Bu nedenle, Çizelge 3.2'de verilen lineer elastik malzeme özelliklerinin (elastik modül ve Poisson oranı) yanı sıra, çift doğrusal izotropik malzeme plastisite özellikleri akma mukavemeti 15 MPa ve teğet modülü 70 MPa olacak şekilde belirlenmiştir [136,137].

3.3. Bulgular ve Tartışma

3.3.1. Boyutsal doğruluk

Parçanın geometrik doğruluğu, kullanılan Eİ teknolojisinin baskı çözünürlüğüne ve katman kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan PolyJet Eİ teknolojisi, x ve y ekseni için 16 µm katman kalınlığı ve 600 x 600 dpi baskı çözünürlüğü sunmaktadır. Yazıcının katalog verilerine göre 100 mm'nin altındaki özelliklerde STL boyutlarına göre ± 100 µm boyutsal sapma (tolerans) görülmektedir. Daha büyük unsurlar için doğruluk, unsur uzunluğunun ±%0,06'sı olarak verilmektedir [138]. Üretilen hücresel yapılar Leica DMC2900 mikroskop kamerası ile incelenmiş ve tasarım özelliklerinin boyutsal farklılıkları nasıl etkilediğini anlamak için Şekil 3.3'teki görüntüler üzerinde ölçümler yapılmıştır. Beş farklı konumdan alınan boyutsal doğruluktaki boyutsal sapmalar Çizelge 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.3 ve Çizelge 3.4'te ölçülen sapmalar katalog veri kılavuzuna uygundur. En yüksek sapmanın tam dairesel düğümleri ve en büyük çubuk elemanlarını içeren diyagonal modelde meydana geldiği görülmektedir. Tüm modellerde, hücre boyutu (ayrıca unsur boyutu) arttıkça çubuk elemanlarının boyutsal sapma miktarı artmaktadır. Bu eğilimin aksine, dairesel düğüm geometrilerinde çap küçüldükçe boyutsal sapmanın arttığı gözlemlenmiştir. Boyutsal sapmalar, baskı teknolojisinin ve 3B yazıcının sınırlamalarından kaynaklanmaktadır. Belirli çaptaki nozullar işlem sırasında lineer bir yol izlediğinden kusursuz dairesellik sağlanamamaktadır. Ayrıca, merkezi modeldeki düğümlerin daireselliği diyagonal modele göre daha düşüktür. Merkezi model düğümleri yatay eksende çubuk elemanlarına bağlı olduğundan birleşim noktalarında aşırı malzeme birikmesi daireselliğin bozulmasına neden olmuş olabilir. Aynı şekilde dairesel nozullar kullanılarak püskürtülen malzemeler nedeniyle oktet ve merkezi yapıda görüldüğü gibi keskin köşeler üretilememektedir. Çubuk eleman geometrisinin parça doğruluğu üzerindeki etkisinin gözlemlenebilmesi için merkezi modelde altıgen çubuk elemanları kullanılmıştır. Dairesel

çubuk elemanları keskin köşeli altıgen elemanlara göre daha hassas üretilmiştir (Çizelge 3.4). Ayrıca eğimli çubuk elemanları dik olanlara göre %10 daha fazla boyutsal sapmaya sahiptir. Bu, baskı yönünün parça doğruluğunu üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Oktet hücresel yapı yakından incelendiğinde (Şekil 3.3), dört çubuk elemanının birleştiği merkezi düğüm sınırlarında belirgin bir ayrılma görülmektedir. Bu, mikro çatlaklar yapının dayanımını olumsuz yönde etkileyecektir.



Şekil 3.3. Eklemeli imal edilen kafes yapı modellerinin unsur boyutlarının BDT verileri ile kıyaslanması

Çizelge 3.4. Eklemeli imal edilen kafes yapı modellerinin kritik unsurlarındaki boyutsal sapma miktarı

Diyagonal	6x6x6 mm			12x12x12 mm		
	Çubuk (1)	Düğüm (2)	Delik (3)	Çubuk (6)	Düğüm (4)	Delik (5)
BDT	1,82	3,75	2,25	3,64	7,50	4,50
Üretilmiş (ort.)	1,94	3,46	2,23	3,89	7,26	4,75
Sapma (%)	6,59	-7,73	-0,89	6,87	-3,20	5,56

Merkezi	6x6x6 mm			12x12x12 mm		
	Düğüm (13)	Düğüm-2 (14)	Çubuk (15)	Düğüm (18)	Düğüm-2 (17)	Çubuk (16)
BDT	3,00	2,00	1,00	6,00	4,00	2,00
Üretilmiş (ort.)	2,91	2,14	1,02	6,01	4,26	2,13
Sapma (%)	-3,00	7,00	2,00	0,17	6,50	6,50

Çizelge 3.4. (devam) Eklemeli imal edilen kafes yapı modellerinin kritik unsurlarındaki boyutsal sapma miktarı

Oktet	6x6x6 mm			12x12x12 mm		
	Boşluk (7)	Çubuk (8)	Çubuk-2 (9)	Boşluk (10)	Çubuk (11)	Çubuk-2 (12)
BDT	4,54	1,04	1,04	9,07	2,08	2,08
Üretilmiş (ort.)	4,63	1,00	1,09	9,26	2,02	2,23
Sapma (%)	1,98	-3,85	4,81	2,09	-2,88	7,21

*Yazdırılan özelliklerin daha küçük olduğu sapmalar negatif olarak ifade edilmiştir.

3.3.2. Nümerik model

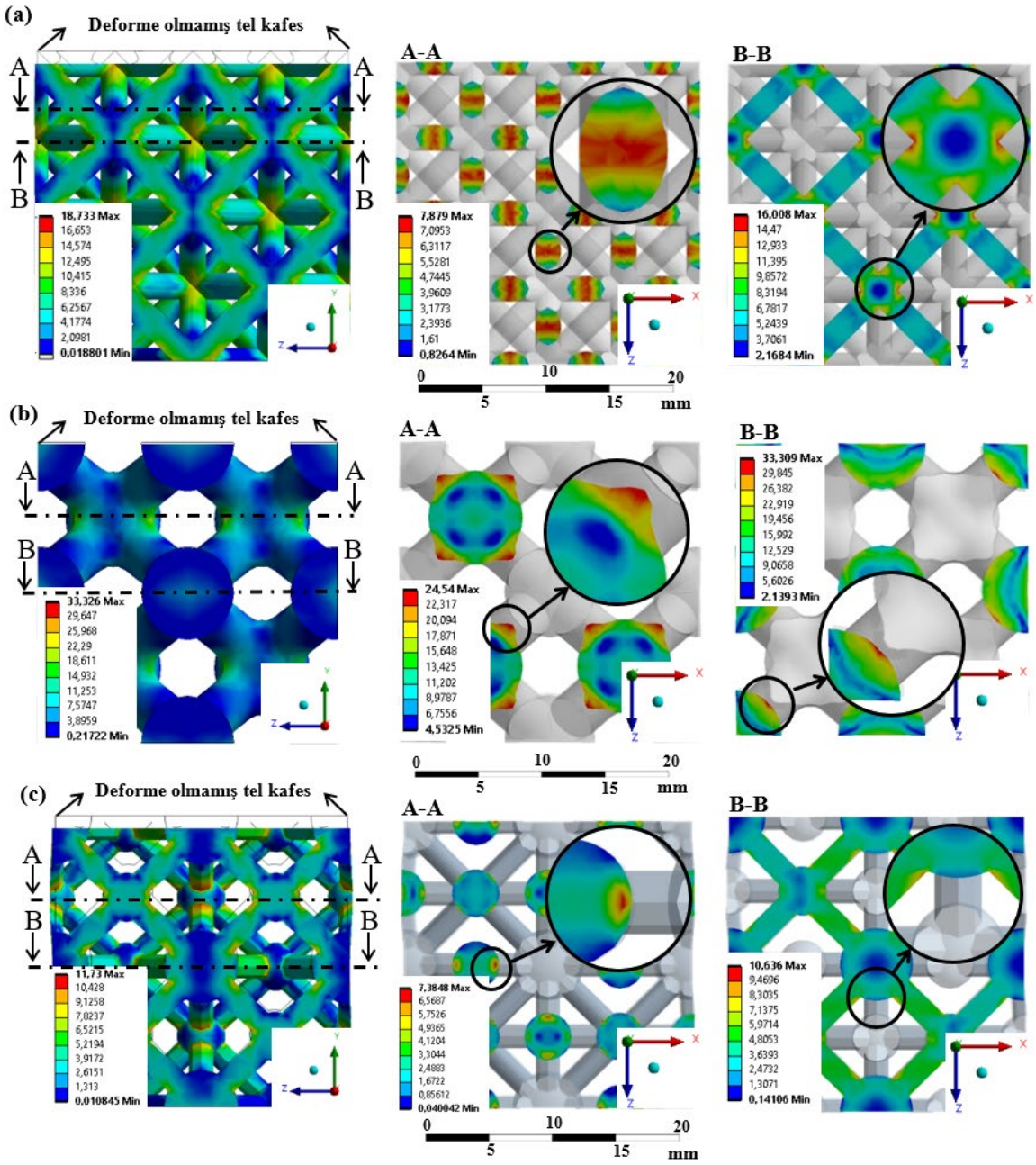
Hücresel yapıların sonlu elemanlar analizi ile elde edilen eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aynı deformasyon senaryosu için en yüksek gerilme 33,32 MPa ile diyagonal yapıda meydana gelirken, en düşük gerilme 11,73 MPa ile merkezi yapıda görülmektedir. Bu nedenle, diyagonal modelin düşük uzanım ve yüksek dayanıma sahip olması beklenirken, merkezi modelin düşük dayanıma rağmen yüksek uzanım özelliği göstermesi beklenmektedir. Bu, merkezi modelin enerji absorpsiyonu gibi sünek özellikler gerektiren uygulamalar için daha uygun olduğunu göstermektedir. Yüksek dayanımın gereksinimlerini karşılamak içinse diyagonal model tercih edilebilir. Maksimum gerilmeler genel olarak düğüm noktaları ve çubuk elemanlarının birleşme noktasında görülmektedir. Bu gerilme yığılmaları, ilgili bölgelere kavis yapısı gibi gerilme dağıtıcı unsurlar eklenerek azaltılabilir.

Hücre boyutuyla birlikte kayma gerilmesindeki değişim Çizelge 3.5'te verilmektedir. Oktet ve Diyagonal modeller için, daha büyük birim hücrelerde kayma gerilmesinde kayda değer bir artış gözlenmektedir. Öte yandan, en küçük kayma gerilmesi değerlerinin oluştuğu merkezi model için fark edilebilir bir değişiklik görünmemektedir.

Çizelge 3.5. Hücresel yapıların maksimum kayma gerilmeleri

Hücre yapısı	Oktet		Diyagonal		Merkezi	
Hücre boyutu	6x6x6	12x12x12	6x6x6	12x12x12	6x6x6	12x12x12
Maks. kayma gerilmesi (MPa)	9,75	10,39	16,47	18,01	6,78	6,64

Sonlu elemanlar analizinde küp hacimli kafes numuneleri kullanıldığı için Çizelge 3.6'daki deformasyonlar aynı zamanda Poisson oranını da vermektedir. Tüm kafes yapılarında, birim hücre boyutunun artması Poisson oranını da artırmaktadır. Merkezi modelin yanal eksen deformasyonu diğerlerinden farklı olarak x ve z yönünde farklılık göstermektedir. Bu durum çubuk elemanların dağılımının bir sonucudur. Fonksiyonel olarak derecelendirilebilen bu tür hücresel yapılar özelleştirilmiş mekanik özelliklerin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılabilir.



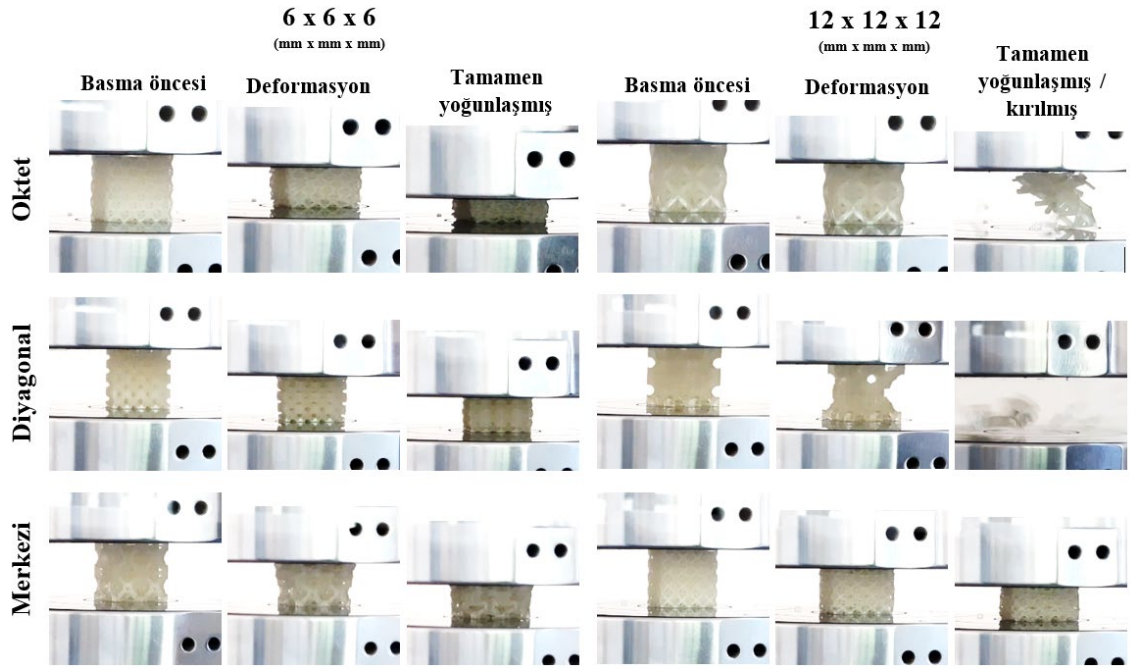
Şekil 3.4. -y yönünde uygulanan 1 mm deformasyon sonucu elde edilen eşdeğer gerilmeler (MPa) (a) oktet 12, (b) diyagonal 12 ve (c) merkezi 12

Çizelge 3.6. -y yönünde uygulanan 1 mm deformasyon sonucu diğer eksenlerdeki toplam deformasyon

Kafes yapısı	Hücre boyu (mm x mm x mm)	x yönündeki deformasyon (mm)	z yönündeki deformasyon (mm)
Oktet	6x6x6	0,179	0,180
	12x12x12	0,195	0,195
Diyagonal	6x6x6	0,205	0,212
	12x12x12	0,282	0,285
Merkezi	6x6x6	0,358	0,212
	12x12x12	0,442	0,245

3.3.3. Basma testi

Resim 3.2'de test numunelerinin basma testi öncesi, sırası ve sonrası görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü üzere, 6 mm birim hücre boyutuna sahip yapılar herhangi bir kırılma olmadan belirli bir seviyeye kadar tamamen yoğunlaşmıştır. Öte yandan, merkezi model dışında birim hücre boyutu 12 mm olan modeller kritik bir yük eşiğinden sonra patlamışlardır. Bu, diyagonal ve oktet modellerin kırılgan davranış sergilediğini ve bunun daha büyük birim hücreler için daha belirgin olduğunu gösteren simülasyon sonuçlarını doğrulamaktadır.



Resim 3.2. Basma testi sırasında farklı hücresel numunelerin deformasyonları

Kırılma mekanizmalarını daha iyi anlamak için basma testi sonrası modeller optik mikroskop altında incelenmiştir (Resim 3.3). Kafes yapılarının basma testinde üç farklı deformasyon aşaması görülebilir: Doğrusal elastik deformasyon, plastik deformasyon ve yoğunlaşma. Kafes yapı, basma sırasında akma, burkulma ve kırılma olmak üzere üç farklı deformasyon mekanizmasına maruz kalır. Polimer çubuk eleman, lineer elastikiyet ile mükemmel plastisite arasında lineer olmayan herhangi bir geçiş bölgesi dikkate alınmadan basitleştirilirse, narinlik oranı (İng. slenderness ratio) yüksek uzun ve ince çubuk elemanları elastik burkulmaya, narinlik oranı düşük kısa ve kalın çubuk elemanları ise akma gerilmesine maruz kalacaktır. Narinlik oranı, çubuk eleman uzunluğunun en küçük dönme yarıçapına oranıdır ve Eş. 3.4 kullanılarak hesaplanır.

$$s = \frac{L_e}{r_{min}} \tag{3.4}$$

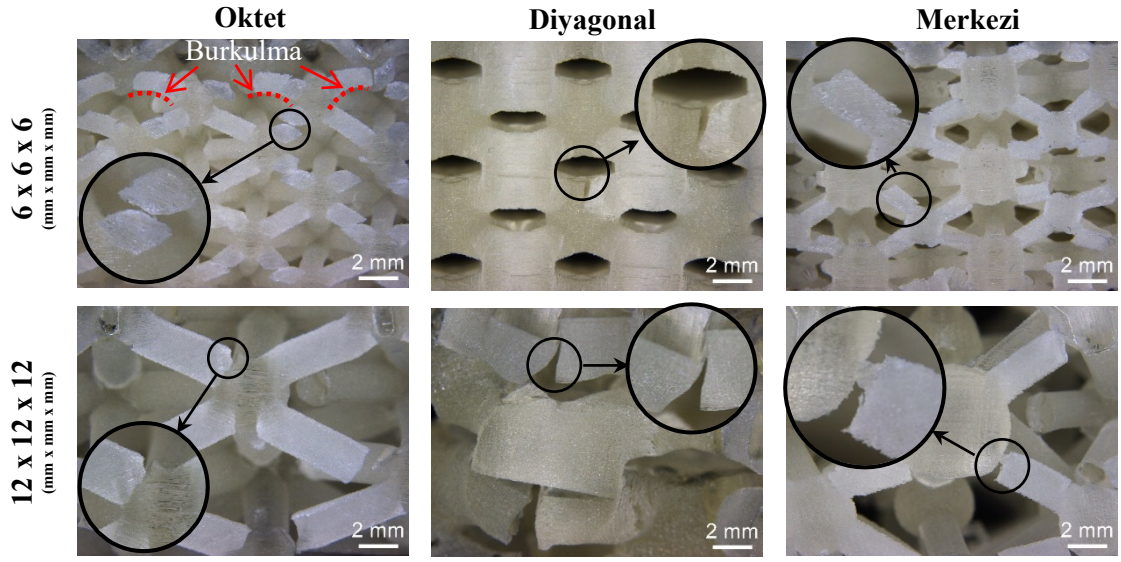
Burada minimum dönme yarıçapı, minimum atalet momenti ve çubuk elemanın alanı cinsinden ifade edilirse (Eş. 3.5)

$$r_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \tag{3.5}$$

Burkulma eğiliminin çubuk elemanlarının narinliği arttıkça arttığı bilinmektedir [139]. Ayrıca, Liu vd., bağıl yoğunluğun düşük olduğu modellerde elastik burkulmanın daha baskın olduğunu belirtmişlerdir [124]. Çubuk elemanların plastik akmadan önce elastik burkulma ile deforme olduğu kritik gerilmeyi belirlemek için Euler burkulma gerilme denklemi (Eş. 3.6) kullanılabilir [139]. Euler hiperbolü, narinlik oranının bir fonksiyonu olarak tepe burkulma gerilmesini vermektedir.

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 E}{s^2} \tag{3.6}$$

Üç farklı kafes tasarımı için hesaplanan narinlik oranı, bağıl yoğunluklar ve Euler burkulma kritik gerilmeleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.



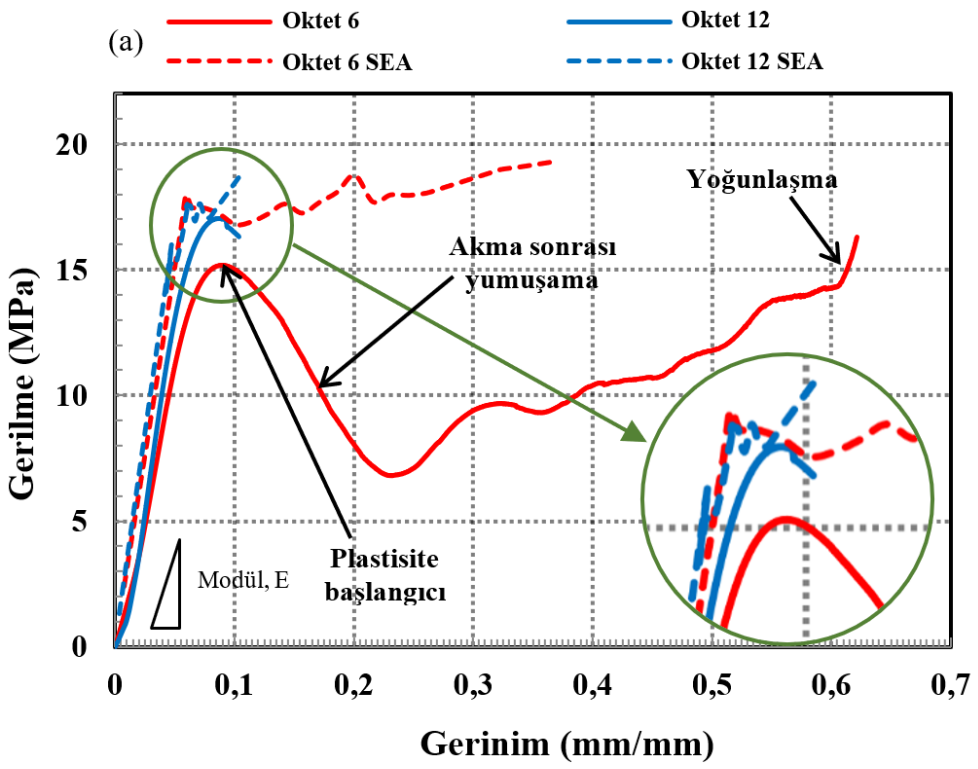
Resim 3.3. Basma testi sonrası hücresel numunelerdeki kırılma ve çatlak oluşumları

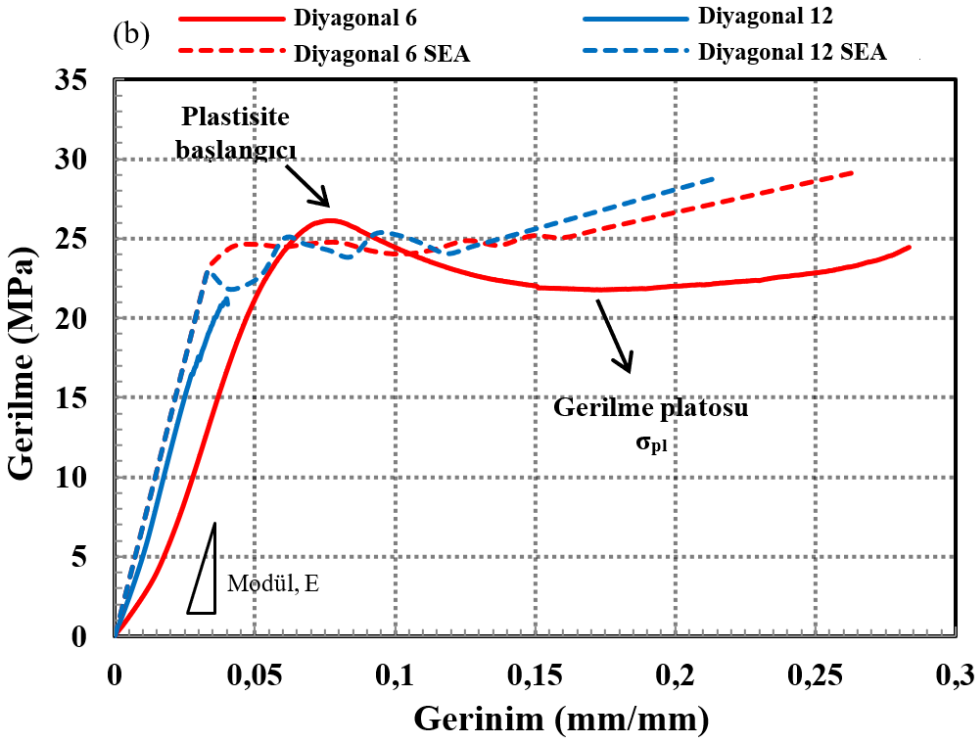
Çizelge 3.7. Oktet, diyagonal ve merkezi kafes tasarımları için hesaplanan narinlik oranları ve bağıl yoğunluklar

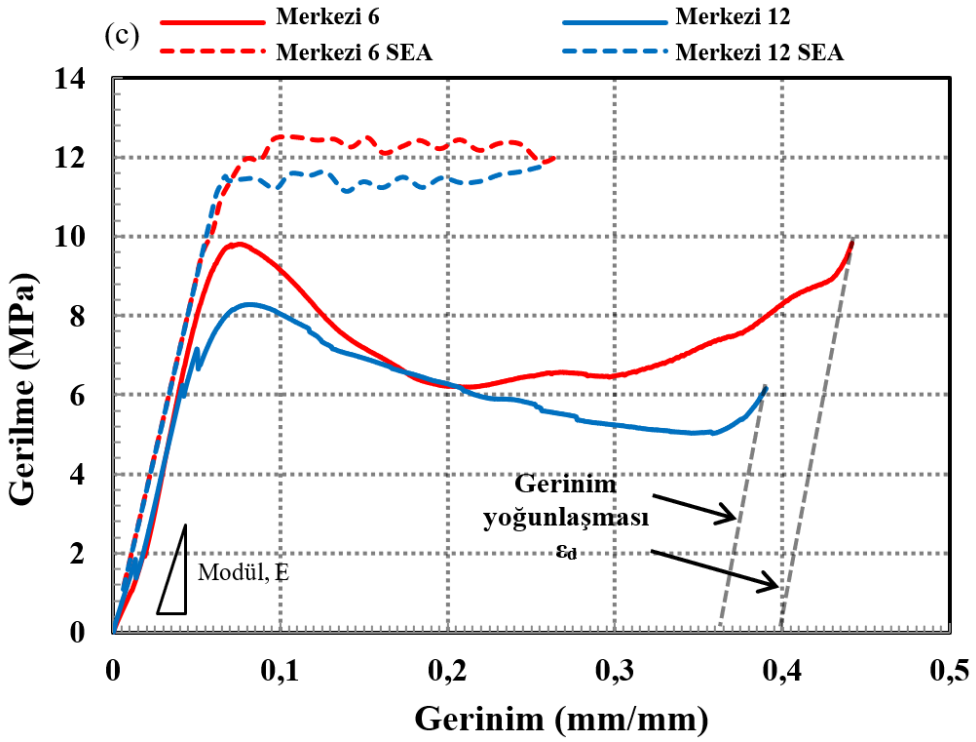
Hücre tipi	Narinlik oranı	Bağıl yoğunluk	Euler burkulma kritik gerilmeleri (MPa)
Oktet	12,8	0,28	10,23
Diyagonal	4	0,45	246
Merkezi	7,68	0,3	20,12

Çizelge 3.7'de gösterildiği gibi, en yüksek narinlik oranı (12,8) ve en düşük bağıl yoğunluğa (0,28) sahip olan oktet çubuk elmanı burkulma kaynaklı deformasyonlara karşı daha yatkındır. Bu fenomen Resim 3.3'te verilen kırılmış numune görüntülerinde gözlemlenebilir. Diğer iki tasarıma kıyasla daha kalın çubuk elemanlara sahip olan diyagonal tasarım daha düşük narinlik oranına ve daha yüksek bağıl yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle diyagonal model burkulma kaynaklı deformasyona karşı yüksek direnç göstermektedir. Son olarak, kısa çubuk elemanları nedeniyle merkezi tasarımın narinlik oranı oktet modele nazaran daha düşüktür ve bu burkulma kaynaklı hasarlar için kritik eşiğin artması anlamına gelmektedir. Resim 3.3'te görüldüğü gibi diyagonal modelde burkulma etkisinden ziyade akma gerilmesine bağlı hasarlar tespit edilmiştir. Ayrıca diyagonal modelde kafes düğümleri boyunca kayma/kesme gerilmeleri etkileri ve buna bağlı çatlaklar görülmektedir. Merkezi ve oktet modeller için çatlaklar genellikle çubuk elemanlarında görülmektedir. Bu durum, oktet model için akma dayanımının altında, merkezi model için

akma dayanımının biraz üzerinde ve diyagonal model için akma dayanımının oldukça üzerinde hesaplanan Euler burkulma gerilme değerleri (Çizelge 3.7) ile uyumludur.

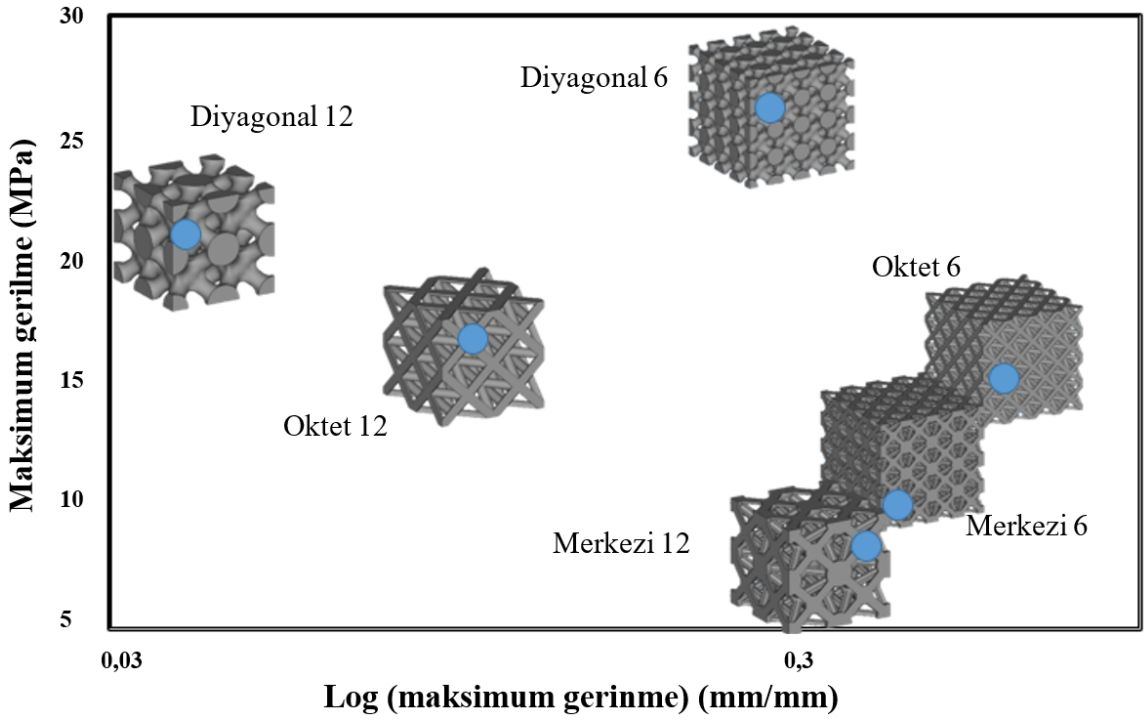






Şekil 3.5. Eklemeli olarak üretilmiş hücresel yapıların basma testi ile elde edilen gerilme - gerinim diyagramı (a) oktet, (b) diyagonal, (c) merkezi

Şekil 3.5, basma testi ve sonlu elemanlar analizinde (SEA) elde edilen gerilme-gerinim eğrilerini göstermektedir. Basma testi sonuçları SEA sonuçları ile karşılaştırıldığında benzer eğrilerin elde edildiği görülmektedir. Sonuçlar SEA yönteminin kafes yapıların mekanik davranışını tahmin etmede güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ancak sonlu elemanlar yönteminde çentikler ve boyutsal sapmalar gibi üretim kusurlarını dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle birim hücre yapısına ve boyutuna bağlı olarak bir miktar daha yüksek gerilme ve gerinim değerleri elde edilebilir.



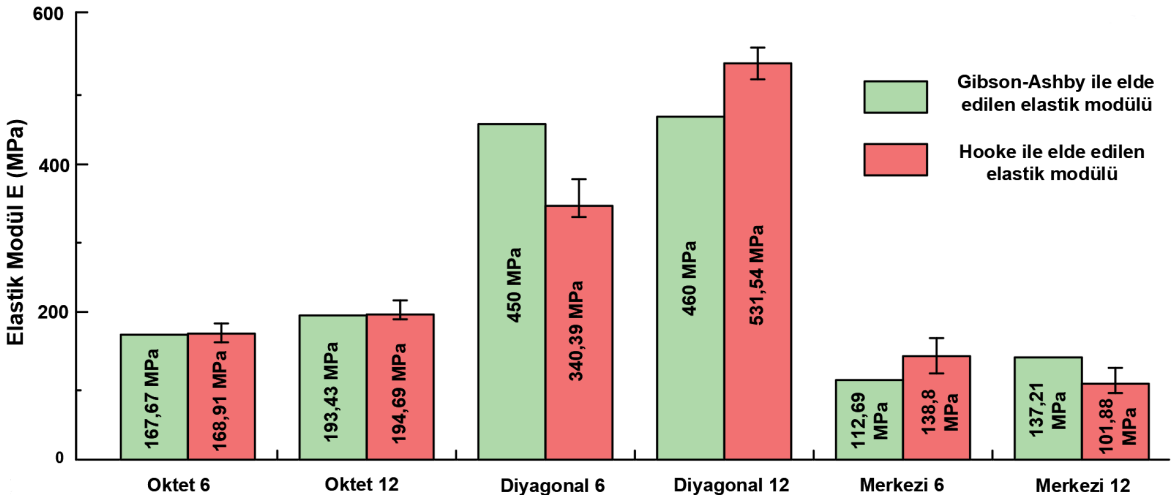
Şekil 3.6. Farklı rijitlik özelliklerine ve birim hücre boyutlarına sahip kafes yapıların maksimum gerilme gerinim haritası

Aşırı rijit (diyagonal – gerinme baskın), rijit (oktet - gerinme baskın) ve rijit olmayan (merkezi – eğilme baskın) durumlarını temsil eden üç tip kafes tasarımı için maksimum gerilme / maksimum gerinim haritası Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü üzere, diyagonal 6 modeli 26,11 MPa ile en yüksek dayanıma sahipken, en düşük dayanım 8,27 MPa ile merkezi 12 yapı modelinde elde edilmiştir. Yine en yüksek gerinim (yani, 0,62 mm/mm) oktet 6 modelinde, en düşük gerinim (yani, 0,04 mm/mm) ise diyagonal 12 modelinde görülmektedir. Böylece, diyagonal birim hücre modeli kullanılarak üretilen parçalar düşük süneklik ve tokluk özelliklerine sahip olmalarına rağmen en yüksek mukavemete sahip olacaktır. Ayrıca, hücre boyutunun maksimum gerilme üzerindeki etkisi diyagonal modelde daha belirgindir. Özellikle merkezi birim hücreli yapılar ise sünekliğin ön plana çıktığı enerji sönümleme uygulamaları için uygundur.

Sonuç olarak, basma testi sonuçları, hücre yapısının ve boyutunun mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Böylece özelleştirilmiş birim hücreler ile çeşitli yükleme koşullarına uygun ayarlanabilir mekanik özelliklere sahip kafes yapıları elde edilebilir. Bu eşsiz kafes yapılarının mekanik özellikleri ayrıca sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak da hızlı ve kolay bir şekilde belirlenebilir.

3.3.4. Elastik modülün hesaplanması ve karşılaştırılması

Elastik modül, kuvvet altındaki malzemenin elastik deformasyonunun miktarı olarak tanımlanabilir. Hücresel yapıların elastik modülü ve buna bağlı olarak rijitlik ve mukavemetleri hücre tipine bağlı olarak değişmektedir. Kafes yapılarının elastik modülleri, Hooke yasası (Eş. 3.7) ve Gibson-Ashby denklemi (Eş. 3.8) kullanılarak hesaplanmış ve ardından Şekil 3.7'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7. Farklı kafes yapılar için Gibson-Ashby ve Hooke elastik modül sonuçları

Hooke elastik modülü, kafes numunelerinin doğrusal elastik bölgesindeki yük ve deformasyon eğrilerinden elde edilmiştir (Eş. 3.7). Belirgin bir akma noktası bulanmayan polimer malzemelerde bu nokta gerilme-gerinim eğrisinin lineer bölgesinin %2 kaydırılmasıyla belirlenmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{{}^{F}/_{A}}{{}^{\Delta l}/_{l_0}} \tag{3.7}$$

Burada F kuvvet (N), A kuvvetin uygulandığı yüzey alanıdır (mm^2), Δl (mm) numunedeki toplam deformasyon ve l_0 (mm) deforme olmamış numune uzunluğudur.

Gibson-Ashby ölçekleme yasasına göre kafes yapıların elastik modülü ise katı yapı mekanik özelliklerinin ve kafes yapı bağıl yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir (Eş. 3.8). Bu teoride, gözenekli yapıların mekanik özellikleri mekanik tepki tiplerine (eğilme veya gerinme baskın) göre farklılık göstermektedir.

$$E_{kafes} = cE_{katı}\left(\frac{\rho_{hücre}}{\rho_{katı}}\right)^{n} \quad (3.8)$$

E_{kafes} ve $E_{katı}$ sırasıyla kafes yapının ve dökme malzemenin elastik modülü, $\rho_{hücre} / \rho_{katı}$ kafes yapısının bağıl yoğunluğu, *n* birim hücre mekanik tepki tipine (eğilme veya gerinme baskın) bağlı katsayı [140] ve *c* birim hücre malzemesine bağlı katsayıdır.

Bağıl yoğunlukların belirlenmesinde kullanılan kafes yapı hacimleri, yapının BDT verilerinden elde edilmiştir. PolyJet tekniği ile üretilen modelin boyutları ile BDT verileri arasında önemli bir sapma olmadığı için bu adil bir yaklaşım olarak kabul edilmiştir (Çizelge 3.4).

Gibson-Ashby ölçekleme yasası, hücre yapısı ve malzemeye bağlı korelasyon katsayılarının doğru bir şekilde belirlenmesinin ardından kafes yapıların mekanik özelliklerinin pratik tahmininde kullanılabilir. Bu doğrultuda Eş. 3.8'deki '*c*' ve '*n*' sabitlerini belirlemek için doğrusal olmayan bir regresyon yöntemi kullanılmıştır. Eş. 3.8'de yer alan bağıl elastik modül ($E_{kafes} / E_{katı}$) ve bağıl yoğunluk ($\rho_{hücre} / \rho_{katı}$) ifadeleri sırasıyla *y* ve *x* değişkenleri ile yeniden düzenlendiğinde denklem bir güç fonksiyonu halini almaktadır (Eş. 3.9).

$$y = cx^{n} \quad (3.9)$$

Eş. 3.9'daki *c* ve *n* değerleri daha sonra Gauss-Newton yineleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Oktet kafes yapı için en iyi uyum değerleri n = 2 ve c = 1,15, diyagonal yapı için n = 1 ve c = 0,5 ve merkezi yapı için n = 2 ve c = 0,67 olarak elde edilmiştir.

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi her iki yöntemle elde edilen esneklik modülleri oktet model için oldukça yakındır. Diyagonal modelde, Gibson-Ashby yaklaşımından farklı olarak, Hooke denklemi kullanılarak elde edilen elastik modül, hücre boyutuyla önemli ölçüde değişmektedir. Bu, Gibson-Ashby modelinin, yalnızca çubuk elemanların yüksek narinliğe sahip olması durumunda mekanik özellikleri tahmin etmede yüksek doğruluk sağladığı bulgusunu doğrulamaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi, diyagonal model analiz edilen tüm kafes yapıları arasında en düşük narinliğe sahiptir (Çizelge 3.7).

Diyagonal 12 hücresinin elastik modülü, merkezi 12 hücresinden yaklaşık olarak beş kat daha büyüktür. Yüksek elastik modülü, malzemenin kalıcı (plastik) deformasyon olmadan

daha yüksek kuvvete dayanabileceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, gerinme baskın diyagonal hücre, elastik uzama oranı diğerlerinden daha düşük olmasına karşın, daha yüksek gerilmelere dayanabilir. Bu nedenle, süneklik ve enerji emiliminin önemli olduğu uygulamalarda merkezi veya oktet yapıların seçilmesi uygundur, yüksek mukavemet-ağırlık oranının gerekli olduğu uygulamalarda ise diyagonal yapılar kullanılabilir.

3.4. Sonuç

Bu ön çalışma, kafes yapıların çok çeşitli polimer tabanlı uygulamalarda kullanımı için kapsamlı bir eklemeli imalat için tasarım kaynağı ve yol haritası sağlamaktadır. Ayrıca erken tasarım aşamasında polimer bazlı hücresel yapıların mekanik davranışını tahmin etmek için bir metodoloji sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında, üç farklı hücresel tasarımdan oluşan basma testi örnekleri, farklı tasarım parametrelerinin elastiklik modülü ve dayanıma etkilerinin belirlenmesi amacıyla Polyjet Eİ teknolojisi kullanılarak 3 boyutlu üretilmiştir. Hücresel tasarımlar, üç farklı mekanik davranışı temsil edecek şekilde seçilmiştir. Hücrelere bağlı mekanik davranışlar aşırı rijit (diyagonal – gerinme baskın), rijit (oktet - gerinme baskın) ve rijit olmayan (merkezi – eğilme baskın) olarak belirlenmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanan sonuçlar, hücre yapısının ve boyutunun mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini ve farklı tip ve boyutlardaki hücrelerin veya bunların kombinasyonlarının çeşitli uygulamalar ve yükleme koşulları için kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmadan şu sonuçlar çıkarılmıştır;

Birim hücre boyutları küçültülerek:

1. Gerinmenin hakim olduğu rijit kafes yapılarda, maksimum gerilme, gerinim ve süneklik değerleri arttırılmıştır.
2. Eğilme baskın rijit kafes yapılarında maksimum gerilme dayanımından bir miktar taviz verilerek süneklikte artış elde edilmiştir.
3. Eğilmenin baskın olduğu rijit olmayan kafes yapıları için hem maksimum gerilmede hem de gerinimde hafif bir artış elde edilmiştir.

Üretim maliyeti ve parça ağırlığının azaltılması:

1. Eklemeli imal edilen hücresel yapıların üretim maliyeti katı modele göre %30 oranında azaltılmıştır.
2. Eklemeli imal edilen hücresel yapıların ağırlığı katı modele göre %72 oranında azaltılmıştır.

Boyutsal doğruluk:

1. Eklemeli imal edilen kafes yapılarının boyutsal doğruluğu, hücre tipine ve özellikle unsur boyutuna bağlı olarak %0,1 ile %8 arasında değişmektedir.
2. Genel kanı olarak, birim hücrelerdeki düğüm boyutunun büyümesi ve çubuk eleman boyutunun küçülmesi boyutsal doğruluğu artırmaktadır.
3. Dairesel çubuk elemanların doğruluğu, altıgen elemanlardan daha fazladır.
4. Açılı çubuk elemanların dik olanlara nazaran %10'a kadar daha fazla sapma gösterdiği tespit edilmiştir.

4. KAFES YAPI ÇUBUK ELEMANLARI TASARIM VE SLM İMALAT PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yüksek performans-kütle oranlarına ve özelleştirilebilir mekanik özelliklere sahip hafif hücresel yapıların üretiminde, gelişmiş üretim kabiliyetine sahip Seçici Lazer Eritme (SLM) eklemeli imalat yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Hücresel yapıları SLM yoluyla başarılı bir şekilde imal etmek için, işlem parametrelerinin doğru belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Makine veya toz tedarikçileri tarafından tavsiye edilen proses parametreleri, büyük hacimli parçaların imalatı için genellikle yeterli olsa da, kafes yapılarda iki düğümü birbirine bağlayan çubuk elemanlar gibi ince unsurların üretiminde bu parametreler yetersiz kalmaktadır. Sınırlı bir hacimde yoğun ve sürekli termal enerjiye maruz kalan çubuk elemanlarda, istenilen geometri, mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için SLM işlem parametrelerinin optimize edilmesi gereklidir. Bu bölümde, SLM işlem parametreleri (lazer gücü, tarama hızı), çubuk eleman açıları (45°, 75°, 90°) ve çaplarının (Ø 0,2 – 1,5 mm) boyutsal doğruluk, mikroyapısal morfoloji ve mekanik performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, lazer enerji yoğunluğunun, çubuk elamanın porozitesini, eriyik havuz boyutunu ve mikrosertliğini belirlemede önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bulgular, benzer enerji yoğunluğu seviyelerine rağmen yüksek lazer gücünün daha derin füzyon etkileriyle sonuçlandığını göstermektedir. Genel olarak, baskı yüzeyine dik olarak yönlendirilen çubuk elemanlar daha az gözeneklilik ve düzgün eriyik havuzu dağılımı sergilemektedir. Ayrıca çubuk eleman geometrisi boyunca yapılan mikrosertlik ölçümleri, çubuk elemanın orta kısımlarının en kararlı mikrosertlik özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar hücresel yapıların tasarımı ve güvenilirliği konusunda umut verici çıkarımlar sunmaktadır.

4.1. Giriş

Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi ürün tasarımının geleneksel kurallarını değiştirme potansiyeline sahiptir. Eİ kullanarak, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor ve maliyetli olan karmaşık parçalar hızlı ve etkin bir şekilde üretilebilir [46,141]. Bu nedenle, Eİ yöntemleri, otomotiv, havacılık, motor sporları, enerji ve tıp gibi çeşitli sektörlerde üstün işlevsellikte ürünler geliştirmeye yönelik yenilikçi bir yaklaşım olarak kullanılabilir [142]. Ayrıca, geleneksel tekniklere göre daha fazla tasarım esnekliği sunarak, özelleştirilmiş ve karmaşık geometrilerin üretimini mümkün kılar. Eklemeli imalatın benzersiz potansiyeli kullanarak,

gelişmiş mekanik enerji absorpsiyonu ve önemli bir dayanım-ağırlık oranına sahip periyodik kafes yapıları oluşturmak hem teknik hem de ekonomik açıdan mümkün hale gelmiştir. Bu tür kafes yapılarda etkin unsurlar kullanılarak parçanın ağırlığı en aza indirilirken genel performansı önemli ölçüde arttırılabilir [143]. Kafes yapıların eklemeli imalatı umut verici potansiyeline rağmen, nispeten yeni olan bu yapıların yeteneklerinden tam anlamıyla yararlanmak için daha fazla araştırma ve geliştirme gereklidir. Bununla birlikte, Eİ kullanarak karmaşık kafes yapı sistemleri üretilirken, optimal geometrik doğruluk ve üstün mekanik özelliklere sahip hassas yapılar elde etmek için işlem parametreleri iyi tanımlanmalıdır [51].

Seçici lazer eritme (SLM), yüksek enerjili bir lazer kullanarak ince metal tozların eritildiği, katmanlı bir lazer toz yatak füzyonu (LPBF) teknolojisidir [144]. Bu teknoloji, alüminyum ve titanyum alaşımları, paslanmaz çelik, inconel gibi çeşitli metal parçalar üretilebildiğinden çok sayıda ileri endüstri için uygun bir seçenek haline gelmiştir [145]. AlSi10Mg, SLM yöntemiyle kafes yapılarının üretiminde en dikkat çekici malzemelerden biridir. Al-Si alaşımları, mükemmel akıcılık, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek termal iletkenlik ve olağanüstü dökülebilirlikleri nedeniyle SLM işlemi için son derece uygundur. SLM prosesinde hızlı soğuma hızı (10^6-10^8 K/s), ince hücresel taneli mikroyapının elde edilmesini sağlamaktadır. Çünkü, artan soğutma hızı, alüminyum fazındaki silisyumun çözünürlüğünde önemli bir artışa yol açarak, tane sınırlarında lifli ötektik Al/Si ile birlikte ince hücresel-dendritik yapı sergileyen doygun alüminyum katı çözeltisi oluşturur [146]. Alüminyum sıvısındaki silisyum çözücü konsantrasyonu, soğuma hızı ve difüzyon hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu hızlar ise lazer gücü ve tarama hızı gibi işlem parametreleriyle belirlenebilir. İnce hücresel mikro yapı, SLM ile üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerinde kayda değer bir gelişme sağlamaktadır [147]. Mikroyapı inceldikçe, mikrosertlik artar. Bu nedenle, SLM ile üretilmiş AlSi10Mg numunenin sertliği (~127 HV), yüksek basınçlı dökümle üretilen aynı numune sertliğinden (~100 HV) daha yüksektir [148]. Sonuç olarak, ince mikroyapı ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip bileşenler elde etmek için en uygun işlem parametreleri kullanılmalıdır [149].

SLM süreci, nihai parçaların boyutsal doğruluğu, mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkisi olan birçok işlem parametresi tarafından yönetilir. Bu bağlamda, yüksek yoğunluklu ve yüksek geometrik doğruluğa sahip mukavim parçaların elde edilmesinde lazer gücü, tarama hızı ve tarama stratejisi parametrelerinin yanı sıra tarama

aralığı (İng. hatch distance), örtüşme (İng. overlapping), ışın ötelemesi (İng. beam offset) gibi lazer parametreleri de kirik öneme sahiptir [79,150]. SLM işlem parametrelerinin etkilerini inceleyen daha önceki çalışmalar, genellikle büyük hacimli bileşenlere odaklanmıştır [148,151,152].

Elde edilen bulgular, kusurların yalnızca bileşenlerin dış yüzeyinde (örneğin yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk) değil, aynı zamanda malzemenin iç kısmında da (gözeneklilik, erimemiş alanlar ve uygun olmayan malzeme yapısı gibi sorunlarla) kendini gösterdiğini belirtmiştir. Bununla birlikte, ince unsurlu kafes yapılarda da bu tür hataların varlığına rastlanabilir, fakat SLM üretim sürecindeki etkileri farklılık göstermektedir [144]. Sınırlı hacimleri yoğun ve uzun süreli termal enerjiye maruz kalan kafes unsurlarının yönelimine bağlı olarak ısı akışı ve yayılması değişmektedir. Bu farklılık, ince elementlerin gözeneklilik, mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye neden olmaktadır. Son zamanlarda, SLM işlem parametrelerinin ve yapı oryantasyonunun mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır [146, 148, 153, 154]. Delroisse ve diğerleri (vd.,) μCT'nin yardımıyla değişken iç gözenekliliği belirlemek amacıyla eğimli çubuk elemanlarını farklı segmentlere ayırmışlardır. Bulgular, eğilimli çubuk elemanın üst bölgesinin %0,1 gözenekliliğe sahip olduğunu, alt bölgenin ise %4 gözeneklilik sergilediğini göstermiştir [62]. Hadadzadeh vd., 12 mm çaplı AlSi10Mg çubuk numunelerde baskı oryantasyonunun yüksek gerinim hızlı dinamik yükleme davranışını araştırmıştır. Deneysel sonuçlar, parçanın dayanım ve modülünün hücre yapıları, tane boyutları ve dislokasyon yoğunluklarına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir [155]. Benzer şekilde, Hitzler vd., SLM kullanarak üretilen AlSi10Mg parçaların yönsel bağımlılıklarını ele aldı. Sonuçlar, farklı yapı yönlendirmelerine bağlı olarak gerilme mukavemetinde %27 ve elastik modülde %17'e kadar artış olabileceğini gösterdi. Ayrıca çubuk eleman oryantasyonun ince numunelerin mikroyapısına etkilerini de incelemişlerdir [153]. Ayrıca, Thijs vd., SLM işlem parametrelerinin mikroyapının kontrolünde kritik bir rol oynadığını göstermiştir [148]. Li ve ark., işlem parametrelerinin hem parça yoğunluğu hem de parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemiştir [154]. Wei vd., SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı örneklerin yoğunluk seviyesi ve mekanik özellikleri üzerinde lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı gibi çeşitli işlem parametrelerinin etkisini kapsamlı bir şekilde incelemiştir [146]. Mevcut çalışmalar, SLM işlem parametrelerinin ve yapı oryantasyonunun parça kalitesi üzerindeki etkilerini

araştırmış olsa da, küçük çubuk eleman çaplarına sahip kafes yapılarda işlem optimizasyonunu kapsamlı ve sistemli bir şekilde inceleyen yeterli çalışma yapılmamıştır.

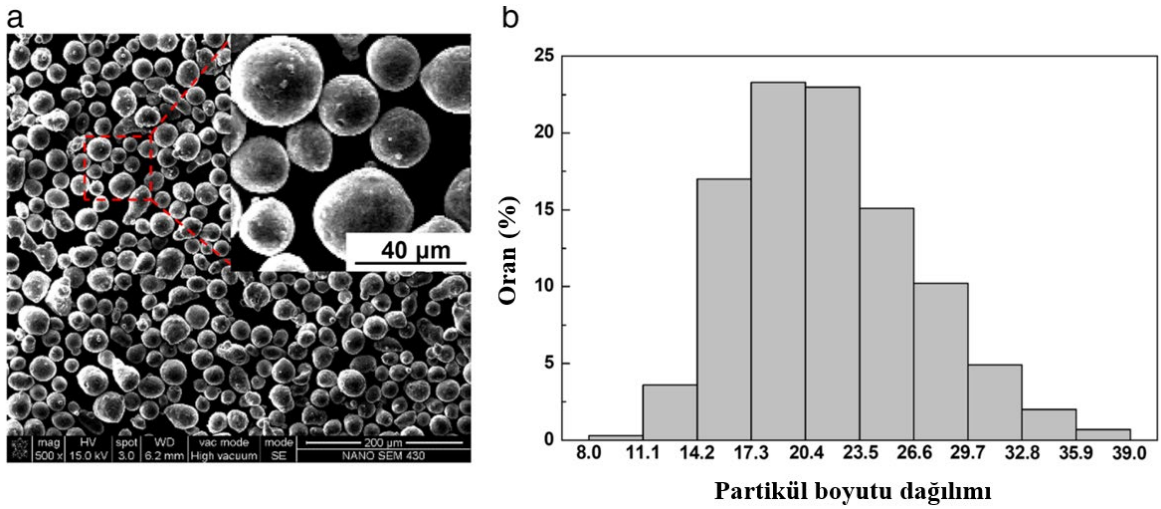
Çalışmalarda SLM işlem parametrelerinin kafes yapı geometrisi üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Qiu ve ekibi, 0,3 mm çapındaki kafes yapıları inceleyerek, SLM işlem parametrelerinin bu yapıların geometrisi üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Tarama hızı (7 m/s) sabit tutularak, lazer gücü (150-400 W aralığında) artırıldığında çubuk eleman çapının büyüdüğü görülmüştür. Benzer şekilde, 400 W sabit lazer gücü korunarak, tarama hızı (1000-7000 mm/s aralığında) artırıldığında ise çubuk eleman çapı küçülmüştür [156]. Vrana vd., SLM işlem parametrelerinin iç gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğü gibi kafes yapı hataları üzerindeki etkisini belirlemiştir. Sonuçlar, gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğünün toplam emilen enerjiye bağlı olduğunu göstermiştir. Baskı parametrelerini ve kontur tarama stratejilerini optimize ederek, AlSi10Mg parçaların %99,83'lük yüksek yoğunlukta üretilebilirliği kanıtlanmıştır. Çubuk eleman yönelimlerinden bağımsız olarak, çubuk eleman çapları da kafes yapıların gözeneklilik ve mekanik özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, çalışma yalnızca 2 mm çubuk eleman çapı için yapılmış olup, sonuçlar diğer çubuk eleman boyutlar için farklılık gösterebilmektedir [157]. Dong ve ark., mekanik özellikler ve gözeneklilik üzerindeki çap boyut etkisini değerlendirmek için 1 ila 5 mm arasında değişen çaplara sahip çubuk şeklindeki çekme numunelerini oluşturmuştur. Çalışmada, 4 mm'nin altındaki boyutlar için mekanik özelliklerin ve gözenekliliğin kararsız hale geldiği, gözeneklilikte bir artış ve mekanik özelliklerde bir azalma olduğunu belirlenmiştir [158]. Buchbinder vd., SLM ile üretilen AlSi10Mg parçaların yoğunluğunun işlem parametrelerinden önemli ölçüde etkilendiği gösterilmiştir. Çalışmada yüksek yoğunluklu SLM parçaları elde etmek için, SLM sürecinde yüksek lazer gücü ve tarama hızı kullanılmalı ve tarama aralığının azaltılması gerektiği vurgulanmıştır [159]. Brandl ve vd., SLM AlSi10Mg numunelerin mekanik özellikleri ve kırılma davranışlarının, esas olarak gözenekliliğe bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir. Farklı işlem parametrelerinin parçanın gözenek boyutu ve şekline etkileri de irdelenmiştir [160]. Sonuç olarak, geleneksel SLM işlem parametrelerinin, kafes yapı üretiminde yetersiz kaldığı görüldüğünden, bu yapıların üretiminde lazer tarama stratejileri ve işlem parametreleri optimize edilmelidir [161]. Bununla birlikte, mikro çubuk eleman boyutunun mikroyapı ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkisi yeterince incelenmemiş olup, halen belirsizdir.

SLM teknolojisi ile üretilen kafes yapıların performansını değerlendirmeye yönelik ilk denemelere rağmen, özelleştirilmiş hücre yapılarının üretimi hala önemli bir mühendislik zorluğu olmaya devam etmektedir. Ancak, baskı parametrelerini hassas biçimde belirlenerek, geleneksel tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmesi zor ya da imkânsız olan üstün dayanım/ağırlık oranı ve boyutsal özelliklere sahip kafes yapıları hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde üretilebilir. Literatürde çubuk eleman boyutu, yapısal yönelim ve işlem parametrelerinin etkisinin mikroyapı, geometrik kusurlar ve mekanik özellikler üzerindeki karmaşık ilişkileri ayrıntılı bir şekilde ortaya konulmamıştır. Bu çalışmada, SLM ile üretilen çubuk eleman yapı potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemek için tasarım, üretim, kalite kontrol, karakterizasyon ve mekanik test süreçleri yürütülmüştür. Bu süreçler, eklemeli imal edilen kafes yapılarının yüzey morfolojilerini, mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. İşlem parametrelerinin ve yapı oryantasyonlarının SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların yoğunluğu ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Mikroyapı, geometrik özellikler, mikroyapısal özellikler, eriyik havuz morfolojisi ve mekanik özellikler; optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve mikrosertlik testleri kullanılarak sistematik olarak analiz edilmiştir.

4.2. Malzeme ve Metot

4.2.1. Malzeme

Gaz atomizasyonu ile üretilen 20-63 μm boyut dağılımına ve yüksek akışkanlığa sahip küresel şekilli AlSi10Mg tozları, SLM yöntemiyle çubuk elemanların üretimi için kullanılmıştır. Tozların SEM görüntüleri ve boyut dağılımları Resim 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1 ise AlSi10Mg'nin nominal kimyasal bileşimini detaylandırmaktadır. Resimde görüldüğü üzere, metal alaşım toz, akışkanlığı engelleyerek topaklaşmaya neden olabilecek çok sayıda küçük parçacık barındırmaktadır. Öte yandan, küçük parçacıklar, toplam yüzey alanını önemli ölçüde arttırarak yüksek lazer enerji emilim kapasitesi sağlamaktadır [162]. Deney numunelerinin üretiminde ağırlıkça yaklaşık %70 oranında yeni ve ağırlıkça yaklaşık %30 oranında önceki baskı işleminden kalan artık toz karışımı kullanılmıştır. Tozlar mekanik titreşim cihazı (QM powder, GE) ve bir dizi elek kullanılarak elenmiştir.



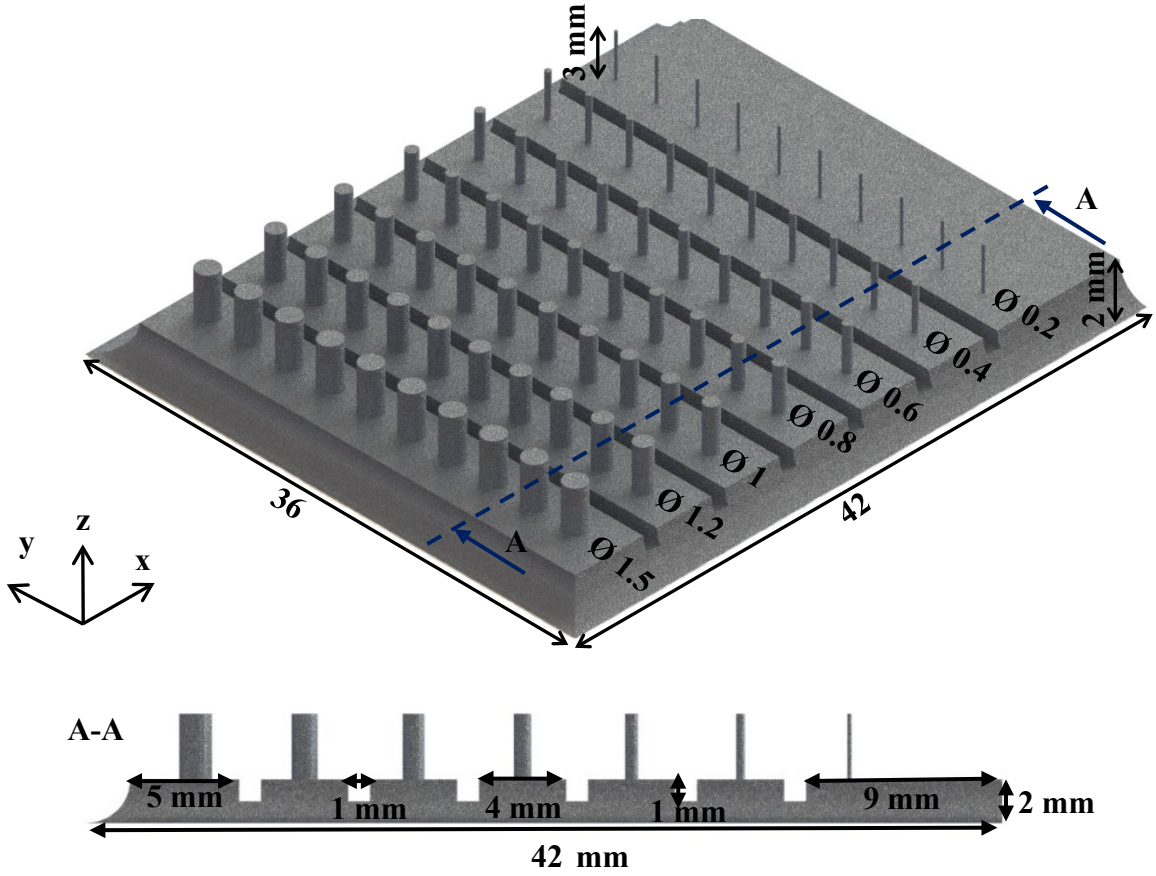
Resim 4.1. AlSi10Mg tozuna ait (a) SEM görüntüsü ve (b) toz boyutu dağılımı [163]

Çizelge 4.1. AlSi10Mg alaşıma ait kimyasal bileşim (% olarak kütle oranı) [164]

Element	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Diğer
Konsantrasyon (% ağırlıkça)	Denge	9-11	0,20-0,45	<0,55	<0,05	<0,45	<0,10	<0,15	<0,15

4.2.2. Çubuk eleman numune tasarımı

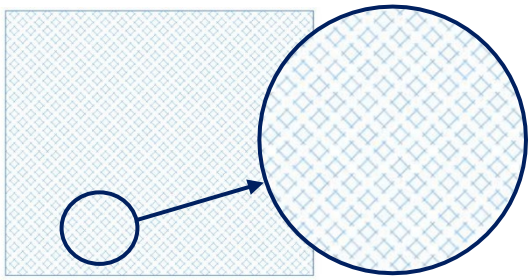
SLM baskı deneylerinde kullanılan kafes yapı çubuk (İng. strut) numuneleri Solidworks yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır, Şekil 4.1. Çubuk elemanlar, çapları 0,2 ila 1,5 mm arasında değişen yedi ayrı seri biçiminde (x ekseni boyunca) modellenmiştir. Bu seriler çubuk elemanlara 10 farklı lazer enerji yoğunluğunun (24 ile 79 J/mm^3 aralığında) tesir edebilmesi için y ekseni boyunca çoğaltılmıştır. Çubuk elemanlar yatay eksenle 0º, 45º ve 75º açılı olmak üzere üç farklı set halinde oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de dikey çubuk eleman modelleri içeren örnek bir SLM baskı numunesine ait BDT modeli ve unsur boyutları verilmektedir. Modelde hassas kesim için kanallar açılmıştır. Ayrıca numunenin baskı tablasına daha iyi tutunabilmesi için kenar kısımlara içbükey 2 mm çaplı kıvrımlar verilmiştir. Numune yönlerinin karışmaması için sağ üst köşeye girinti oluşturulmuştur.



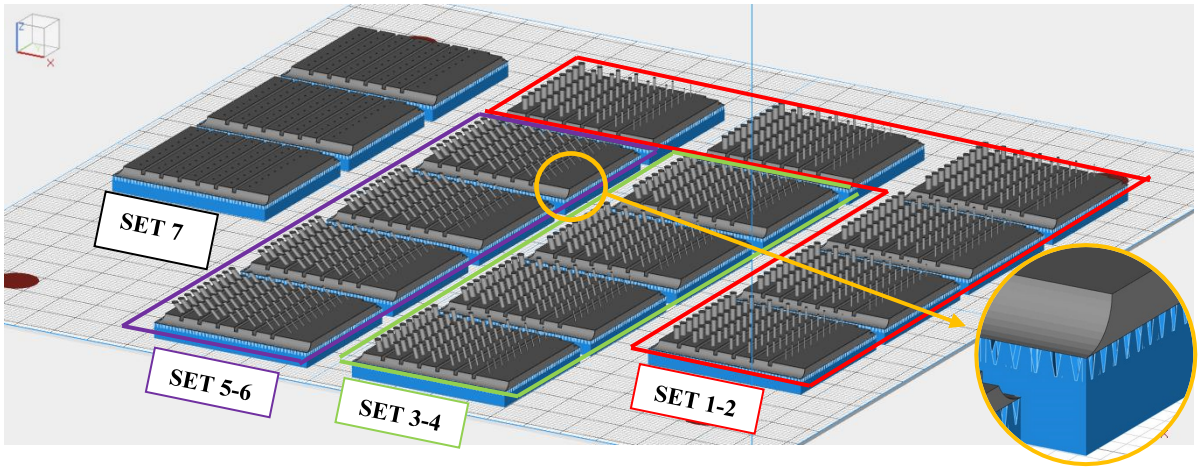
Şekil 4.1. Farklı çaplarda baskı yüzeyine dik çubuk elemanlar içeren numuneye ait BDT modeli ve unsur boyutları

Numunelere ait BDT verisi .stl dosya formatında kaydedilerek Magics yazılımına aktarılmıştır. Modeller, çubuk elemanların tabanla birleştiği noktadan (2 mm yükseklik) kesilerek her bir çubuk elemanın ayrı unsur olması sağlanmıştır. Her bir unsur (çubuk eleman ve platform) baskı parametrelerinin atanması için etiketlenmiştir. Numunelerin üretim esnasında çarpılmaması ve baskı tablasından kolay biçimde ayrılabilmesi için alt tabanla baskı tablası arasına 4 mm yüksekliğinde destek yapısı eklenmiştir. Oluşturulan destek yapısına ait özellikler Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2. Platform üretiminde kullanılan SLM baskı parametreleri ve noktasal destek profili

Özellik	Birim	Değer	Destek profili: Noktasal
Katman kalınlığı	µm	30	
Spot çapı (kontur)	µm	100	
Spot çapı (çekirdek)	µm	190	
Tarama hızı (kontur)	mm/s	1250	
Tarama hızı (çekirdek)	mm/s	1400	
Lazer gücü (kontur)	W	200	
Lazer gücü (çekirdek)	W	370	
Lazer öteleme	µm	0,175	
İç dolgu deseni mesafesi	µm	0,112	

Modeller kullanılacak olan SLM cihazının (Concept Laser M2 Cusing - baskı hacmi 245 x 245 x 280) baskı tablasından dışarı taşmayacak şekilde ve fikstürlere denk gelmeyecek şekilde konumlandırılmıştır (Resim 4.2). Sonrasında model katman kalınlığı olan 0,3 mm büyüklüğündeki dilimlere ayrılmıştır. Kalıntı gerilmeleri minimize etmek için taban gibi geniş yüzeyli modellerin adacıklar (25 x 25 mm^2) halinde taranması sağlanmıştır. Ardından tüm unsurlar (toplamda 1.224 tane) .cls dosya formatında kaydedilerek SLM yazıcı arayüzüne aktarılmıştır.



Resim 4.2. Çubuk numune setlerinin SLM baskı tablasındaki konumları

4.2.3. İşlem parametrelerinin belirlenmesi

Her biri 70 çubuk elemanı içeren, 7 farklı dikdörtgen blok setini üretmek için çeşitli lazer gücü ve tarama hızları kullanılmıştır. Çubuk elemanların üretiminde kullanılan genel işlem parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Her bir set için kullanılan baskı oryantasyonu ve işlem parametresi varyasyonlarına ait matrisler ise Şekil 4.2'de verilmiştir. Çubuk elemanların üzerinde yer aldığı alt platformun üretiminde Çizelge 4.2'de verilen üretici firmaya ait AlSi10Mg malzemesi (CL31) için standart baskı parametreleri kullanmıştır [165]. Kalıntı gerilmeleri en aza indirmek için alt tabaka gibi geniş yüzeylere sahip geometrilerin üretiminde ada tarama stratejisi kullanılmıştır.

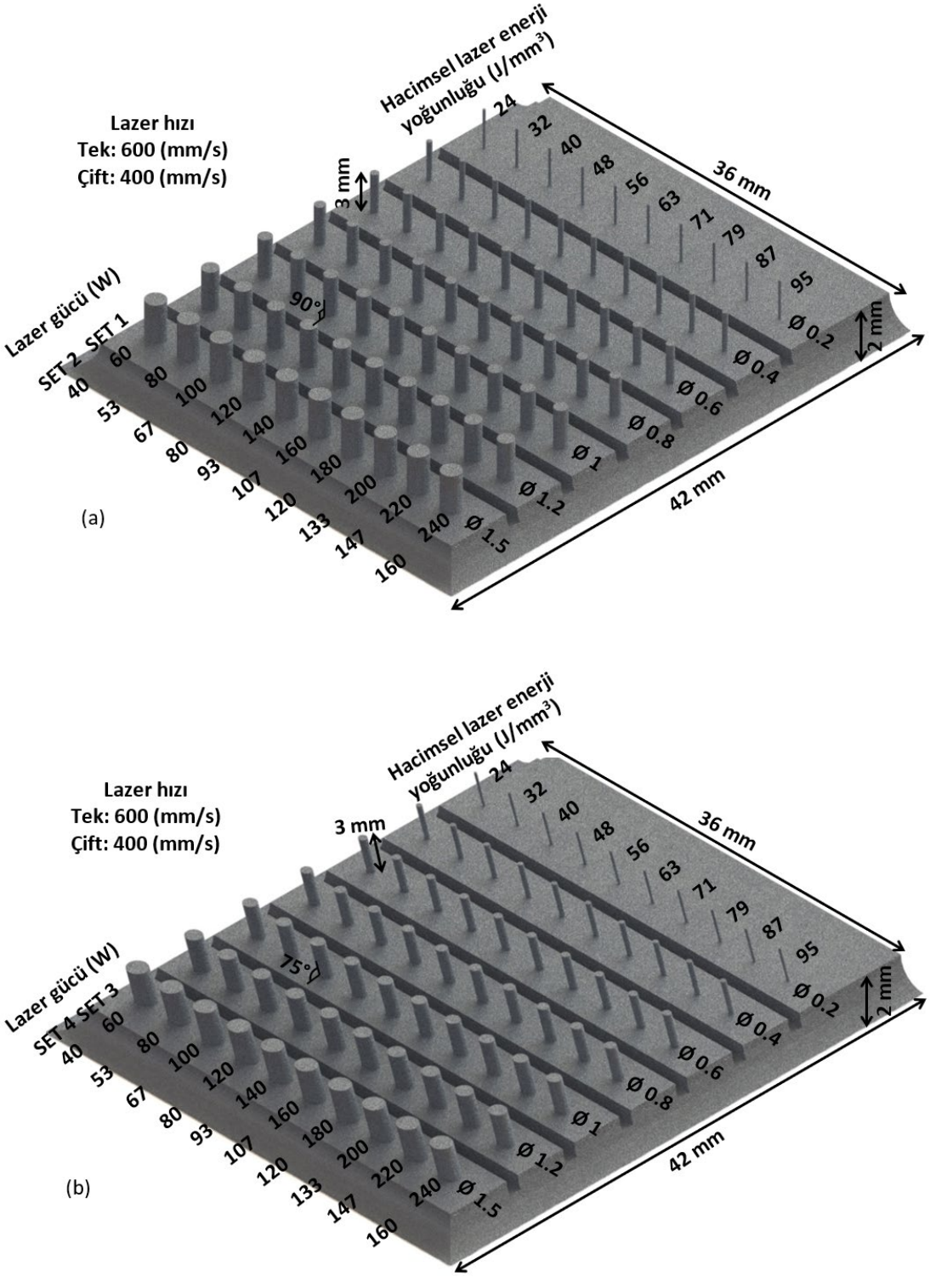
Çizelge 4.3. Çubuk elemanların üretiminde kullanılan baskı parametreleri

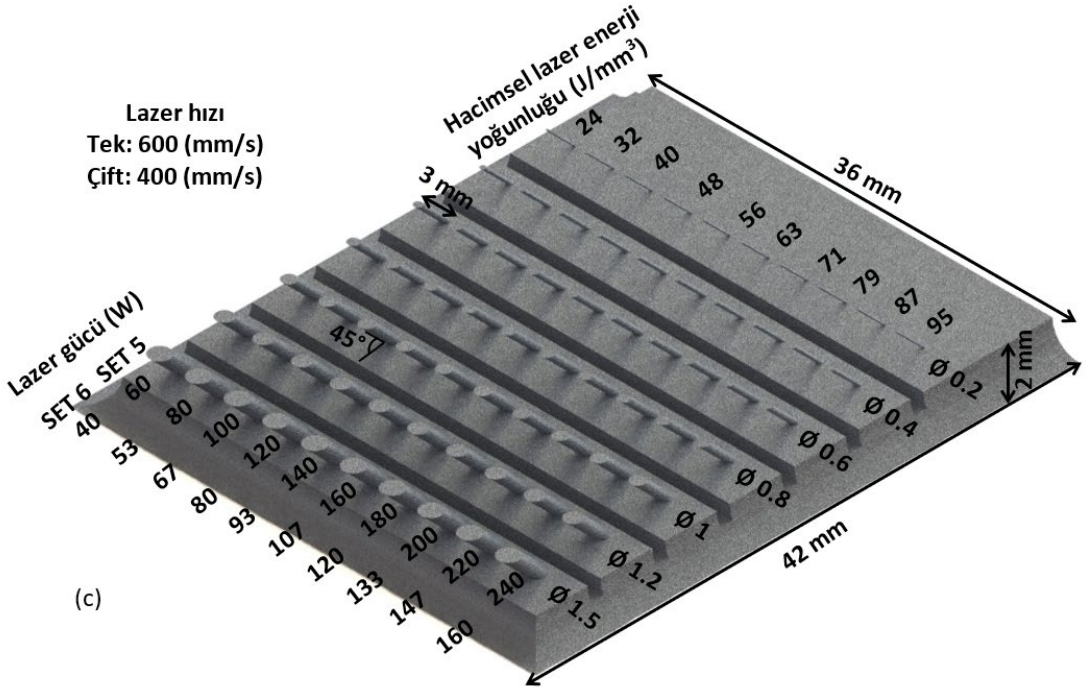
Özellik	Birim	SET 1	SET 2	SET 3	SET 4	SET 5	SET 6
Katman kalınlığı	µm	30	30	30	30	30	30
Spot çapı	µm	140	140	140	140	140	140
Tarama hızı	mm/s	600	400	600	400	600	400
Lazer Gücü	W	60-240	40-160	60-240	40-160	60-240	40-160
Hacimsel enerji yoğunluğu	J/mm^3	24-95	24-95	24-95	24-95	24-95	24-95
Tarama çizgi aralığı	µm	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112
Lazer ofset	µm	0	0	0	0	0	0
Çubuk eleman yüzey açısı	°	Dikey	Dikey	75	75	45	45

Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere her bir çubuk eleman unsuru için lazer gücü ve lazer hızı dışındaki parametreler aynıdır. Ardışık setlerde (1-2, 3-4, 5-6) aynı sırada bulunan çubuk elemanların hacimsel enerji yoğunluğu sabit kalacak şekilde farklı lazer güçleri ve tarama hızları belirlenmiştir. Böylece hacimsel enerji yoğunluğundan bağımsız olarak lazer gücü ve tarama hızının çubuk elemanın mikroyapısına etkisi gözlemlenmiştir. Hacimsel enerji yoğunluğu;

$$ED = \frac{P}{v.LT.h} \ (J/mm^3) \tag{4.1}$$

eşitliği ile hesaplanmıştır [166]. Burada P lazer gücü (W), v lazerin tarama hızı (mm/s), LT katman kalınlığı (mm), h ise lazer spot çapı (mm)'dır. Lazer gücü ve hızı Eş. 4.1'de gösterilen lazer yoğunluğunun ardışık setlerde aynı olması sağlanacak şekilde her bir çubuk eleman dizisine atanmıştır. Şekil 4.2'de çubuk eleman setleri için tanımlanan lazer gücü ve hızı gösterilmektedir.

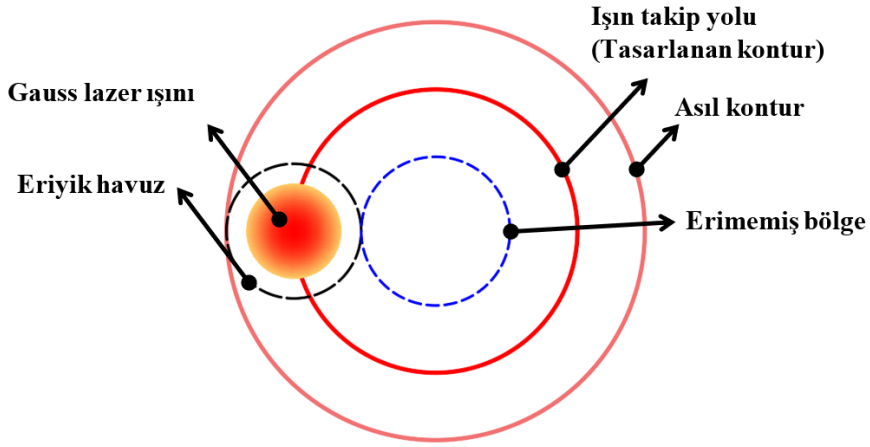




Şekil 4.2. Çubuk eleman numunelerine ait baskı parametreleri ve baskı oryantasyonları (a) dik açılı, (b) 75º açılı, (c) 45º açılı

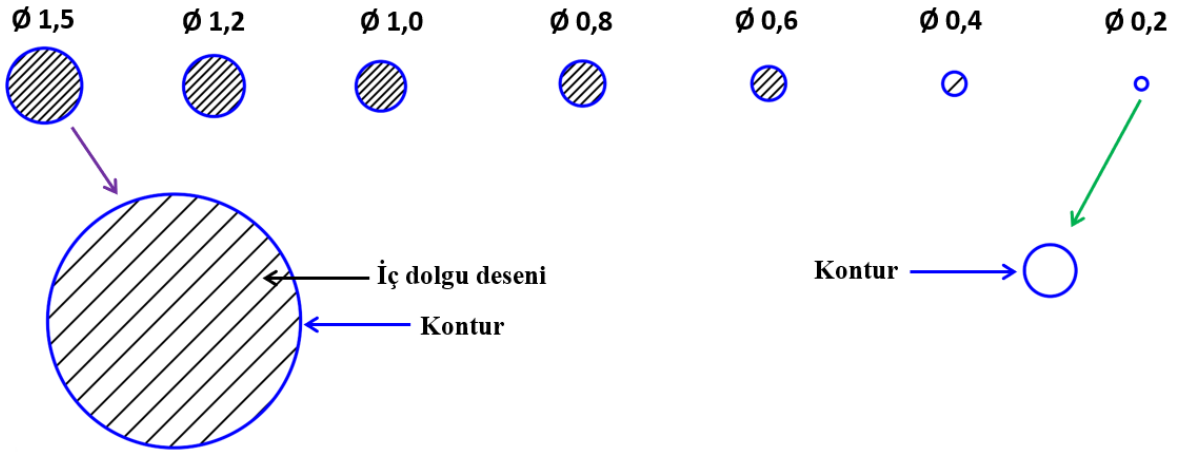
Şekil 4.3'te çubuk eleman konturlarının lazer tarama illüstrasyonu verilmiştir. Lazer ışını ince unsurun dış konturunu oluşturmak için BDT verisinden alınan sınırları takip ederken, lazer spot büyüklüğüne ve gauss ışın dağılımı etkilerine bağlı olarak kontur sınırları dışındaki tozlarda bir miktar sinterlenir. Lazer ışının izlediği yol dışında kalan bu eriyik bölgeler çubuk elemanın çapının tasarlanan çap değerinden daha büyük olmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu bölgeler çubuk eleman yüzey pürüzlülüğünü de negatif etkilemektedir. Lazer spot büyüklüğüne bağlı olarak ortaya çıkan bu etkiler spot çapının azaltılması ile minimize edilebilir. Fakat lazer spot çapının azalmasıyla baskı süresinin artması, anahtar deliği gözenekliliği ve yüksek kalıntı gerilmeler gibi negatif etkiler de ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle çubuk eleman gibi ince unsurlu yapılarda spot büyüklüğünün optimize edilmesi gereklidir. Ayrıca boyutsal doğruluğu sağlamak için lazer spotu parçanın iç kısmına doğru işlem proseslerine bağlı olarak belli bir miktar (genellikle lazer spot çapının yarısı) ötelenebilir [167]. Çalışmada ağırlıklı olarak lazer gücü ve tarama hızının çubuk eleman unsurlarının üretimine etkisi araştırıldığından ve ilgili parametrelerin adil kıyaslanabilmesi için spot çapı sabit tutulmuş (140 μm) ve ışın ötelemesi yapılmamıştır (Çizelge 4.3).

Boyutsal doğruluğu etkileyen bir diğer etken ise eriyik bölgenin yapısı ve büyüklüğüdür. Eriyik havuzunun büyümesi ile büzülme ve çarpılma, tarama izlerinin üst üste binmesi ve artan yüzey pürüzlülüğü etkileriyle ölçüsel hassasiyet azalmaktadır [168]. Eriyik havuzun yeterli büyüklükte olmaması durumunda ise üretilen katman alttaki katmanlara nüfuz edemez ve mekanik kusurlara sebebiyet vererek dayanımın azalmasına neden olur [169]. Eriyik havuzunun büyüklüğü ise lazer gücü ve tarama hızı gibi işlem parametrelerine bağlıdır. Ayrıca lazer ışının gauss dağılımı formunda olması nedeniyle ışın merkezinden kenar bölgelere gittikçe azalan ısıl enerji nedeniyle bu bölgelerdeki tozlar yarı sinterlenmiş halde kalabilirler [170]. Bu yarı sinterlenmiş tozlar yüzey pürüzlüğüne ve mekanik kusurlara neden olmaktadır.



Şekil 4.3. Çubuk elemanlara ait kontur tarama illüstrasyonu

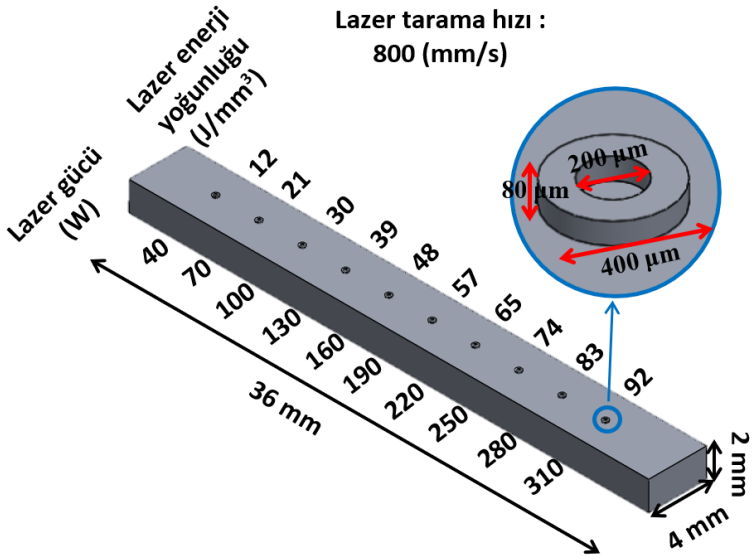
Çubuk elemanların üretiminde önce dairesel dış kontur ışın ötelemesi olmadan oluşturulmaktadır. Sonrasında iç yüzey 45º değerinde açılara sahip ve aralarında 0,112 mm mesafe olan lineer desenlerle doldurulmuştur. İç dolgu deseni 0,2 mm çaplı çubuk elemanda bulunmazken, 0,4 mm çaplı çubuk elemanda bir adet bulunmaktadır. Daha büyük çubuk elemanlarda ise çubuk eleman çapına bağlı olarak sayı artmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Çaplara bağlı dolgu deseni ön izlemesi. Tarama aralığı 0,112 mm'dir.

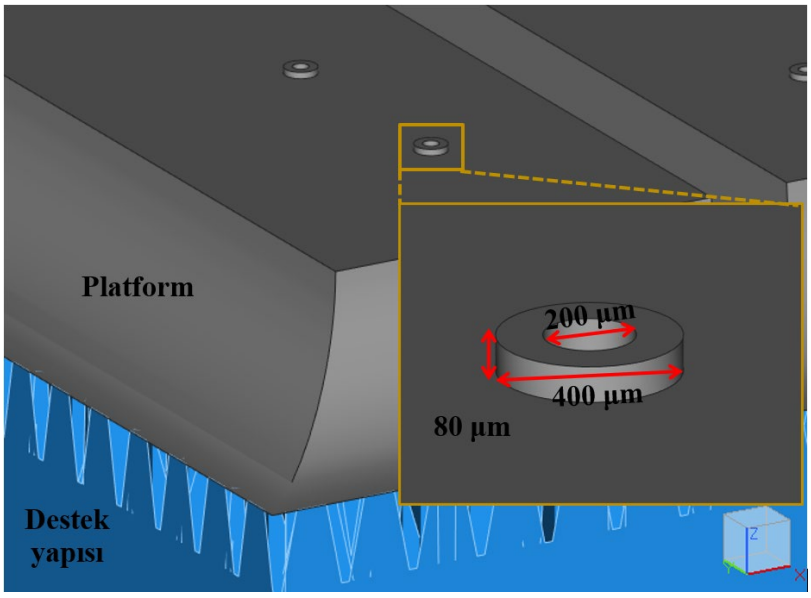
4.2.4. Tek yol tarama numune tasarımı ve işlem parametrelerinin tayini

İnce unsurların SLM ile üretiminde baskı parametrelerinin parça doğruluğuna ve eriyik havuz yapısına etkilerini daha iyi anlamak için mikro delikli unsur setleri (SET7) kullanılmıştır. Çizelge 4.2'te baskı parametreleri verilen bir platform üzerine 200 µm et kalınlığa 400 µm çapa ve 80 µm yüksekliğe sahip unsurlar yerleştirilmiştir. Burada, lazerin spot çapından (140 µm) bir miktar daha yüksek et kalınlığına (200 µm) sahip delikli unsurun tek lazer tarama işlemi adımında üretilebilirliği araştırılmıştır. Unsur yüksekliği ise üç katman kalınlığı olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 4.5'te tek yol lazer tarama ile üretilen delikli ince unsurlara ait BDT verisi ve baskı parametreleri verilmiştir. Sıralanan delikli ince unsurların SLM ile üretiminde lazer tarama hızı tüm unsurlar için 800 mm/s olarak sabit tutulurken, 40-310 W aralığında çeşitli lazer güçleri kullanılarak farklı unsurlar üretilmiştir. Buna bağlı olarak 12 ila 92 J/mm^3 arasında değişen hacimsel lazer enerji yoğunluklarına sahip ince unsurlar üretilmiştir.



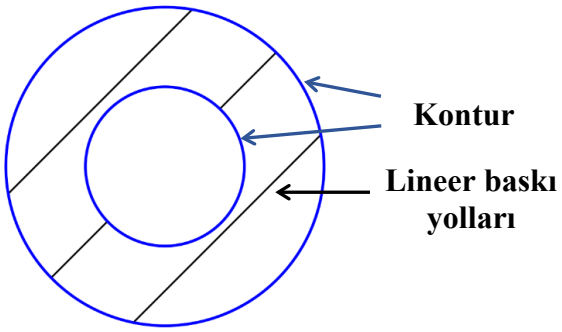
Şekil 4.5. Tek yol lazer tarama ile üretilen delikli ince unsurlara ait BDT görüntüsü ve kullanılan baskı parametreleri

Delikli ince unsurlara ait .stl dosya formatındaki BDT verisi ticari bir dilimleyici yazılıma (Materialise Magics) aktarılmıştır (Şekil 4.6). İnce unsurların üretiminde kullanılan baskı parametrelerinin atanabilmesi için platform ile delikli ince unsur geometrileri birbirlerinden ayrıştırılıp etiketlenmiştir. Baskı sonrası numunelerin tabladan kolay bir biçimde ayrılabilmesini sağlamak ve çarpılmaları minimize edebilmek için platformla baskı plakası arasına 4 mm yüksekliğinde destek yapısı eklenmiştir (Şekil 4.6). Yine çarpılmaları azaltmak için model köşelerine 2 mm çaplı kıvrımlar verilmiştir.



Şekil 4.6. Delikli ince unsurlara ait numunelerin dilimleyici görüntüsü ve baskı hazırlıkları

Dilimlenen modeller baskı parametrelerinin belirlenmesi için SLM yazıcıya ait CL WRX arayüzüne aktarılmış ve Şekil 4.5'te verilen üretim parametreleri unsurlara atanmıştır. Şekil 4.7'te delikli ince unsurlara ait lazer tarama stratejisi görülmektedir. Baskı esnasında önce dış kontur taranmaktadır. Parça rijitliğini sağlamak için iç kısımda aralarında 0,112 mm mesafe olan 45º açılı lineer iç tarama yolları (İng. hatch) kullanılmıştır.

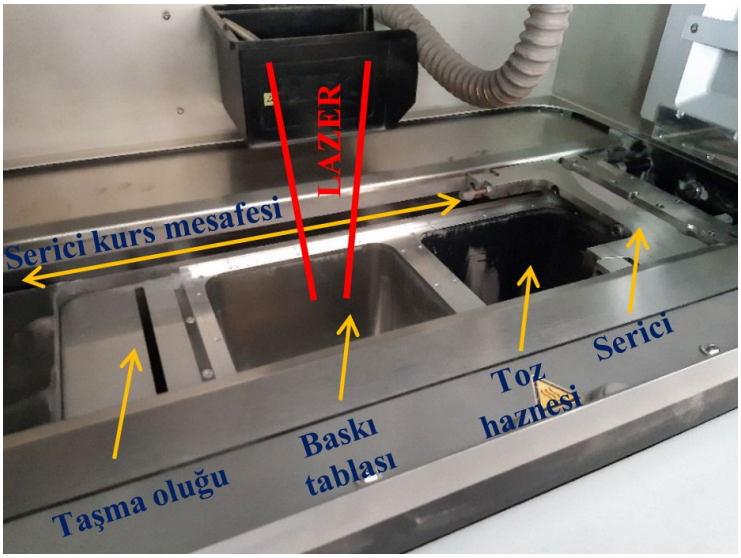


Şekil 4.7. Delikli ince unsurlara ait lazer tarama stratejisi

Delikli ince unsurlar AlSi10Mg tozları kullanılarak GE firmasına ait Concept Laser M2 Cusing SLM cihazında üretilmiştir. Üretim hacmi argon gazı ile 0_2 seviyesi %0,8'in altında kalacak şekilde şartlandırılmıştır. Sericinin (İng. recoater) taşıdığı toz miktarı, tüm baskı tablasını bir katman kalınlığında doldurmaya yetecek toz miktarının iki katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Sericinin hızı ise serim öncesi, serim esnasında ve boştayken sırasıyla 150, 50 ve 300 mm/s olarak belirlenmiştir. Üretilen numuneler tel erezyon ile baskı tablasından ayrılmıştır. Elde edilen numunelerin en üst katmanları Leica DMC2900 stereo mikroskop kullanarak 1,2X'den 10X'e kadar farklı büyütme oranlarında incelenmiştir. Numune kesitleri ise hassas kesimle elde edilmiş ardından Çizelge 4.4'te verilen işlem parametreleri kullanarak zımparalanmış ve parlatılmıştır. Ardından Keller reaktifi ile dağlanan numune kesitleri LEICA DMI500M ters mikroskop yardımıyla karakterize edilmiştir.

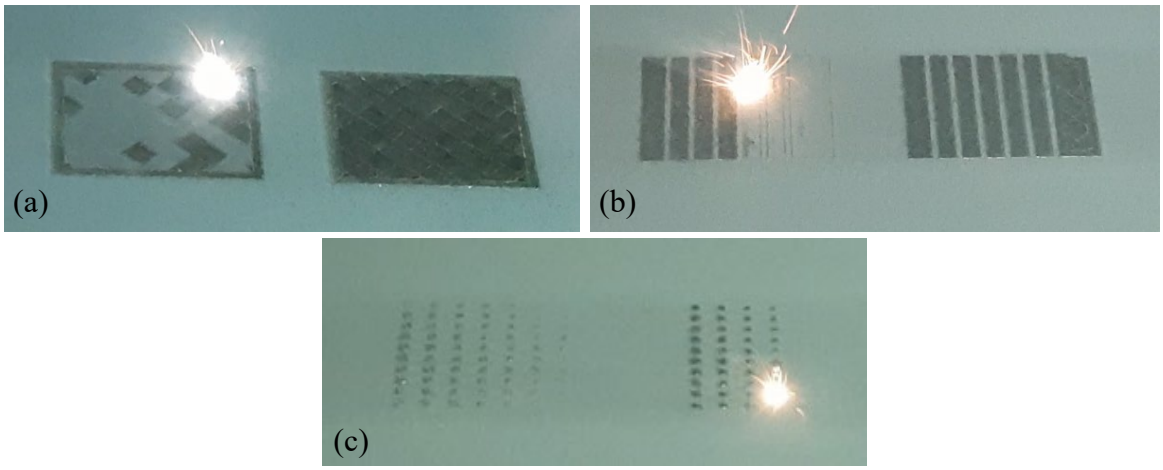
4.2.5. Çubuk elemanların SLM yöntemiyle üretimi

Çubuk eleman yapıları GE firmasına ait Concept Laser M2 Cusing SLM cihazı kullanılarak üretilmiştir. Cihaza ait üretim haznesi Resim 4.3'te gösterilmiştir.



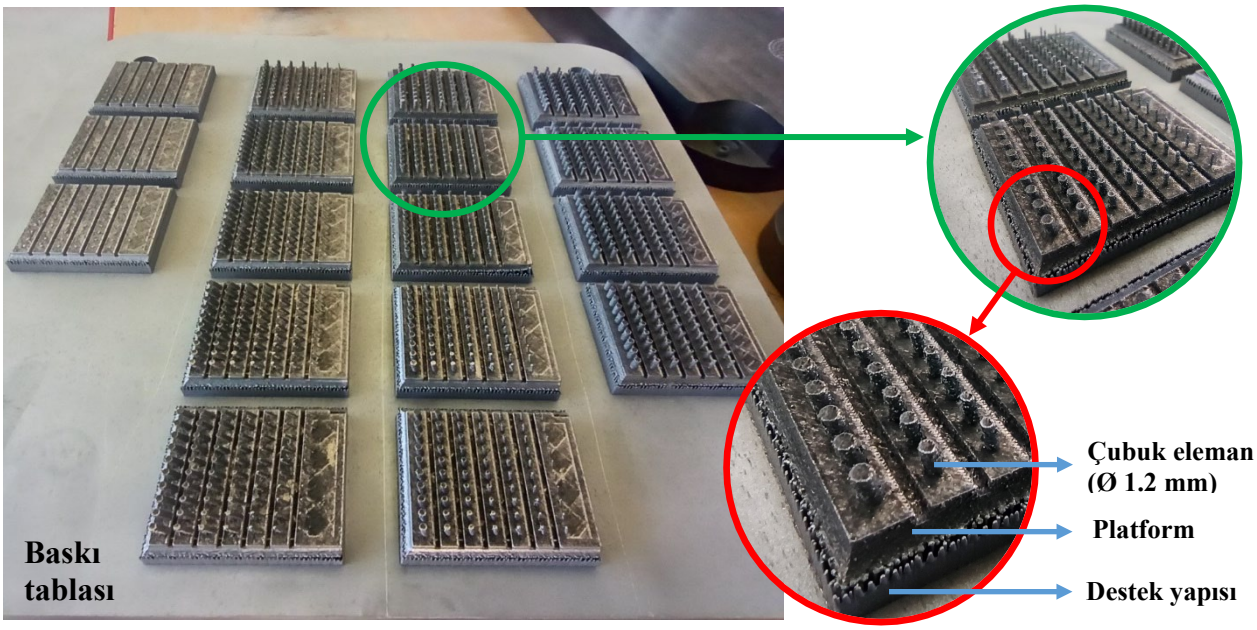
Resim 4.3. Concept Laser M2 Cusing SLM 3B yazıcıya ait üretim haznesi

Baskı ön işlemi olarak baskı hacmindeki oksijen seviyesi %0,8'in altına düşene kadar ortam argon gazı ile şartlandırılmıştır. Sericinin (recoater) taşıdığı toz miktarı, tüm baskı tablasını bir katman kalınlığında doldurmaya yetecek toz miktarının iki katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Serici hızı ise serim öncesi, serim esnasında ve boştayken sırasıyla 150, 50 ve 300 mm/s olarak belirlenmiştir. Baskı esnasında önce dış kontur taranmaktadır. Ardından 45º'lik açılara sahip aralarında 0,112 mm mesafe olan lineer doğrularla iç kısım doldurulmuştur. Geniş alanlarda ise sıcaklığın eşit biçimde dağılmasını sağlayarak kalıntı gerilmelerinin önüne geçmek için adacık tarama stratejisi kullanılmıştır. Burada geniş yüzey alanı küçük adacıklara bölünür ve bu adacıklar rastgele taranır (Resim 4.4a). Şekil 4.4 ve Şekil 4.7'de tarama ön izlemesi verilen çubuk eleman unsurları ise Çizelge 4.3'te verilen baskı parametreleri kullanılarak üretilmiştir (Resim 4.4).



Resim 4.4. Numunelerin SLM üretimi (a) geniş alanlı unsurların adacık tarama stratejisiyle üretimi, (b) dar alana sahip unsurların üretimi, (c) ince unsurların üretimi

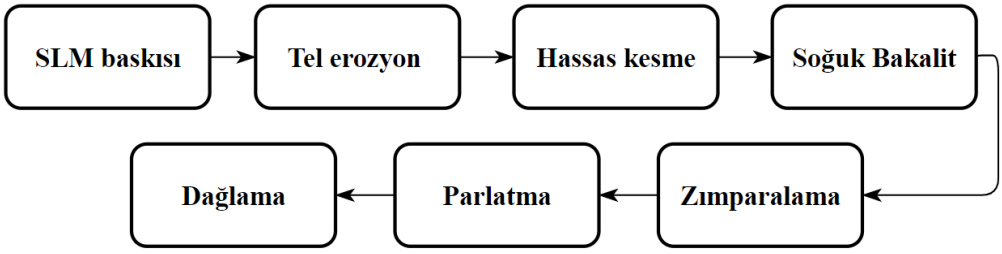
Baskı işlemi 8 saat 45 dakika sürmüştür İşlem sırasında yaklaşık 8 bar argon gazı harcanmıştır. Baskı sonrası fazla toz fırça ve vakum yardımıyla temizlenmiştir. Baskı sonrası elde edilen numuneler Resim 4.5'te görülmektedir.



Resim 4.5. SLM yöntemiyle üretilen çubuk eleman numuneleri ve SET 4 parametreleriyle üretilen numuneye ait detay görüntüsü

4.2.6. Malzeme karakterizasyon testleri

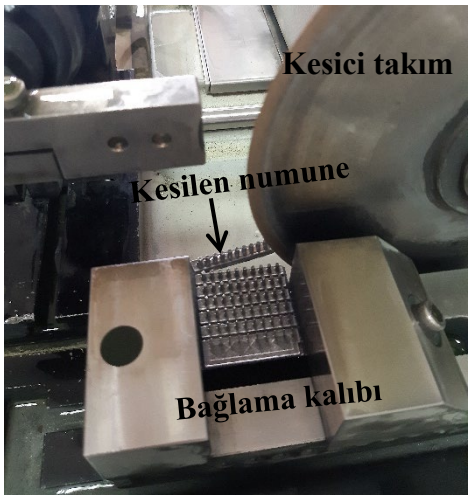
SLM Eİ yöntemi kullanılarak farklı işlem parametreleri, çap ve oryanstasyonda üretilen çubuk eleman yapıların mikroyapısal farklılıklarının tayini için uygulanan metalografik numune hazırlama süreci Şekil 4.8'de sunumuştur.



Şekil 4.8. SLM yöntemi ile üretilen AlSi10Mg çubuk eleman numunleri için metalografik numune hazırlama adımları

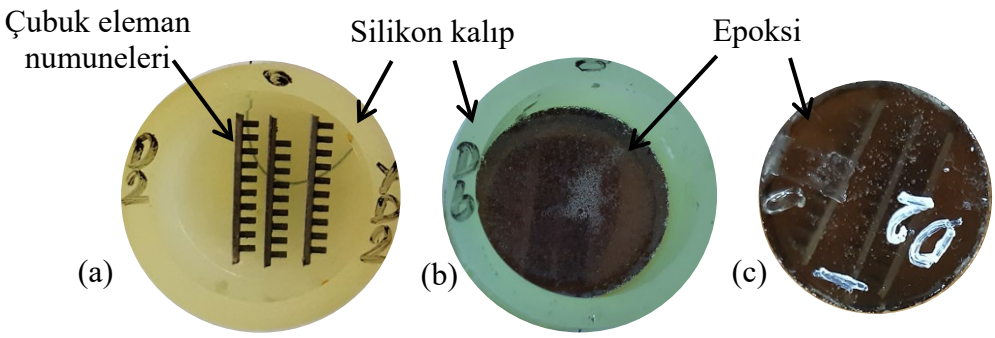
SLM Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen numuneler (Resim 4.5) baskı tablasından Mitsubishi MV2400R tel erozyon cihazı ile 0,1 mm çapındaki pirinç tel (%63 bakır ve %37

çinko) kullanılarak ayrılmıştır. Numuneler daha sonra Şekil 4.1'de görülen kanallar boyunca Buehler Isomet 5000 lineer hassas kesim cihazı (Resim 4.6) kullanılarak kesilmiştir. Hassas kesim işleminde elmas uçlu abrasiv kesme diskinin döneme hızı 3950 rpm, ilerleme hızı 5.8 mm/dk ve kesme mesefesi 40 mm olarak ayarlanmıştır. Kesme işleminde aşırı ısınmayı önlemek için optimize edilen kesme parametreleri yanı sıra soğutma sıvısı (%15 petrol bazlı sentetik soğutma yağı, %85 su) kullanılmıştır.



Resim 4.6. Numunelerin hassas kesim cihazı ile kesilme süreci

Kesilen numunelerin kesme yüzeyleri 31-37 μm tane boyutuna sahip 240 grid zımpara kullanılarak olası çapaklardan arındırılmış ve izopropil alkol ile temizlenmiştir. İnce unsurlu numunelere ait kesitlerin daha etkin incelenebilmesi için bu çubuk eleman numunelerin kalıplanması gerekmektedir. Alüminyum alaşım narin çubuk eleman yapılarının ısı ve deformasyon toleranslarının düşük olmaları nedeniyle basınç veya sıcaklık uygulanmayan kalıplama yöntemi olan soğuk bakalite yöntemi tercih edilmiştir. Soğuk bakalite yönteminde silikon kalıp içerisine yerleştirilen numuneye (Resim 4.7a) epoksi reçine, sertleştirici (ağırlık olarak 2:1 oranında) ve şeffaf reçinenin ışık geçirgenliğini azaltmak için renk pigmenti karışımı eklenmiştir. Epoksi reçineler kısa katılaşma süresi ve düşük büzülme oranı gösteren metalografik reçinelerdir. Epoksi reçine ve sertleştirici karışımının eklenmesi sonrasında numuneler 2 saat oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır (Resim 4.7b). Katılaşan numuneler esnek silikon kalıplarından sonraki adım olan zımparalama ve parlatma işlemleri için çıkarılmıştır (Resim 4.7c).



Resim 4.7. Soğuk kalıplama aşamaları (a) numunelerin silikon kalıp içerisine yerleştirilmesi, (b) epoksi reçine-sertleştirici karışımın eklenmesi, (c) katılaşmış bakalit

Kesme işleminden sonra soğuk bakalite alınan numunelerin yüzeylerinde pürüz, deformasyon ve oksit tabakası görülebilir. Malzeme içyapısının metalografik olarak etkin bir şekilde incelenebilmesi için yüzeyinin pürüzsüz ve odaklanmayı iyileştirmek için (ters mikroskop kullanılmıyorsa) kesit yüzeylerin yatay eksene paralel olması gerekmektedir. Bu nedenle çok ince unsurlar (Ø 0,2 mm'ye kadar) içeren numune kesitlerinin elde edilmesi için hassas aşındırma yöntemleri kullanılmıştır. Aşındırma işleminde ilk olarak zımpara kağıdının yırtmaması için bakalit kenarlarına kaba zımpara (80 grid) kullanılarak pah verilmiştir. Ardından bakalite alınmış numune yüzeyleri farklı aşındırıcı tane boyutları içeren bir seri SiC zımpara ile aşındırılmıştır. Aşındırma işleminde her kademede bir öncekinden daha ince zımparalar (150'den 800 gride kadar) kullanılarak çizik ve deformasyon en aza indirilmiştir. Bir seviye daha ince zımparaya geçildiğinde, numune 90^{o} döndürülmüş ve numune diskin dış yüzeylerinden merkeze doğru hareket ettirilmiştir.

Numuneler daha sonra zımparalama sırasında oluşan mikro çiziklerin giderilmesi ve ışığı iyi yansıtan yüzeyin elde edilmesi için parlatma işlemine tabii tutulmuşlardır. Parlatma işlemi kaba ve ince parlatma olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Kaba parlatma için tüysüz çadır bezi ve 3 µm boyutlu Al_2O_3 aşındırıcı kullanılırken ince parlatma için ise tüylü çuhalar ve 1 µm boyutlu elmas pasta aşındırıcıları kullanılmaktadır. Parlatma işleminde 270 d/dk hızla dönen bir döner disk üzerine aşındırıcı süspansiyon sıkılmış ve numune disk dönme yönüne ters yönde hareket ettirilmiştir. Parlatılan yüzeyler belirli aralıklarla mikroskop (100x büyütmede) ile gözlemlenmiş çiziksiz ve parlak yüzeyler elde edilene kadar süreç devam etmiştir. Parlatılan yüzeylerde kalan aşındırıcı taneleri su kullanarak temizlenmiştir.

Parlatılmış çubuk eleman yüzeyleri, her noktada ışığı eşit miktarda yansıttığı için içyapıda bulunan fazları ve tane sınırlarının görüntülenebilmesi için numuneler dağlama işlemine tabi

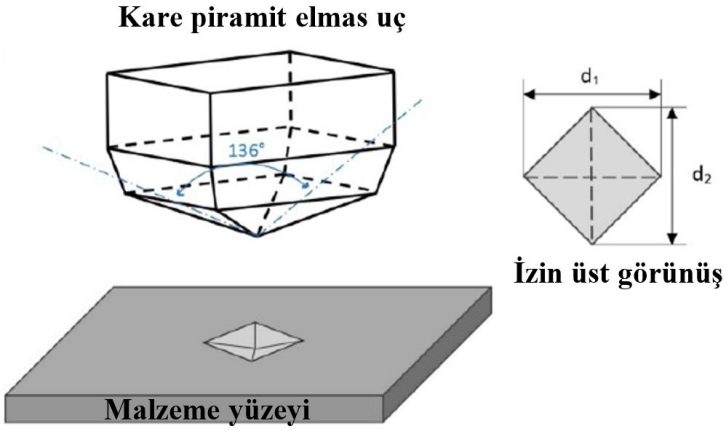
tutulmuşlardır. Numune yüzeyi dağlama çözeltisine maruz bırakıldığında, enerjisi yüksek olan kısımlar (tane sınırları ve fazlar) anot, enerjisi düşük olan kısımlar (tane içleri) katot özellik gösterir. Aşınan anot bölgeler mikroskop altında ışığı farklı yönlere yansıtarak koyu renkte, aşınmayan bölgeler ise ışığı geri yansıtarak açık renkte görünürler. Oluşturulan bu kontrast sayesinde tane boyutu, deformasyon yapısı, çökeltiler, mikroyapı sementasyon-nitrasyon derinlikleri, dekarbürizasyon gibi pek çok parametre incelenebilir [171]. Çalışmada AlSi10Mg numuneleri Keller reaktifi olarak da bilinen 1 ml hidroflorik asit (HF), 1,5 ml hidroklorik asit (HCI), 2,5 ml nitrik asit (HNO_3) ve 95 ml su içeren kimyasal çözelti ile daldırma yöntemiyle dağlanmışlardır. Numune çözelti içerisinde 15 saniye tutulmuş ve ardından reaksiyonun devam etmemesi için yüzey etanol ile yıkanmış ve ardından kurutulmuştur. Çizelge 4.4'te AlSi10Mg çubuk eleman numuneleri için metalurjik numune hazırlama sürecinde kullanılan aşındırma yöntemleri ve ilgili işlem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. AlSi10Mg çubuk eleman numuneleri için zımparalama, parlatma ve dağlama süreçleri ve ilgili işlem parametreleri

İşlem / Parametre	Kaba Zımpara	Orta Zımpara	İnce Zımpara	Kaba Parlatma	İnce Parlatma	Dağlama
Aşındırıcı Yüzey	Zımpara	Zımpara	Zımpara	Tüysüz çadır bezi	Tüylü çuha	Kimyasal solüsyon
Aşındırıcı Tipi	Zr_2O_3/SiC	SiC	SiC	Al_2O_3	Elmas pasta	Kimyasal solüsyon
Aşındırıcı Boyutu	105-88 µm (#150)	37-31 µm (#320)	15-11 µm (#800)	3 µm	1 µm	-
Süspansiyon	Su	Su	Su	Elmas süspansiyon	Elmas süspansiyon	Keller reaktifi
Kuvvet (N)	Yüksek (~25N)	Yüksek (~25 N)	Orta (~20 N)	Düşük (~15 N)	Düşük (~15 N)	-
Süre (dk)	Kesite ulaşana	4	3	2	2	0,25
Dönem Hızı	350	300	300	270	270	Daldırma

SLM teknolojisiyle gelişmiş mikroyapıya ve üstün mekanik özelliklere sahip bu çubuk elemanların elde edilmesi, lazer gücü ve tarama hızı dahil olmak üzere baskı parametrelerinin optimizasyonuna bağlıdır. SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanlar, α-alüminyum tanecik sınırlarındaki silikon dağılımları ve ultra ince mikro yapıları nedeniyle geleneksel tekniklerle üretilen benzer yapılara kıyasla gelişmiş mikrosertlik özellikleri sergilerler. AlSi10Mg çubuk elemanların mikrosertlikleri; aşınmaya, yorulmaya ve deformasyon dirençleri dahil olmak üzere mekanik performanslarının belirlenmesinde etkilidir [172].

Mikrosertlik ölçümleri, malzemelerin Young modülü, kalıntı gerilme, akma dayanımı ve kırılma dayanımı gibi mekanik özelliklerini karakterize etmek için kullanan mekanik testlerden biridir [173]. Test esnasında iyi tanımlanmış geometriye sahip elmas uç, test yüzeyine batırılarak malzemenin gösterdiği direnç belirlenmektedir. Elmas ucun geometrisi mikrosertlik testinin türünü belirlemektedir. Brinell tipi testlerde küresel uç kullanılırken Vickers tipi testlerde kare piramit şekilli elmas uç kullanılmaktadır. Batırma işlemi ardından Şekil 4.9'da şematik olarak gösterildiği gibi elmas ucun malzeme üzerinde bıraktığı izin alanı (Brinell ve Vickers için) veya penetrasyon derinliği (Rockwell) optik mikroskop yardımıyla ölçülmektedir.



Şekil 4.9. Kare piramit elmas uçlu Vickers mikrosertlik testinin şematik gösterimi [174]

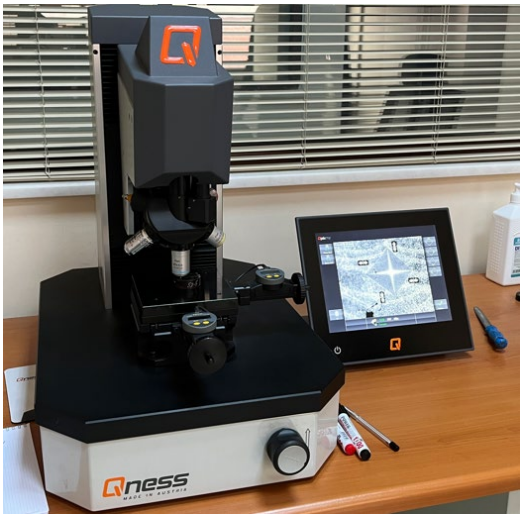
Çalışmada kullanılan Vickers tipi sertlik ölçme yöntemine ait iz alanı ve elmas uç kuvvetine bağlı formülasyon Eş. 4.2'de verilmiştir. Burada, yükler tipik olarak gram-kuvvet (gf) ve girinti köşegenleri arasındaki mesafe mikrometre (μm) cinsindendir. Vickers tipi sertlik ölçme metodunda malzeme sertlik birimi HV olarak ifade edilmektedir.

$$HV = \frac{2F*sin(\frac{\alpha}{2})}{d^2} \tag{4.2}$$

Burada F uygulanan kuvvet (N), α elmas uca ait tepe açısı (Vickers için genellikle 136°) ve d köşegenler arası ortalama mesafedir (mm).

İşlem parametrelerinin çubuk eleman yapıların mikrosertliği üzerindeki etkisini belirlemek için her bir numunenin kök, orta ve uç noktalarında Vickers mikrosertlik yöntemiyle ölçüm yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Resim 4.8'de gösterilen Qness Q30M Vickers

mikrosertlik cihazıyla 500 gf kuvvetinde ve 5 sn etki süresince uygulanmıştır. Etki sonunda izler yine aynı cihazın taretinde yer alan 10x ve 40x optik lensler yardımıyla ölçülmüştür.



Resim 4.8. Vickers tipi mikrosertlik cihazı

Geleneksel yöntemlerle imal edilen AlSi10Mg alaşım parçaların mikrosertlik değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelgedeki verilere göre, en yüksek mikrosertlik değerinin (ortalama 130 ± 5 HV) yüksek basınçlı döküm ve ardından T6 ısıl işlemi kullanılarak elde edildiği görülmektedir. İkinci en yüksek mikrosertlik değeri (ortalama 120 ± 5 HV) SLM kullanılarak elde edilmiştir. Döküm yöntemi ise en düşük mikrosertlik değerine (ortalama 62 ± 2 HV) sahiptir. Ayrıca T6 ısıl işleminin, SLM yöntemi dışında tüm üretim yöntemlerinde malzemenin sertliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Örneğin döküm ile üretilen malzemenin sertlik değeri T6 ısıl işleminden sonra 62 ± 2 HV'den 114 ± 5 HV'ye çıkmıştır. SLM yöntemiyle elde edilen ince tane boyutlu mikroyapıdaki yüksek silisyum içeriği, parçanın mukavemeti ve mikrosertliğini geliştirmektedir. Isıl işlem sonrası ise iyi dağılmış silisyumun difüzyonu ile kaba taneler oluşarak mikrosertlik azaltmaktadır.

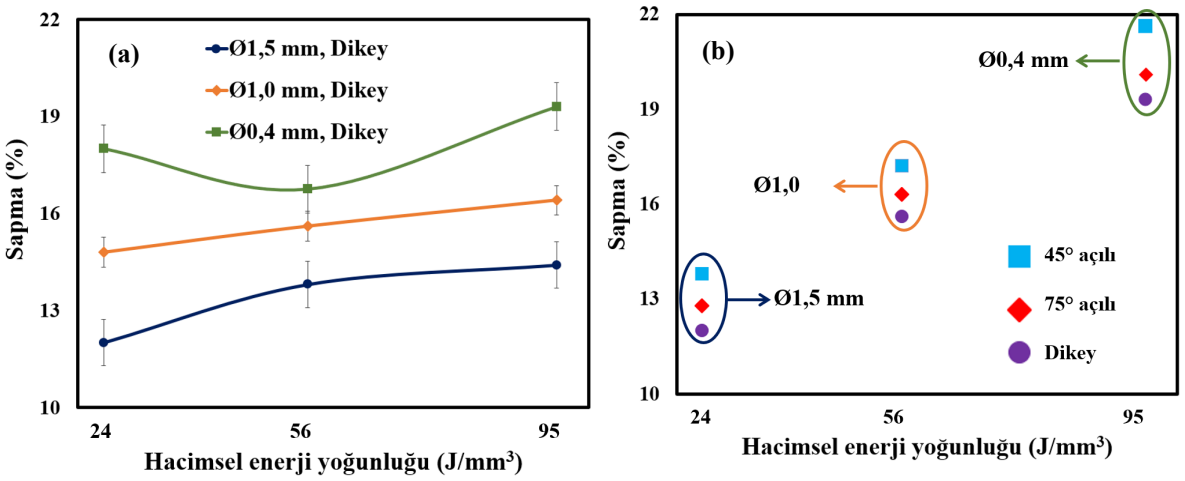
Çizelge 4.5. Geleneksel yöntemlerle üretilen AlSi10Mg alaşım parçaların mikrosertlikleri [151,175,176]

Üretim Yöntemi	Değer (HV)	Üretim Yöntemi	Değer (HV)
Döküm	62±2	Yüksek basınçlı döküm + T6 ısıl işlem	130±5
Döküm + T6 ısıl işlem	114±5		
Döküm + yaşlandırma	86±4	SLM	120±5
Yüksek basınçlı döküm	100±5	SLM + T6 ısıl işlem	100±3

4.3. Bulgular ve Tartışma

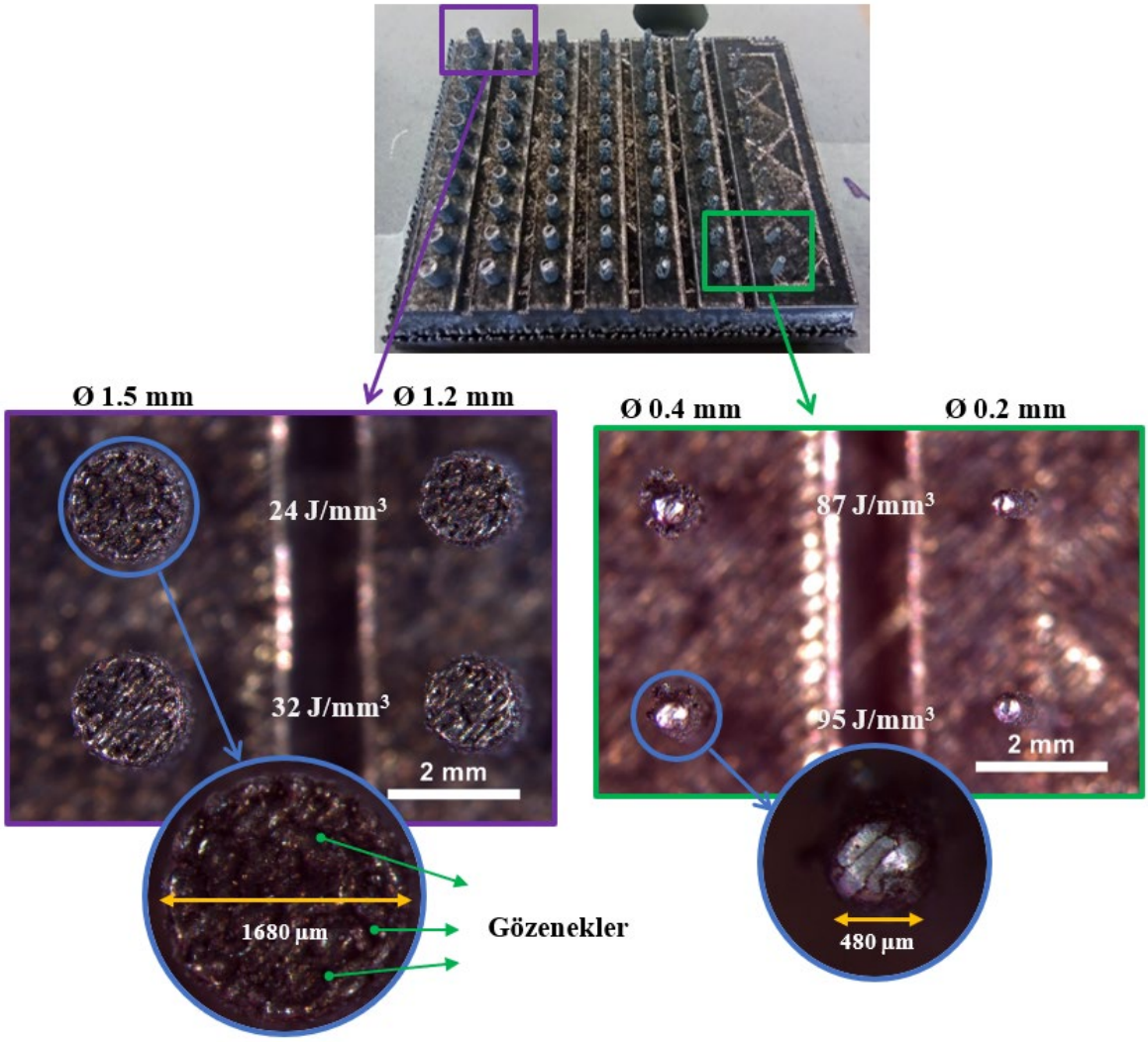
4.3.1. Boyutsal doğruluk

Resim 4.9'da SET 1 parametreleri ile üretilen yatay eksenle 90° (dik) açılı numune üst yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Hacimsel lazer enerji yoğunluğunun düşük olduğu numune yüzeylerinde yoğun gözeneklilik görülmüştür. Lazer enerji yoğunluğu arttığında ise gözenekliliğin azaldığı fakat çubuk eleman etrafında yarı sinterlenmiş toz miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi çubuk eleman çaplarının BDT modeline göre %10-%20 arasında fazla olduğu görülmektedir. Bu duruma üretim esnasında lazer ötelemesi yapılmaması sebebiyle lazer ışının kontur çizgileri üzerinde hareket ederken gauss ışın dağılıma bağlı olarak bir miktar fazla tozu da sinterlemesi neden olmuştur. Boyutsal tamlık (% sapma) ise numune çapı arttıkça artmaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarıyla üretilen SLM çubuk elemanların (a) dikey çubuk eleman çapına, (b) çubuk eleman oryantasyonuna göre boyutsal sapması

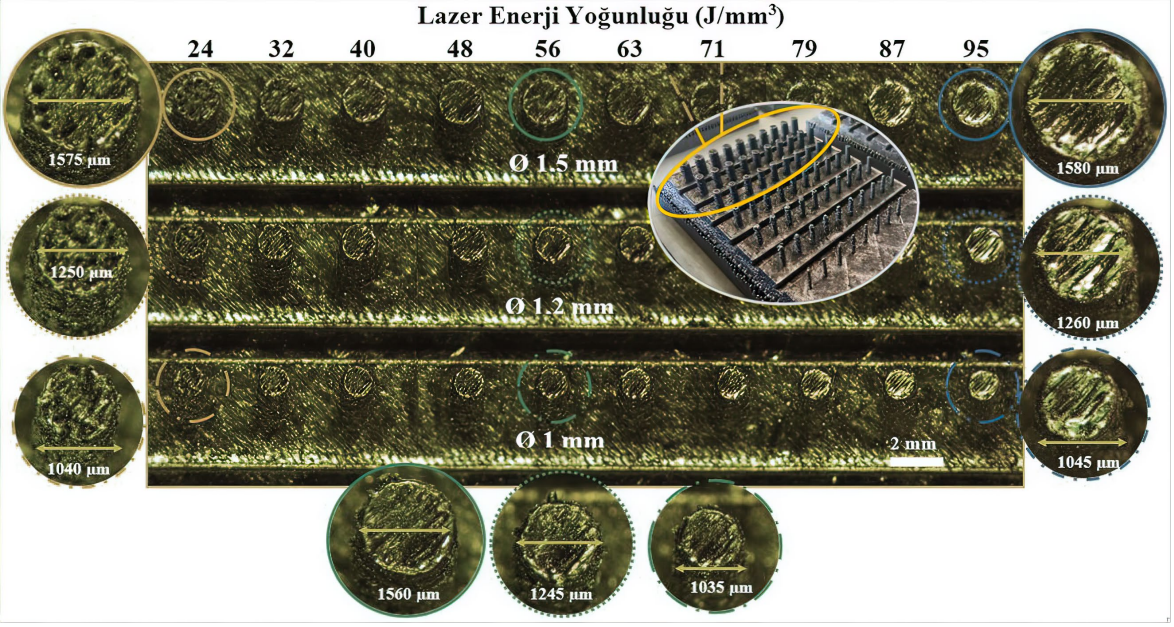
Resim 4.9'da görüldüğü üzere tarama çizgileri 45° açıyla yönlendirilmiştir. Lazer enerji yoğunluğu azaldıkça tarama yollarının genişliği azalmaktadır. Bu tür süreksiz eriyik hatlar, üretim sırasında potansiyel kusurlara yol açmaktadır [156]. Öte yandan, daha yüksek lazer gücü, yüksek enerji girişi nedeniyle daha geniş erime hatlarına neden olur. Bu geniş hatlar üst üste binerek parça doğruluğunu azaltabilir.



Resim 4.9. SLM ile üretilen baskı yüzeyine dik çubuk eleman numunelerinin üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri

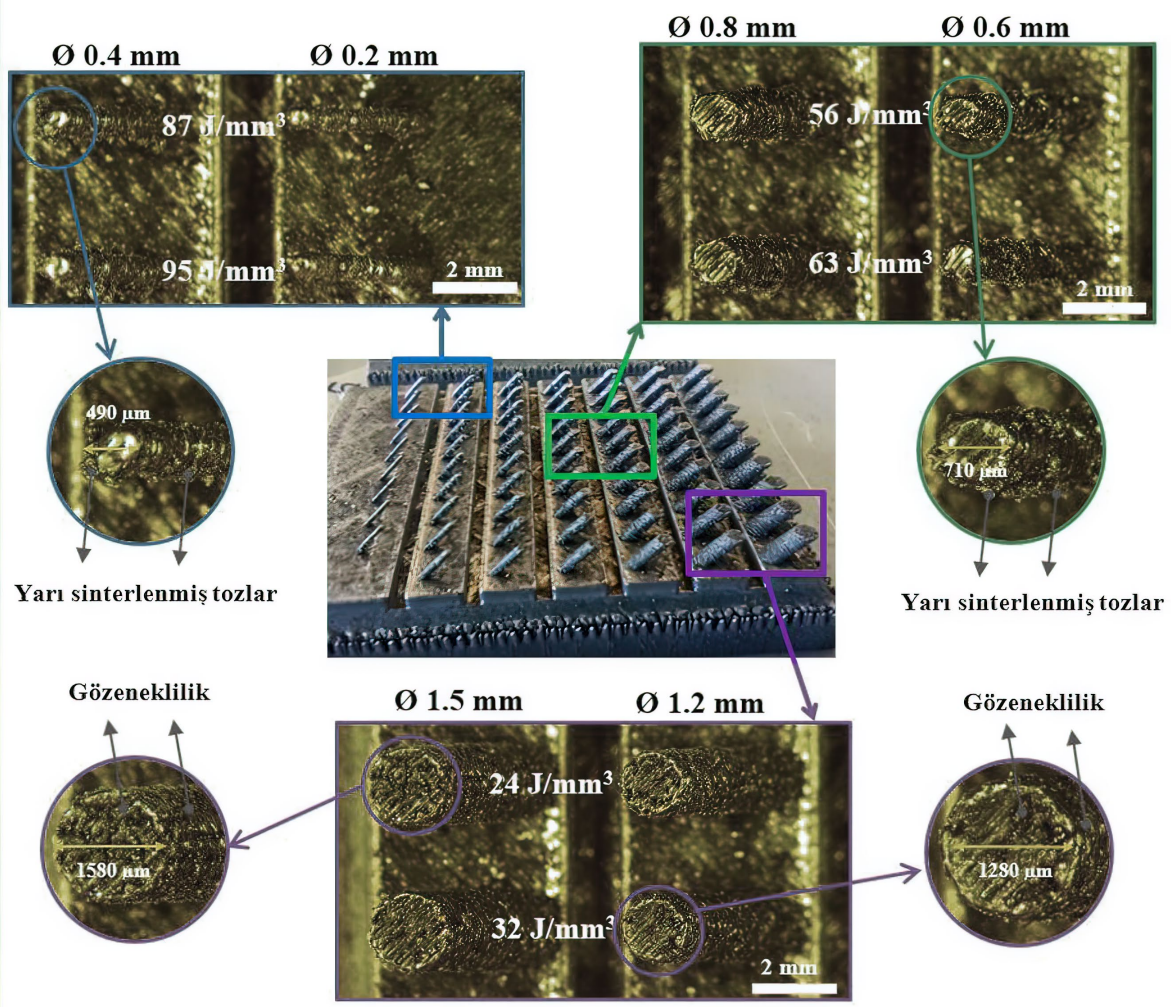
Resim 4.10'da ise yatay eksene 75° açılı SET3 parametreleri ile üretilen numunelerinin üst yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Lazer enerji yoğunluğunun düşük olduğu numune yüzeylerinde yoğun boşluklu yapı görülmesine karşın yapı çevrendeki yarı sinterlenmiş toz grupları nadiren görülmektedir. Bu nedenle düşük lazer enerji yoğunluğuyla üretilen bu numuneler düşük dayanım göstermelerine karşın yüksek çapsal doğruluğa sahiptir. Orta seviye lazer enerji yoğunluğunda (40-79 J/mm^3) ise gözenekliliğin azalmasına karşın çubuk eleman yüzeylerinde yarı sinterlenmiş toz varlığı görünmektedir. Düşük gözenekli yapıda iyileştirilmiş mekanik özellikler elde edilmesine karşın yüzeydeki yarı sinterlenmiş tozlar çapsal doğruluğu negatif yönde etkilemektedir [177]. Yüksek enerji yoğunluğunda ise yarı sinterlenmiş toz miktarının azalmasına karşın çapsal doğrulukta önemli miktarda düşmüştür. Bu duruma yüksek enerjili lazer ışınının çubuk eleman sınırları çevresindeki tozlarında unsur yüzeyine sinterlenmesi sebep oluştur. Aynı enerji yoğunluğu

ile üretilen numunelerde çubuk eleman çapı arttıkça boyutsal tamlığın da arttığı görülmüştür. Yine aynı enerji yoğunluğu ile üretilen numunelerde çubuk eleman çapı arttıkça numune yüzeyine tutunan yarı eriyik toz miktarının azaldığı da görülmektedir (Resim 4.10).



Resim 4.10. SLM ile üretilen baskı düzlemine 75° açılı çubuk eleman numunelerinin üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri

Resim 4.11'de ise baskı yüzeyi ile çubuk eleman arasında 45° açı bulunan numuneler incelenmiştir. Lazer yoğunluğuna bağlı gözeneklilik miktarlarının benzer eğilimde olması karşın açılı numunelerde çubuk eleman çevrelerinde daha fazla sinterlenmiş toz görünmektedir. Bu duruma üretim esnasında aşağı bakan yüzeyler altında bulunan ve numuneyi destekleyen tozların ısıl etkiyle çubuk eleman yüzeyine sinterlenmesi neden olmuştur. Yüzeye tutunan/sinterlenen yarı eriyik tozların yüzey pürüzlüğünü ciddi şekilde artırmaktadır [177]. Çubuk eleman çapı azaldıkça numune yüzeyine tutunan yarı eriyik toz miktarının da arttığı görülmektedir.



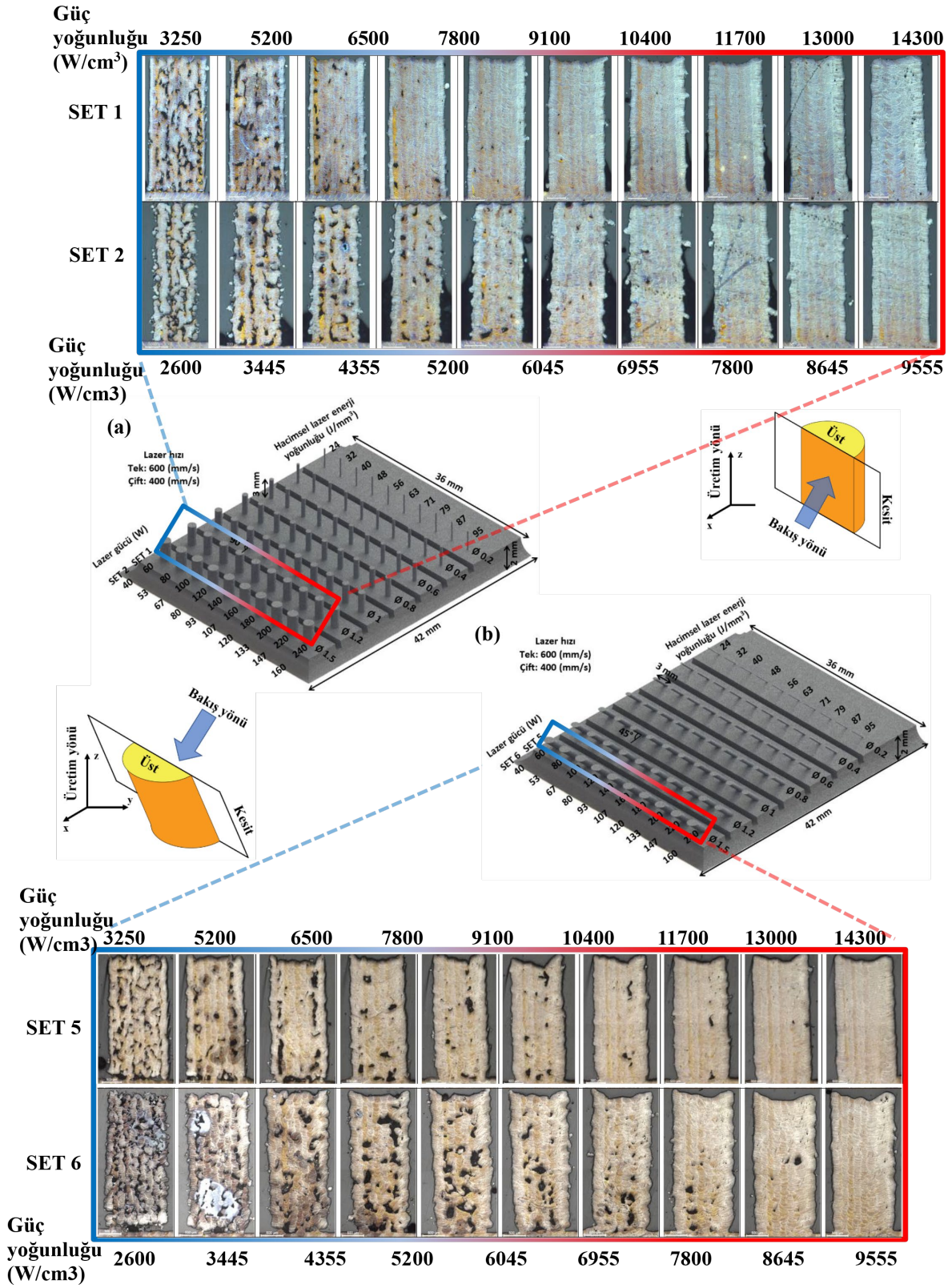
Resim 4.11. SLM ile üretilen baskı yüzeyine 45° açılı çubuk eleman numunelerinin üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri

4.3.2. Çubuk elemanların yüzey morfolojisi ve erime havuzu karakterizasyonu

Üretim parametrelerin ve baskı oryantasyonunun faz özelliklerine, faz dağılımlarına, tane sınırlarına ve eriyik havuz yapısına etkileri LEICA DMI500M ters mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Lazer gücü ve lazer tarama hızına bağlı değişen enerji yoğunluğunun yüzey morfolojisine etkisi Resim 4.12'de açıkça gözlemlenebilir. Genel olarak düşük enerji yoğunluklarında büyük çaplı metalurjik poroziteler görülürken enerji yoğunluğunun artmasıyla anahtar deliği veya pim deliği tipi küçük çaplı küresel gözeneklilikler görülmektedir. Lazer gücü ve lazer tarama hızı gibi farklı işlem parametrelerinin çubuk eleman morfolojisine etkisinin anlaşılması için benzer boyuttaki numuneler farklı parametre setleri kullanılarak üretilmiştir. Resim 4.12, lazer enerjisi yoğunlukları aynı olsa bile, lazer güç yoğunluğu ve tarama hızının numunenin yüzey morfolojisi ve eriyik havuzu özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu fark, lazer güç yoğunluğunun

bir sonucudur. Lazer güç yoğunluğu (W/mm²), lazer tarafından malzemenin birim alanına iletilen gücü ifade etmektedir ve malzemenin erime ve katılaşma davranışını belirlemektedir. Daha düşük lazer gücü yoğunluğu, katmanlar arasında eksik erimeye veya yetersiz füzyona neden olabilirken, daha yüksek bir lazer gücü yoğunluğu, aşırı erime nedeniyle çatlaklar, gözeneklilik ve çarpılma gibi kusurlara sebep olabilir. Bu nedenle özellikle çubuk eleman gibi ince elemanların üretiminde lazer enerjisi yoğunluğunun yanı sıra lazer gücü ve tarama hızı gibi parametrelerin de hassas olarak belirlenmesi gerekmektedir. Resim 4.12'de görüldüğü üzere gelişmiş yüzey morfolojisine sahip düşük gözenekli yapılar, SET 1 parametreleri ile üretilen çubuk elemanlar için 48 J/mm^3 ile 79 J/mm^3 enerji yoğunluğunda elde edilirken, bu aralık SET 2 parametreleri ile üretilen çubuk eleman numuneleri için 71 J/mm^3 ile 95 J/mm^3 olarak belirlenmiştir.

Baskı açısının yüzey morfolojisine etkisinin belirlenmesi için dikey numunelerle aynı işlem parametreleri kullanılarak üretilen açılı çubuk elemanlar incelenmiştir (Resim 4.12b). Farklı baskı oryantasyonlarında üretilen çubuk elemanlar eriyik havuzlarının lazer enerjisine maruz kalmasındaki farklılıkları nedeniyle ortaya çıkan termal gradyanlardan dolayı farklı yüzey morfolojileri sergilediği görülmüştür. Isı dağılımı ve katılaşma oranları parçanın geometrisine ve yönüne bağlı olarak değiştiğinden, boyut ve şekil gibi eriyik havuzu özelliklerinin de baskı oryantasyonundan etkilendiği gözlemlenmiştir. Açılı çubuk elemanlar, ısıl dağılım, termal gradyan ve lazer-malzeme etkileşim alanı gibi çeşitli faktörler nedeniyle de dikey çubuk elemanlara kıyasla daha yüksek gözeneklilik ve boyutsal sapma sergilemektedir. Açılı numunelerdeki daha büyük veya farklı şekilde dağıtılmış lazer-malzeme etkileşim alanı, daha az konsantre enerji girişine yol açarak, dikey numunelerdeki odaklanmış enerji girişine kıyasla füzyon etkilerinin başlaması için daha uzun süreler gerektirmektedir. Resim 4.12b'de görüldüğü üzere gelişmiş yüzey morfolojisine sahip düşük gözenekli yapılar, SET 5 parametreleri ile üretilen açılı (45°) çubuk elemanlar için 71 J/mm^3 ile 95 J/mm^3 enerji yoğunluğunda elde edilirken, SET 6 parametreleri ile üretilen açılı (45°) çubuk eleman numuneleri için enerji yoğunluğunun en az 87 J/mm^3 olması gerekmektedir.



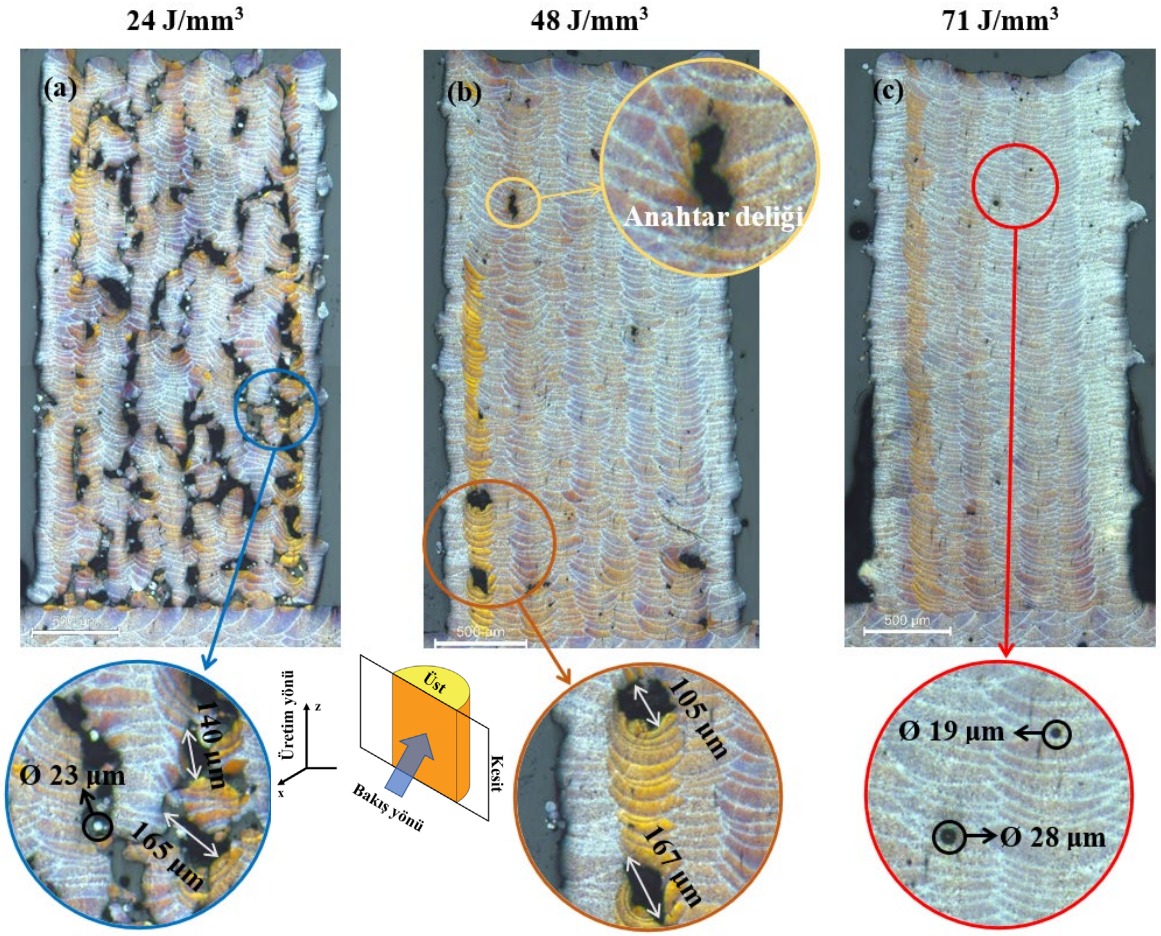
Resim 4.12. Farklı lazer enerji yoğunlukları ile üretilen çubuk eleman numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri (a) Dik açılı 1,2 mm (SET1) ve 1,5 mm (SET2) çaplı çubuk eleman kesiti, (b) 45° açılı 1,5 mm (SET5-6) çaplı çubuk eleman kesiti

SLM prosesinde genel olarak düşük lazer enerji yoğunluğuna bağlı olarak füzyon eksikliği tipi ve yüksek lazer enerji yoğunluğuna bağlı olarak anahtar/pim deliği tipi gözeneklilik olmak üzere iki farklı tip porozite görülmektedir (Resim 4.13b-c). Anahtar deliği tipi gözeneklilik, küçük bir bölge üzerindeki aşırı yüksek enerji girişinden kaynaklanmaktadır. Küçük bir alana kısa zamanda aşırı enerji girişi, yüksek derinlik ve dar genişliğe sahip eriyik havuzuna neden olmaktadır. Lazer ileri doğru hareket ettiğinde, sıvı metal hızla katılaşarak gaz fazının eriyik havuz içinde hapsolmasına ve böylece anahtar deliği tipi gözeneklilik oluşumuna sebebiyet vermektedir. Benzer şekilde oluşan pim deliği tipi porozitede ise aşırı enerji girişine maruz kalan eriyik havuzun tabanındaki gazlar kısa katılaşma süresi boyunca havuz dışına çıkamazlar ve bir gözenek kusuru haline gelirler [152]. Pim deliği tipi gözenekler genellikle küresel morfolojiye sahipken anahtar deliği tipi poroziteler genellikle "u" şeklindedir. Resim 4.13c'de yüksek enerji yoğunluğu (71 J/mm^3) ile üretilen dik açılı ve 1,5 mm çaplı çubuk eleman numunesinde meydana gelen pim deliği tipi gözeneklilik görülmektedir. 5 ile 30 µm çaplı gözenekler genellikle eriyik havuzun taban kısımlarında konumlanmıştır. Anahtar tipi gözenekliliğin numunenin üst kısımlarına gittikçe arttığı görülmektedir. Bu duruma lazer ışınımına ek olarak işlem boyunca katmanlarda biriken ve katmanların eklenmesiyle kümülatif artan sıcaklığın üst kısımlarında maksimum seviye çıkmasıyla eriyik havuz sıcaklığının daha yüksek olması neden olmaktadır. Ayrıca SLM ile üretim sürecinde ince unsurların çevresi atmosfer sıcaklığındaki geniş bir toz hacmi ile çevrilidir. Üretilen küçük çaplı parça ile bu geniş toz hacmi arasında gerçekleşen etkili ısı transferi parçanın hızlı soğumasına neden olmaktadır. Hızlı soğuma esnasında yüksek enerji nedeniyle çalkantılı eriyik havuz içindeki gazlar havuzdan kaçamayarak anahtar/pim deliği tipi poroziteye sebep olmaktadır [152].

Füzyon eksikliği kaynaklı porozite ise birim alandaki enerji girişinin yetersiz olduğu durumlarda toz parçacıklarının yeterli eriyememesinden dolayı meydana gelmektedir. Füzyon eksikliği tipi poroziteler temel olarak lazer enerji yoğunluğunun bir sonucudur. Öte yandan lazer ışınının yanlış odaklanması, uygun olmayan toz yatağı hazırlığı veya çok büyük toz partiküllerinin kullanılması da füzyon eksikliği kaynaklı poroziteye neden olmaktadır [178]. Füzyon eksikliği tipi poroziteler anahtar/pim deliği tipi poroziteye nazaran daha büyük ve düzensiz şekildedirler. Resim 4.13a ve Resim 4.13b'de sırasıyla 24 J/mm^3 ve 48 J/mm^3 enerji yoğunluğu ile üretilen dik açılı ve 1,5 mm çaplı çubuk eleman numunelerinde meydana gelen füzyon eksikliği tipi gözeneklilik görülmektedir. Füzyon eksikliği tipi gözeneklilik genellikle kontur ile tarama desenin kesişim noktalarında meydana gelmiştir

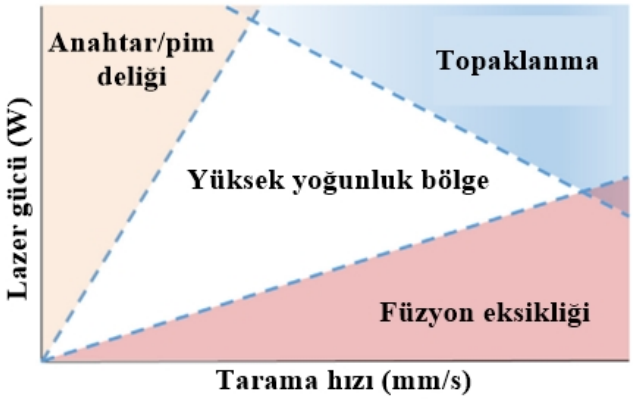
(Resim 4.13b). Bu duruma dairesel yol izleyen kontur tarama sonrasında kontur içerisinde kalan tozların lineer olarak eritme sürecine başlama anında ani lazer tepe gücünün elde edilememesi neden olmuş olabilir. Lazer tepe gücünün elde edilemediği geçiş bölgelerindeki yetersiz enerji yoğunluğu nedeniyle eritilememiş tozlar füzyon eksikliği tipi gözeneklilik ve topaklanmaya neden olurlar. Lazer enerji yoğunluğu artırılarak ya da tarama başlangıç noktasının kontur üstüne gelecek şekilde bir miktar ötelenmesiyle porozite boyutu ve miktarı önemli ölçüde azaltılabilir [152]. Katmanların eklenmesiyle biriken ve kümülatif olarak artan sıcaklık, erime için gerekli sıcaklığın sağlanmasına katkıda bulunur, böylece füzyon tipi gözenekliliğin yoğunluğunu ve boyutunu çubuk elemanın üst katmanlarına gittikçe azalmasına neden olur [179].

Resim 4.13a'da görülen düşük enerji yoğunluğu (24 J/mm^3) ile üretilen dik açılı ve 1,5 mm çaplı çubuk eleman numunesinde ise füzyon eksikliğine bağlı olarak önemli miktarda porozite görülmektedir. Eriyik havuzunun şekli ve örtüşen desenler nedeniyle, füzyon eksikliği kusurları hilal şeklinde olma eğilimindedir [180]. Bu tip porozite yapıları içerisinde sinterlenmemiş toz varlığı da tespit edilmiştir. Diğer taraftan ilgili numunede füzyon eksikliğine ek olarak topaklanma gibi gözenekliliğe neden olan yapı kusurları da görülmektedir. Topaklanma (İng. balling) fenomeni SLM yönteminde metal tozların düzensiz bir şekilde erime ve katılaşmasının görüldüğü durumlarda homojen sinterlenmeyen tozların adacıklar oluşturarak gözenekliliğe neden olan bir olgudur [181]. Topaklanma; lazer gücü, tarama hızı, üretim atmosferi ve malzeme özelliği gibi faktörlerin bir kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Özellikle enerji giriş seviyesinin düşük olduğu durumlarda lazerin etki ettiği üst tabakadaki enerji alt tabakalara yeterli miktarda nüfuz edemez. Yüzey gerilmeleri, düşük viskozite ve eriyik yüzeyin katı alt tabakayı ıslatmaması durumunda katmanlar arasındaki yetersiz bağlanma meydana gelerek topaklanmalara neden olur. Ayrıca yüksek enerji girişinin olduğu durumlarda katı toz parçacıkları üzerine sıvı metalin sıçraması nedeniyle de topaklanmalar meydana gelebilir [182]. Topaklanma nedeniyle oluşan gözeneklerin boyutu (200 μm kadar) pim deliği tipi gözeneklere (30 μm kadar) nazaran daha büyüktür. Bu nedenle topaklanma kaynaklı poroziteler parçanın yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özelliklerini negatif etkilemektedir.



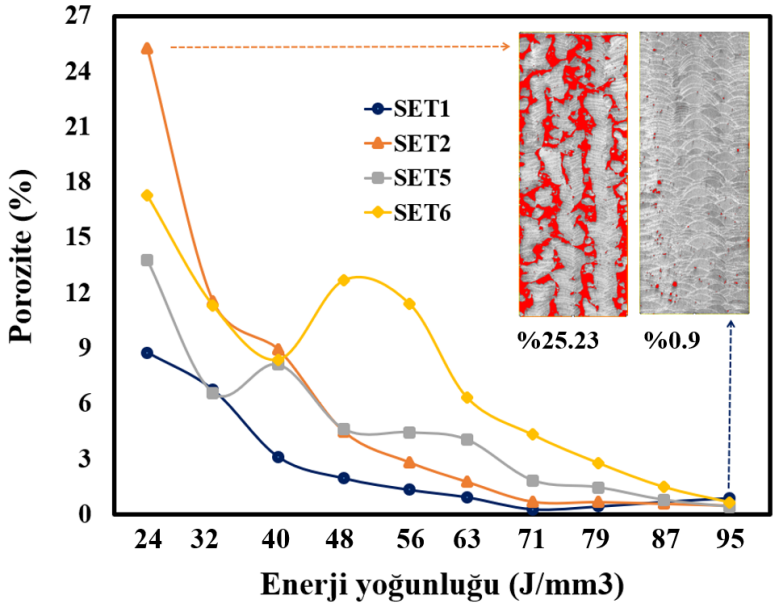
Resim 4.13. Dik açılı ve 1,5 mm çaplı çubuk eleman numunelerde lazer enerji yoğunluklarına (a) 24 J/mm^3, (b) 48 J/mm^3, (c) 71 J/mm^3 bağlı olarak değişen yapısal kusurlar ve porozite tipleri

SLM ile üretilen parçalarda lazer gücü ve tarama hızının yapısal kusurlar ve porozite tipine olan ilişkisi Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Bu ilişki koşulları malzeme ve baskı ortamının yanı sıra lazer spot çapı, tarama aralığı gibi diğer üretim parametrelerine de bağılıdır. SLM ile üretilen ince unsurlardaki topaklanma ve gözeneklilik miktarı lazer gücü, tarama hızı ve katman kalınlığı gibi üretim parametrelerinin optimizasyonu ile önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca çalışmada düşük enerji yoğunluğuna sahip çubuk elemanların üretim ve ardıl işlem prosesleri esnasında deformasyonlara ve kırılmalara karşı daha hassas oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Baskı parametrelerinin gözenekliliğe etkileri. (Referans [180]'den alınarak tekrar düzenlenmiştir)

Çubuk eleman numunelerine ait gözeneklilik oranları mikroskop kesit görüntülerinden ImageJ yazılımı kullanarak elde edilmiştir (Şekil 4.12). Artan enerji yoğunluğu ile gözenekliliğin genel olarak azaldığı görülmektedir. Düşük enerji yoğunluğu ile üretilen numunelerde füzyon eksikliği kaynaklı büyük ve yoğun porozite görülmektedir. Aşırı enerji yoğunluğunda ise anahtar/pim deliği tipi nispeten küçük küresel poroziteler oluşmaktadır. Düşük lazer gücü ve düşük tarama hızına sahip çift sayılı parametre setleri ile üretilen numunelerde ise yüksek lazer gücü ve yüksek tarama hızına sahip tek sayılı parametre setlerine nazaran daha yüksek oranda gözeneklilik gözlemlenmiştir. Ayrıca açılı setlerin (SET 5 ve SET 6) porozite oranında enerji yoğunluğuna bağlı süreksizlikler görülmektedir. Bu durum, çubukların yerleşim açısının, lazer ışını ile toz yatağı arasındaki etkileşim mekanizması ve lazer ışının nüfuziyet alanının belirlenmesinde önemli rol oynayarak erime ve soğuma süreçlerini etkilediğini ve dolayısıyla morfolojik süreksizliklerine neden olduğunu göstermektedir. SET 1 parametreleri ile üretilen numunelerde gözenekliliğin 71 J/mm^3 enerji yoğunluğundan sonra anahtar/pim deliği tipi poroziteye bağlı olarak arttığı görülmektedir. SET 2 parametreleri ile üretilen numunelerde minimum gözenekliliğe ise (%1'den az) 71-85 J/mm^3 enerji yoğunluğu değerlerinde ulaşılmıştır.



Şekil 4.12. Farklı işlem parametreleri ve çubuk eleman oryantasyonları ile üretilen çubuk eleman numunelerinde enerji yoğunluğuna bağlı porozite değişimi. Kırmızı alan poroziteyi ifade etmektedir

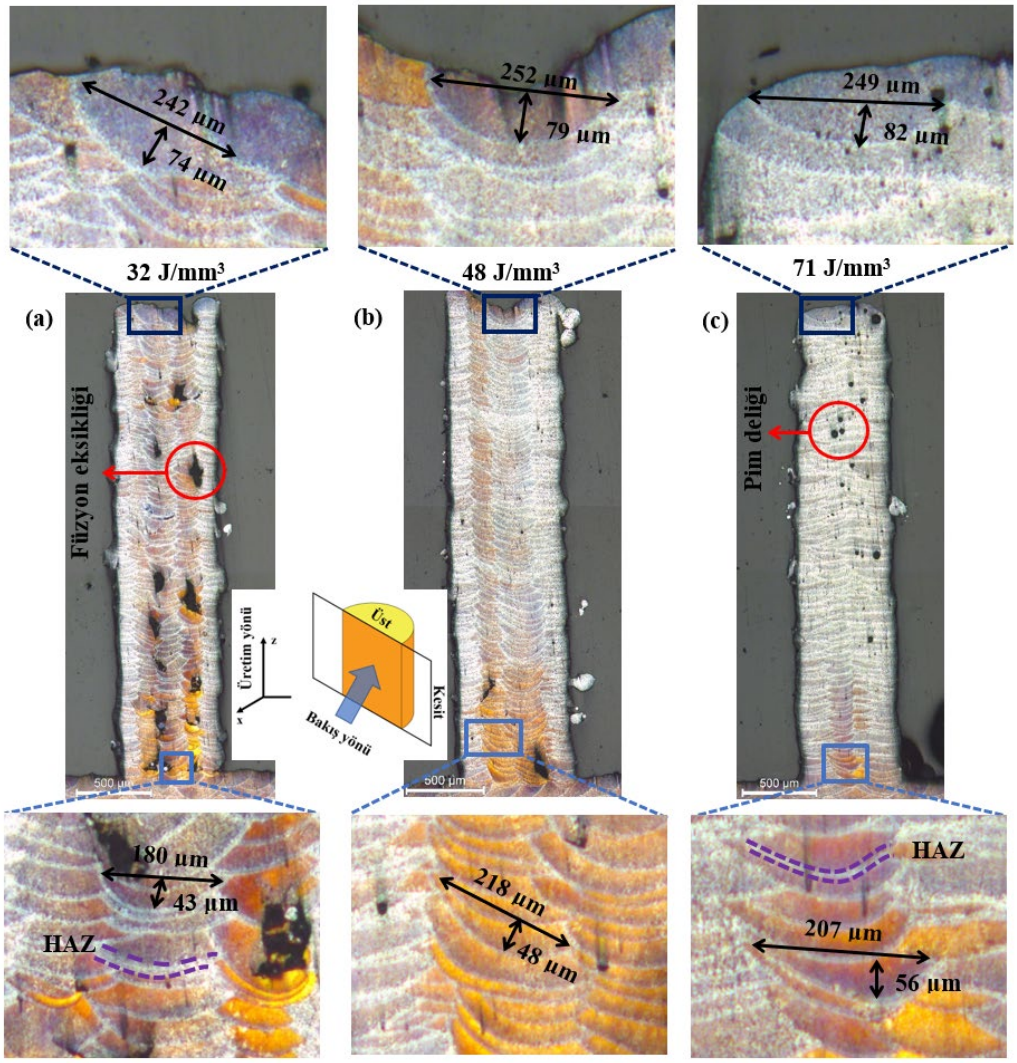
SLM prosesinde ısıl girdi eriyik havuzunun yapısını etkileyen önemli bir parametredir. Eriyik havuz yapısı ise üretilen parçaların geometri, mikroyapı ve mekanik özelliklerini etkileyen unsurlardan biridir. Özellikle çubuk elemanlar gibi küçük hacimli ince unsurların üretiminde toz yatağındaki termal dağılım, faz ve porozite morfolojisinin belirlenmesinde etkin rol almaktadır. Düzensiz termal dağılım; erimemiş toz yapışmaları, iç boşluklar, çatlaklar ve şekil düzensizlikleri dahil olmak üzere makro ve mikroyapısal kusurların oluşmasına neden olmaktadır [183,184]. Bu kusurlar parçanın mekanik özelliklerini ve boyutsal tamlığını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle geliştirilmiş mekanik özelliklere ve yüksek geometrik doğruluğa sahip ince unsurların üretilebilmesi için eriyik havuz şekli ve boyutunun optimize edilmesi gereklidir. Beuth vd., eriyik havuzu boyutunu tahmin etmek için süreç haritaları geliştirmiş ve bu özellikleri tarama hızı ve gücüyle ilişkilendirmiştir [185]. Ayrıca eriyik havuzlarının yetersiz örtüşmesinden kaynaklanan gözenekliliği tahmin etmek için geometri tabanlı simülasyon modelleri de oluşturulmuştur [178].

Resim 4.14'te farklı lazer enerji girdileri ile üretilen dik açılı 0,6 mm çaplı çubuk eleman numunelerin eriyik havuz boyutu ve şekli görülmektedir. Eriyik havuzlarının genişliği ve derinliği mikroskop görüntülerinden ölçülmüştür. Eriyik havuz yapı bileşenlerinin ölçüm yöntemi Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Resim 4.14'te görüldüğü gibi enerji yoğunluğunun

(J/mm^3) artmasıyla eriyik havuz derinliği artmaktadır. Işınımın etkisinin yanı sıra Marangoni gibi akışlarda yüzeyden içeriye doğru taşınımla ısı iletebilir. Eriyik havuz genişliği ve yarım ay geometrisi ise gauss dağılımlı ısı akısı etkilerine bağlı olarak şekillenmektedir. Gauss ışın dağılımı lazer gücü ve lazer spot çapına bağlı olarak (Eş. 4.3) belirlenmektedir.

$$I_{(r,0)} = \frac{2P}{\pi {w_0}^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{{w_0}^2}\right) \tag{4.3}$$

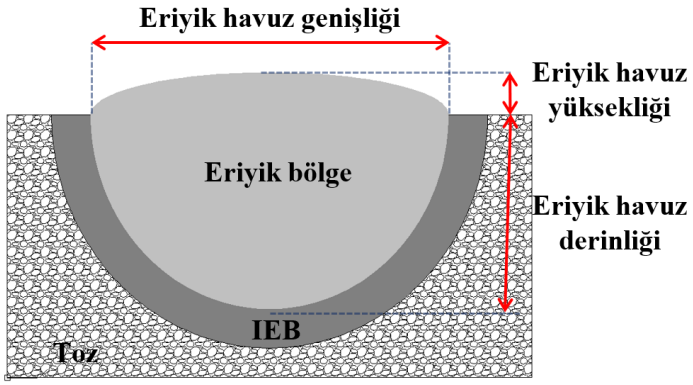
Bu dağılımında lazer ışının tam orta noktasında maksimum ısı enerji yer alırken bu enerji merkezden uzaklaştıkça eksponansiyel azalmaktadır. Boşluksuz ve mukavim katı parçaları elde etmek için yeni katmandaki eritilen bölgenin bir önceki katmandaki katılaşmış eriyik havuza yapısına bir miktar nüfuz etmesi gerekmektedir (Resim 4.14).



Resim 4.14. SET 1 işlem parametreleri ile üretilmiş 0,6 mm çaplı dik açılı SLM çubuk eleman numunelerinin lazer enerji yoğunluğuna bağlı eriyik havuz büyüklükleri ve şekli

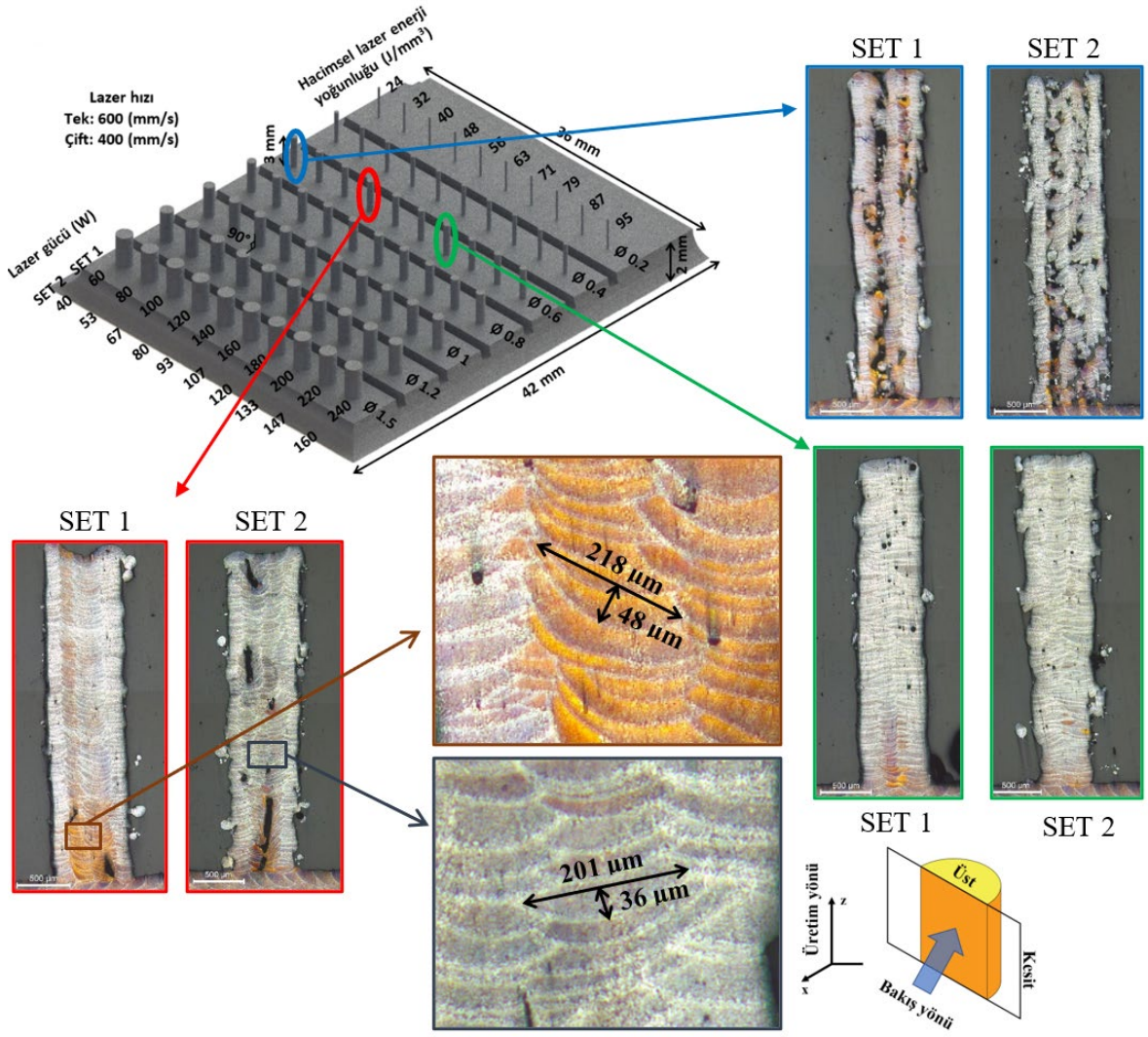
Çalışmada, gözenekliliği azaltmak için tarama desenleri arasındaki mesafe (0,112 mm) lazer spot çapından (0,140 mm) küçük olarak belirlenmiştir. Bu durum ayrıca eriyik havuz genişliğine de etki etmektedir. Artan enerji yoğunluğu ile birlikte eriyik havuzu büyüme eğilimindedir. Lazer gücünün 80W ve tarama hızının 600 mm/s olduğu durumda (hacimsel enerji yoğunluğu 32 J/mm^3) eriyik havuzunun genişliği ve derinliği numune iç kısımlarında sırasıyla 180 µm ve 43 µm, en üst katmanda ise sırasıyla 242 µm ve 74 µm olarak ölçülmüştür. Düşük enerji yoğunluğunda elde edilen eriyik havuzunun derinliği, katman kalınlığının (30 µm) iç katmanlarda 1,4 katına en üst katmanda ise 2.5 katına kadar çıkmıştır. Bu nedenle katmanlar birbirine tutunabilmesine karşın özellikle alt ve orta katmanlar arasında tamamlanmamış erime bölgeleri görülmüştür (Resim 4.14a). Artan enerji yoğunuyla (71 J/mm^3) birlikte elde edilen eriyik havuzunun derinliği artmakta ve erimemiş bölge miktarı azalmaktadır. Fakat bu durumda derin ve yüksek enerjili eriyik havuzu anahtar deliği ve pim tipi porozitelere sebep olmaktadır (Resim 4.14c). Resim 4.14'b de görülen lazer gücünün 120W ve tarama hızının 600 mm/s olduğu durumda (enerji yoğunluğu 48 J/mm^3) ise eriyik havuzunun genişliği ve derinliği numune iç kısımlarında sırasıyla 218 µm ve 48 µm, en üst katmanda ise sırasıyla 252 µm ve 79 µm olarak ölçülmüştür. Yüksek enerji yoğunluğunda elde edilen eriyik havuza nazaran daha geniş ve daha az derin olan bu çubuk elemanda anahtar deliği, topaklanma ve füzyon eksikliği gibi kusurlar nedeniyle oluşan porozitelerin etkisi daha az görülmektedir. Kritik lazer enerji yoğunluğu değerinden (48 J/mm^3) sonra artan enerji yoğunluğuyla eriyik havuz derinliğinin lineer olarak artmasına rağmen havuzun genişliğinin azaldığı görülmüştür (Resim 4.14). Artan enerji yoğunluğu ile eriyik havuzun genişliği başlangıçta artmaktadır. Çünkü artan lazer gücü yoğunluğuna bağlı olarak genişleyen eriyik toz hacmi; yüzey gerilimi ve kılcal kuvvetler etkisiyle dışarı doğru hareket etme eğilimindedir. Bununla birlikte, belirli bir enerji yoğunluğunda, eriyik havuzunun genişliği kritik bir değere ulaşmaktadır. Bu eşiğin ötesinde anahtar deliği etkisi olarak bilenen derin ve dar bir kanal oluşmaktadır. Enerji yoğunluğu daha da arttıkça, anahtar deliği etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Yüksek enerji girdisi, eriyik havuz çevresindeki termal gradyanı artırarak daha büyük ısıdan etkilenen bölgeye neden olmaktadır. Ayrıca, anahtar deliği boyutuna bağlı olarak tutarsız erime ve katılaşma davranışları görülmektedir. Bu tutarsızlıklar, soğuma sırasında eşit olmayan büzülmeye ve kalıntı gerilmelere yol açarak nihai parçada çarpılmalara ve boyutsal sapmalara neden olabilir [186]. Enerji yoğunluğunun artmasıyla Marangoni gibi akış etkileri de daha yoğun görülmektedir. Marangoni etkisi, yüzey geriliminin bir gradyanı nedeniyle iki faz arasındaki bir arayüz boyunca kütle transferidir [187]. Daha düşük seviyedeki enerji yoğunluklarında

sıcaklığın alt katmanlara nüfuziyetinin nispeten az olduğu ve eriyik havuzun yüzeyde sığ ve geniş olduğu görülmüştür. Resim 4.14a'da görüldüğü gibi yetersiz enerji yoğunluğunda, daha küresel bir eriyik havuz formu elde edilmektedir. Bu, düşük sıcaklıktaki eriyik havuzun yüksek viskozitesi ve zayıf akışkanlığı ile ilişkilidir. Bu nedenle, düşük enerji yoğunluğuna sahip eriyik havuzları, yüzey gerilimini en aza indirmek için küresel bir formda katılaşmaktadırlar. Sonuç olarak, eriyik havuz geometrisi anlamında en optimum sonucun SET-1 parametreleri için 48 J/mm^3 lazer yoğunluğuna sahip çubuk elemanlarda elde edildiği söylenebilir.



Şekil 4.13. SLM yönteminde oluşan eriyik havuzun yapısı ve unsurları

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan farklı katmanlar ve tarama yolları arasında Isıdan Etkilenen Bölge (IEB, İng. Heat Affected Zone - HAZ) yapısı görülmektedir. Isıdan etkilenen bölge (IEB), malzeme özelliklerinin değiştiği fakat kesin bir erimenin olmadığı metalik alandır (Şekil 4.13). Isıdan etkilenen bölgede görülen malzeme özelliklerindeki bu değişiklikler düşük mukavemet, gevreklik, düşük korozyon direnci veya düşük tokluk gibi olumsuz mekanik özelliklere neden olabilir. Isıdan etkilenen bölge boyutu ısıl girdiye, etki süresine ve malzemenin termal difüzitesine bağlı olarak değişmektedir. Lazer gücünün artması ve tarama hızının azalması, ısıdan etkilenen bölgenin büyüklüğünü artırmaktadır [188]. Isıdan etkilenen bölge ve eriyik havuz yapıları lazer işlem parametreleri dışında toz büyüklüğü dağılımına, tozun küreselliğine ve akışkanlığına, üretim atmosferine ve toz serme sistemine de bağlı olarak değişmektedir [189]. Bu bölgelerin büyüklüğü, baskı sonrası ısıl işlem veya yüksek isostatik basınç (HIP) uygulanarak azaltılabilir [147]



Resim 4.15. Aynı lazer enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen farklı lazer güç yoğunluğu ve tarama hızları (SET 1, SET 2) ile üretilmiş dik açılı 0,6 mm çaplı SLM çubuk eleman numunelerinin mikroyapısının kıyaslanması

Resim 4.14, lazer enerji yoğunluğunun sadece lazer gücüne bağlı olarak değiştiği durumdaki (SET1 parametreleri) eriyik havuz yapılarını göstermekteydi. Farklı üretim parametrelerinin de enerji yoğunluğuna olan etkisinin gözlemlenebilmesi için aynı enerji yoğunluğunda fakat SET1 işlem parametrelerine nazaran daha düşük güç yoğunluğu ve tarama hızları kullanarak elde edilen (SET 2 parametreleri) çubuk elemanlara ait yüzey morfolojisi ve eriyik havuzu yapısı karşılaştırmalı olarak Resim 4.15'te verilmiştir. Düşük lazer enerji yoğunluklarında, SET 2 parametreleri ile üretilen numunelerde füzyon eksikliği kaynaklı porozitenin daha baskın olduğu görülmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu ile üretilen numunelerde ise SET 1 parametreleri ile üretilen yapılarda anahtar/pim deliği tipi gözenekliliğin daha yoğun olduğu saptanmıştır. Eriyik havuz yapısı incelendiğinde ise SET 1 parametreleri kullanarak elde edilen numunelerin eriyik havuz genişlikleri ve derinliklerinin SET 2 parametreleri

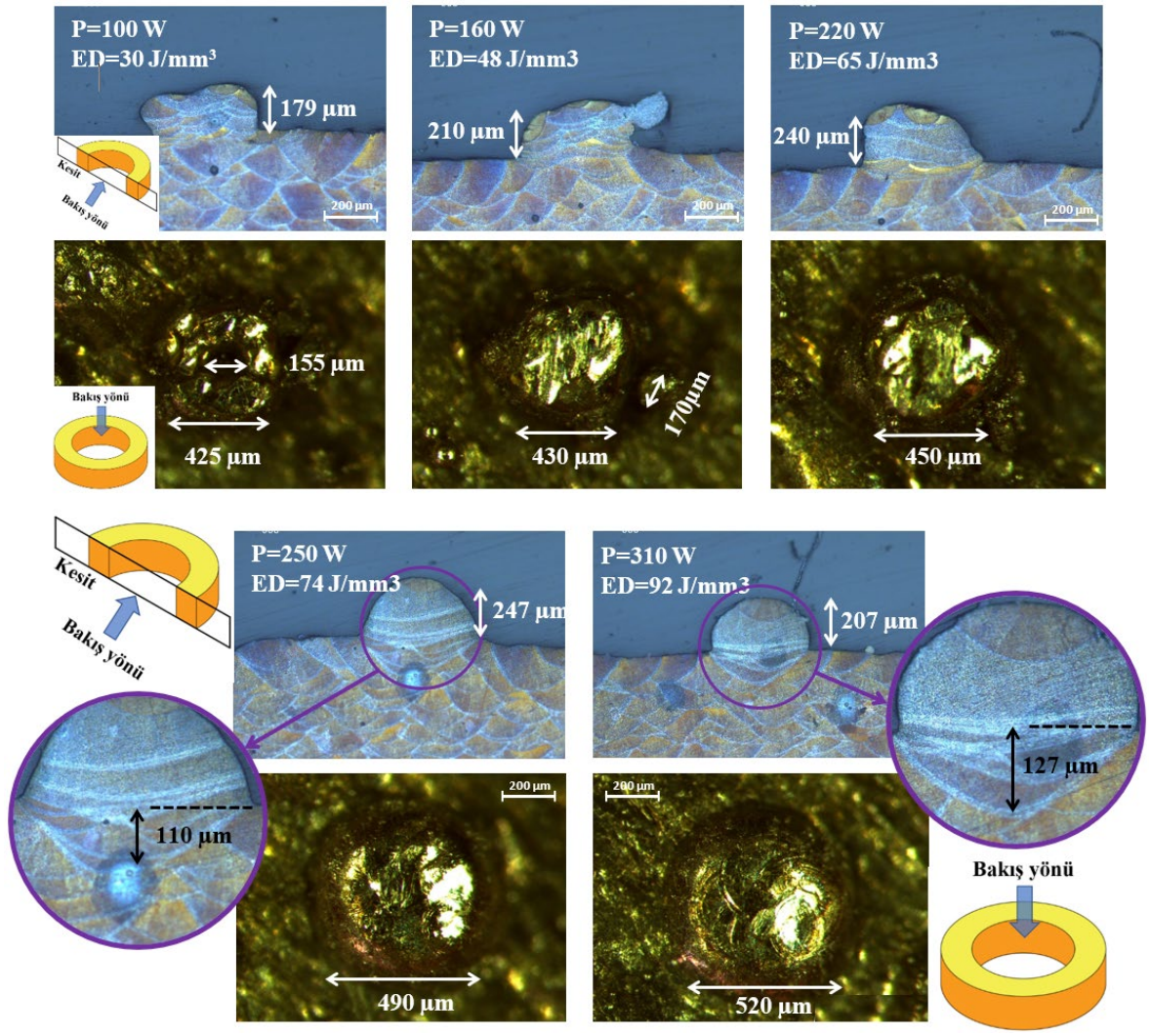
kullanarak elde edilene nazaran daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, aynı lazer enerji yoğunluğu ile üretilmesine rağmen SET 1 parametreleri ile üretilen numunelerde birim zamanda birim alana enerji girdisinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Farklı ısıl girdiler, üretilen numunelerin gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk ve makro/mikroyapı gibi özelliklerinde farklılıklara sebebiyet vermektedir. Bu durum, lazer enerji yoğunlukları aynı olsa dahi lazer gücü ve tarama hızının numunenin yüzey morfolojisi ve eriyik havuz karakteristiği üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle eklemeli imalat üretim parametrelerinden birinin (lazer gücü veya tarama hızı) sabit tutulduğu durumlarda, lazer enerji yoğunluğu değeri numunelerin yüzey morfolojisi ve eriyik havuz karakteristiğinin tahmin edilmesinde hızlı bir çözüm sunmasına rağmen, tek başına numunenin makro ve mikroyapı üzerindeki etkisini hassas bir biçimde belirlemede etkin bir yöntem olmadığı görülmüştür. Seçici Lazer Eritme (SLM) teknolojisinde, lazer güç yoğunluğu, malzemenin bir birim alanına iletilen güç miktarını ifade etmektedir. Genellikle milimetre kare başına watt (W/mm²) veya santimetre kare başına kilovat (kW/cm²) olarak ifade edilir. Lazer güç yoğunluğu, malzemenin erime ve katılaşma davranışının belirlenmesinde önem arz etmektedir. Düşük lazer güç yoğunluğu, katmanlar arasında eksik erime veya yetersiz füzyona neden olurken, yüksek lazer güç yoğunluğu aşırı erimeye neden olarak çatlak, gözeneklilik ve çarpılma gibi kusurlara yol açabilir. Bu durum lazer ışını malzeme etkileşimi mekanizmasıyla açıklanabilir. Lazer enerjisi malzemenin yüzeyi tarafından emilerek ısınmasına ve ardından erimesine neden olmaktadır. Lazer ışını malzemeye nüfuz etmeye devam ettikçe, malzemeyi buharlaşma noktasına kadar ısıtarak ablasyona yol açabilir. Yine lazerden malzemeye enerji aktarım hızı da zamanla değişmektedir. Lazer ışını malzemeye nüfuz ettiğinde katı fazdan sıvı faza geçen malzemenin ışın absorpsiyonu artarak enerji aktarım hızını yükseltmektedir [190]. Diğer bir yandan lazer gücü, etkileşim sırasında malzemeye iletilen enerji miktarını belirlediğinden, lazer/malzeme etkileşiminde kritik öneme sahiptir. Lazer gücünün yüksek olması durumunda iletilen aşırı enerji tozun buharlaşmasına ve ardından katılaşma sırasında parça içinde gaz ceplerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, nihai parça yoğunluğunda ve mekanik özelliklerinde azalmalara neden olmaktadır. Ayrıca hızlı ısıtma ve soğutmaya bağlı olarak meydana gelen yüksek sıcaklık gradyanları, termal gerilmelere, çarpılmalara ve çatlamalara neden olarak nihai parçanın yapısal bütünlüğünü negatif etkilemektedir [189]. Diğer taraftan, düşük lazer gücü, metal tozunun tam olarak eritilememesine neden olabilir ve son ürünün yoğunluğunu azaltabilir. Güçlü bağ yapıları içermeyen düşük yoğunluklu yapı parçanın mekanik özelliklerinde azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca düşük enerji girişi

tozların topaklanmasına ve homojen eriyik havuzunun elde edilememesine bağlı olarak yüzey kalitesinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle istenen malzeme özelliklerine ve yüzey kalitesine sahip nihai ürünün elde edilmesi için lazer güç girdisinin optimize edilmesi gereklidir. Hacimsel lazer güç yoğunluğu denklemine (Eş. 4.1) göre enerji yoğunluğunun sabit tutması için lazer tarama hızı azaltılsa dahi düşük lazer gücü toz malzemenin erimesi/sinterlenmesi için gerekli enerjiyi sağlayamadığından yapısal hatalara sebebiyet vermektedir (Resim 4.15). Benzer şekilde yüksek hızlarda da yeterli lazer/malzeme etkileşim süresi sağlanmadığından benzer kusurlar görülebilir. Bu nedenle özellikle çubuk eleman gibi ince unsurların üretiminde lazer enerji yoğunluğunun yanı sıra lazer gücü ve hızı gibi parametrelerinde hassas bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Çalışmada SET 1 için en uygun enerji yoğunluğu değerinin 48 J/mm^3 olduğu görülürken SET 2 için bu değer 71 J/mm^3'tür. Bu durumda lazer tarama hızı 400 mm/s olan SET2 parametrelerinde gözenekliliği azaltmak için lazer gücü minimum 120 W olmalıdır. Diğer yandan 600 mm/s tarama hızına sahip SET1 parametrelerinde ise 120 W ve üzeri lazer gücü değerlerinde aşırı yüksek eriyik havuz sıcaklığı kaynaklı anahtar tipi poroziteler görülmektedir.

4.3.3. Delikli ince unsurların yüzey morfolojisi ve erime havuzu karakterizasyonu

Üretim parametrelerinin boyutsal doğruluğa, tane sınırlarına ve eriyik havuz yapısına etkilerinin hassas bir şekilde belirlenmesi için delikli ince unsurlar SLM yöntemiyle üretilmiştir. Resim 4.16'da delikli ince unsurlara ait üst ve kesit görünüşleri verilmiştir. Resimde görüldüğü üzere sadece en düşük enerji yoğunluğuyla (30 J/mm^3) üretilen numunede delikli geometri elde edilmiştir. Enerji yoğunluğu arttıkça küçük çapa sahip (Ø200 µm) delik içerisinde kalan tozlarında erimesiyle delikler kaybolmuştur. Bu nedenle bu tip küçük delikli çubuk eleman yapılarında delikli geometrinin elde edilmesi için lazer spot çapı küçültülmeli ve işlem parametreleri optimize edilmelidir. Ayrıca iç tarama deseni kullanılmayarak ısıl girdi miktarı azaltılabilir. Fakat iç tarama deseni kullanılmaması durumunda homojen erime ve katılaşma sağlanamadığından füzyon eksikliği, çarpılma ve pürüzlülük gibi kusurlar ortaya çıkmaktadır. Yine ince cidarlı yapının, düşük ve orta enerji yoğunluklarında silindirik geometrisini (Resim 4.16) koruduğu gözlemlenirken, artan enerji yoğunluğu ile bu geometri içi dolu yarı küre şeklini almaktadır. Bu duruma, artan lazer enerjisinin alt katmanda bulunan tozlara nüfuz ederek nispeten büyük eriyik havuzu oluşturması sebep olmuştur. Katılaşma esnasında sıvı fazdaki büyük eriyik havuzu, artan yüzey gerilimlerinin etkisiyle yüzey alanını en aza indirerek kubbe biçimli yapı halini

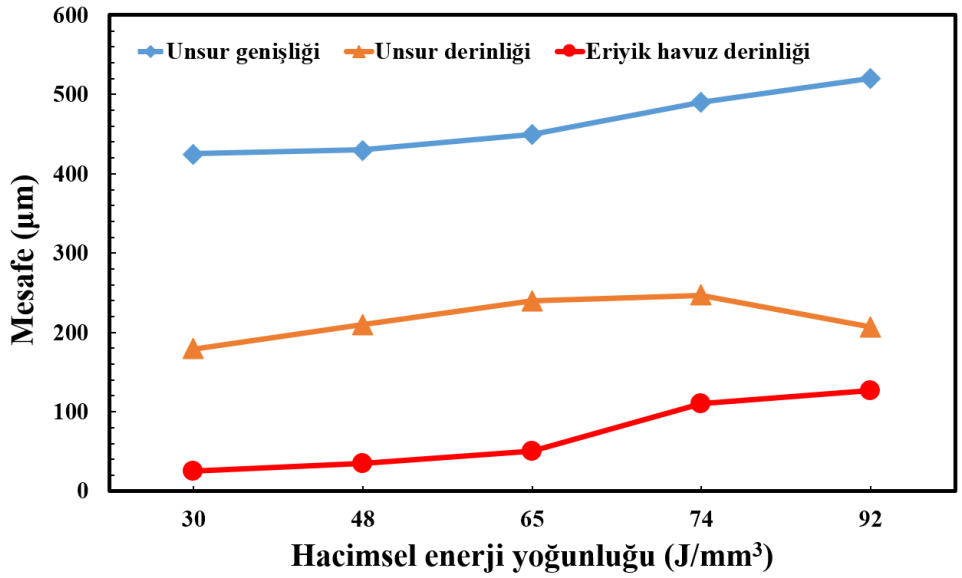
almaktadır [191]. Bu nedenle lazer enerji yoğunluğu arttıkça eriyik havuzu büyümekte ve ince delikli unsura ait genişlik artmaktadır. Genel olarak unsur yüksekliği de enerji yoğunluğuna bağlı olarak artmaktadır. Enerji yoğunluğunun daha fazla artmasıyla (92 J/mm^3 enerji yoğunluğunda görüldüğü gibi) eriyik havuzun yan yüzeylere doğru genişlediği ancak yüksekliğinin bir miktar azaldığı görülmektedir. Yüksek ısıl girdi unsuru çevreleyen tozların da erimesine neden olarak unsur hacmini artırmaktadır.



Resim 4.16. Delikli ince unsurun kesit ve üst yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri

Üretilen numune yüksekliğinin BDT verisinden (80 µm) 3 kata kadar fazla olduğu görülmektedir (Resim 4.16). Bu duruma homojen olmayan farklı toz büyüklükleri, sericinin (recoater) doğru hizalanamaması ve lazer enerji yoğunluğuna bağlı olarak çevredeki tozların ikincil sinterlenme durumları neden olmuş olabilir. Diğer taraftan tek yol lazer tarama ile üretilen numunelerde düşük lazer yoğunluklarında yoğun topaklanmalar (İng. balling) görülmektedir. Bu topaklanmalar parçanın şekil toleranslarını azaltmaktadır. Şekil 4.14'te

SLM yöntemiyle üretilen delikli ince numunelerin unsur boyutlarının lazer enerji yoğunluğuna bağlı değişimleri verilmiştir. Tek yol lazer tarama ile üretilen delikli yapıların eriyik havuzlarının genişliği ve derinliği enine kesitli mikroskobik görüntülerden ölçülmüştür (Resim 4.16). Eriyik havuzlarının ölçüm yöntemi Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Genel olarak, lazer enerji yoğunluğun artmasıyla eriyik havuzunun genişlediği ve derinleştiği dolayısıyla unsura ait ölçülerin arttığı görülmektedir (Şekil 4.14). Daha yüksek lazer güçlerinde (250W ve 310 W) eriyik havuzun taban plakasına derinlemesine nüfuz eden anahtar deliği şekilli morfolojik oluşumlar görülmektedir. Enerji yoğunluğunun 74 J/mm^3 olduğu işlem parametre setinde (lazer gücü 250 W ve tarama hızı 800 mm/s), eriyik havuzu boyutu 520 µm genişliğe ve 207 µm derinliğe kadar ulaşmıştır (Resim 4.16). Düşük lazer enerjili tek yollu taramada ise alt tabakada sığ bir erime derinliği ve üst tabakalarda alt tabaka ile homojen kaynaşmayan düşük geometrik doğruluklu topaklanmış yapılar görülmektedir. Enerji yoğunluğunun 30 J/mm^3 olduğu (lazer gücü 100 W ve tarama hızı 800 mm/s) düşük enerji yoğunluğu seviyelerinde ise alt tabaka üzerindeki ilk katmanın eriyik havuz derinliği yalnızca 25 µm olup, katman kalınlığının (30 µm) altındadır (Resim 4.16). Bu duruma, yetersiz lazer gücünden dolayı yüksek viskozite ve zayıf akıcılığa sahip düşük enerjili eriyik havuzun alt katmanlarla nüfuz edememesi neden olmuştur. Ayrıca yüzey gerilimlerinin etkisiyle de etkili füzyon elde edilememiştir. Bu nedenle sürekli iki katman arasında tamamlanmamış erime bölgeleri oluşmuştur. Bu bölgeler parçanın mekanik özelliklerini önemli miktarda azaltmaktadır.



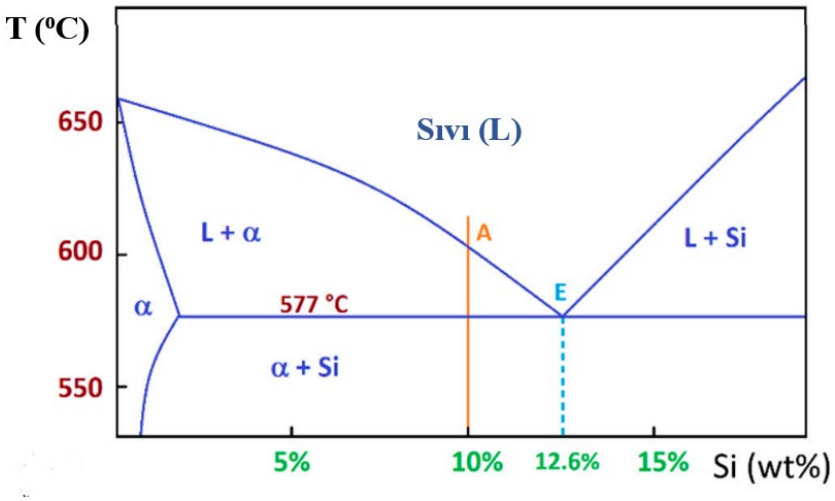
Şekil 4.14. Lazer enerji yoğunluğuna bağlı olarak delikli ince numunelere ait boyutsal ölçüler

4.3.4. Mikroyapı

Numune mikroyapısını daha ayrıntılı değerlendirmek için, numuneler Çizelge 4.4'te ayrıntılı olarak bahsedildiği gibi hassas kesilmiş, soğuk bakalite alınmış, zımparalanmış, parlatılmış ve dağlanmıştır. Çubuk eleman numunelerinin gözeneklilik, tane boyutu, faz ayrım bölgeleri ve faz dağılımları dahil olmak üzere mikroyapısı 20 kV elektron ışını voltajında Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Jeol JSM 6060 LV) kullanılarak 2.500x ila 7.500x büyütmede incelenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), çok çeşitli malzemelerin yüzey yapısını gözlemlemek ve analiz etmek için kullanılan güçlü bir araçtır. SEM, numunenin mikron altı ölçekte yüksek çözünürlüklü görüntülerini oluşturmak için odaklanmış bir elektron ışını kullanmaktadır [192]. Numunenin elementel kompozisyonu ise Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDS, IXRF Instruments) analizi ile tespit edilmiştir. EDS, SEM'den gelen yüksek enerjili elektronlarla bombardımana tutulan numuneden yayılan X-ışınlarını tespit etmektedir. Bu X-ışınları, numunede bulunan elementlerin karakteristik özelliklerini saptayarak incelenmekte olan materyalin elementel bileşiminin belirlenmesinde kullanılmaktadır [145]. Elementel bileşenlerin tespitinde yoğunluk faktörü dikkate alınmalıdır. SEM/EDS'de yoğunluk faktörü, numuneden saçılan/yayılan elektronların dedektörde üretilen görüntülerinin parlaklığını ifade etmektedir. Sinyalin yoğunluğu, tespit edilen elektronların sayısı ile orantılıdır. Daha yüksek yoğunluklu sinyaller genellikle daha parlak ve daha ayrıntılı görüntülere karşılık gelmektedir. SEM görüntüleri tipik olarak, daha parlak alanların daha yüksek sinyal yoğunluklarına karşılık geldiği gri tonlamalara sahiptir. Yoğunluk birimi "c/s", "saniye başına sayım" anlamına gelmektedir ve SEM detektörü tarafından birim zamanda tespit edilen elektron sayısını belirlemede kullanılmaktadır. Bu değer, ölçülen elementin miktarı ve analiz edilen bölgedeki bileşenin yoğunluğu ile ilişkilidir. Saniye başına yüksek sayım değerleri, daha büyük element konsantrasyonlarına işaret etmekte ve böylece malzemenin elementsel bileşiminin daha doğru bir şekilde belirlenmesine yardımcı olmaktadır [193].

Çubuk elemanların üretiminde AlSi10Mg alüminyum alaşım tozları kullanılmıştır. AlSi10Mg, yaşlandırmayla sertleşen, düşük yoğunluk (2,67 g/cm^3), iyi mekanik özellikler, mükemmel dökülebilirlik ve ısıl işlem görme özelliği ile karakterize eden bir alaşımdır [165,194]. Genel olarak, Şekil 4.15'te gösterilen AlSi10Mg'nin faz diyagramı, farklı koşullar altında malzemelerin davranışını tahmin etmek ve anlamak için değerli bir araçtır. Oda sıcaklığında, AlSi10Mg tipik olarak az miktarda silisyum ve magnezyum içeren katı

alüminyum çözeltisi formundadır. Sıcaklık arttıkça, alaşım faz değişimlerine uğramaya başlar (Şekil 4.15). Birinci faz değişimi, birincil α-alüminyum fazının ve α-alüminyum ile intermetalik bileşik Mg_2Si'nin ötektik karışımının oluşumuyla sonuçlanan bir ötektik reaksiyonun meydana geldiği yaklaşık 570 °C'de gerçekleşir [195]. Daha yüksek sıcaklıklarda, α-alüminyum fazı erir ve sıvı faza dönüşür. Yaklaşık 650 °C'de, α-alüminyum ve Mg_2Si fazları sıvı bir faza dönüşerek tek fazlı bir sıvı elde edilir. Bu sıvı, katı bir malzeme oluşturmak üzere soğutulabilir. Katılaşma sırasında sıvı soğur ve α-alüminyum fazı ve intermetalik bileşik Mg_2Si kristalleşmeye başlayarak iki fazlı bir katı malzeme oluşturur. Sıcaklık daha da düşürüldüğünde, iki fazlı katı malzeme, az miktarda silisyum ve magnezyum içeren tek fazlı bir katı alüminyum çözeltisine dönüşür [196]. Şekil 4.15'te gösterilen Al-Si faz diyagramı, AlSi10Mg'nin kısa bir katılaşma aralığına ($\Delta T \sim 40$ K) sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle AlSi10Mg eklemeli imalatta (Eİ) kullanılan en yaygın alüminyum alaşımıdır [151,197].

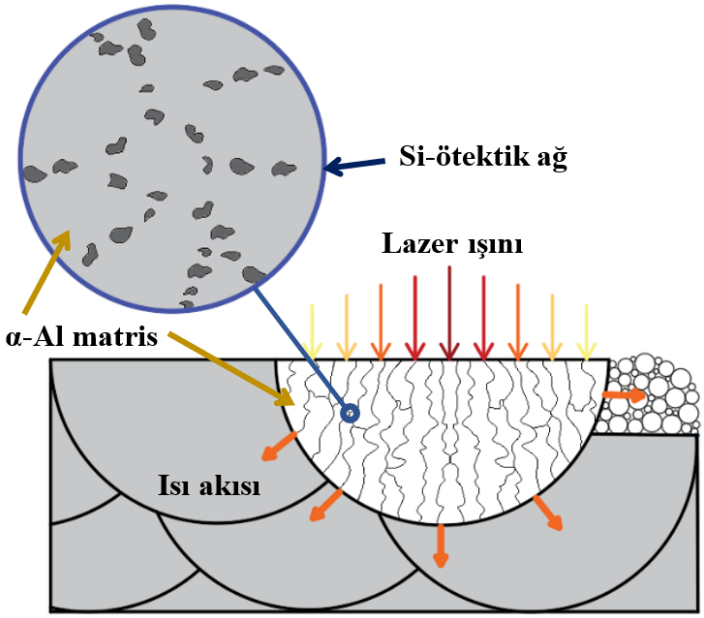


Şekil 4.15. Al-Si alaşıma ait faz diyagramı [195]

Alaşımda yer alan ağırlıkça %0,2 – 0,4 Mg içeriği, yaşlandırma ısıl işlemi ve/veya SLM işlemi sırasında ince ε-Mg_2Si fazının çökelmesine bağlı olarak çökelme sertleşmesi yoluyla alaşımın dayanımını artırmaktadır. Si ise alaşımın dökülebilirliği ve büzülme miktarını artırmak ayrıca mikroyapıyı çiçeksiden dendritik hale getirmek için eklenir [195, 198, 199]. SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların mikroyapısı SEM ile incelendiğinde gözlemlenmesi beklenen mikroyapısal özellikler/kusurlar şu şekilde sıralanabilir [200].

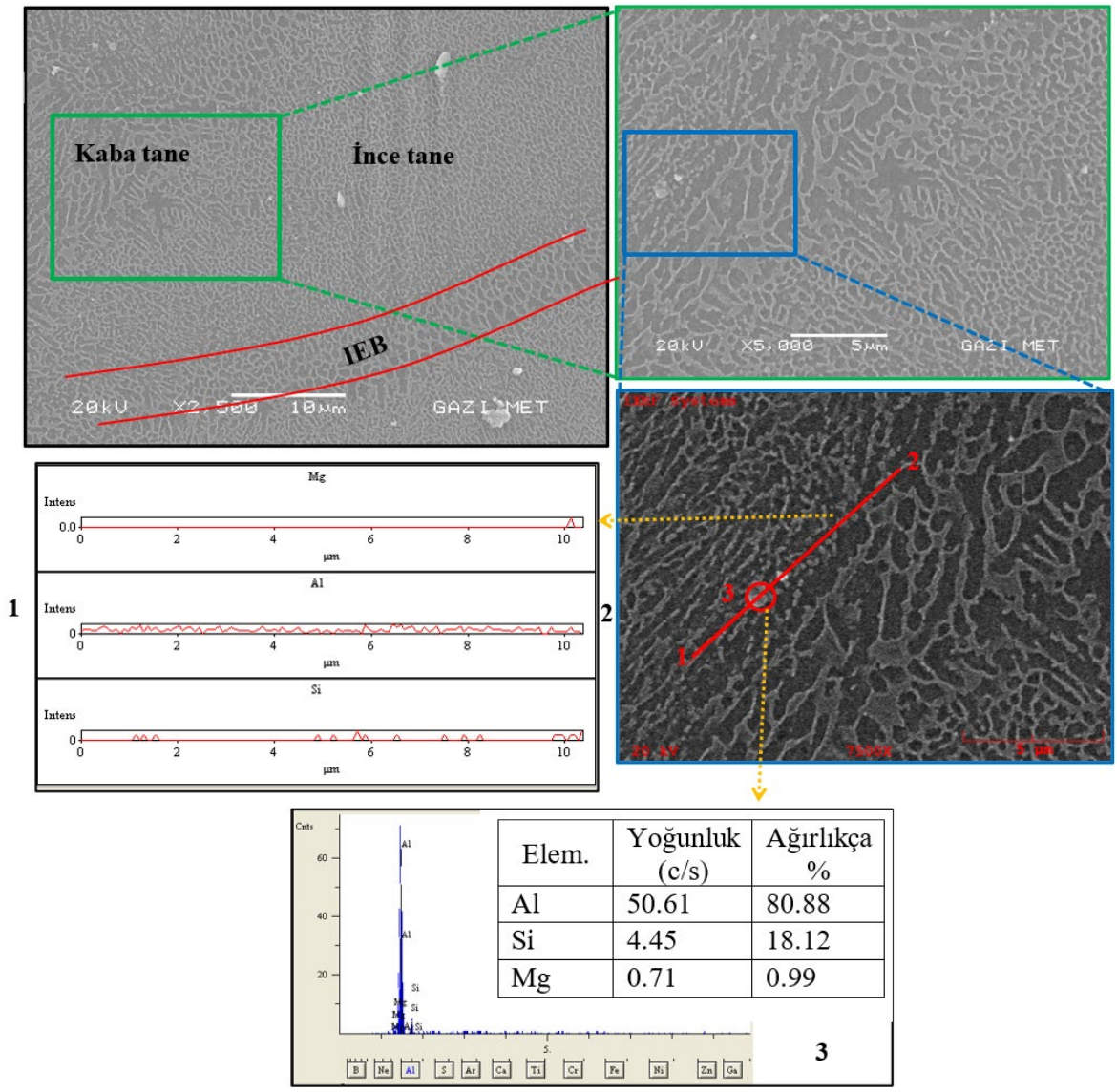
- Gözeneklilik: SLM ile üretilen AlSi10Mg parçaları, hızlı katılaşma ve soğuma hızları nedeniyle genellikle belirli bir miktarda gözeneklilik sergilemektedir. Bu gözeneklilikler yüksek lazer enerjisi nedeniyle anahtar ve pim deliği şeklinde küresel ve tekil olabileceği gibi düşük lazer enerjilerinde füzyon eksikliği kaynaklı birbirine bağlı büyük poroziteler de olabilir.
- İnce taneli yapı: SEM, mikro yapıdaki tanelerin boyutu ve dağılımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. SLM sırasındaki hızlı katılaşma süreci, malzemede ince taneli yapıya neden olmaktadır. Yine işlem parametrelerine bağlı olarak değişen kaba taneli yapılar ve ısıdan etkilenen bölgeler SEM kullanılarak belirlenebilir.
- Yüzey pürüzlülüğü*:* SLM ile üretilen parçaların yüzeyi, malzemenin katman katman birikmesi nedeniyle pürüzlü olabilir. SEM pürüzlülüğün kapsamını ve doğasını ortaya çıkarabilir.
- Homojensizlik: SLM işlemi, termal gradyanlar ve hızlı katılaşma nedeniyle bileşimde ve yapıda yerel farklılıklara neden olmaktadır. SEM ile homojensizliklerin varlığı ve bunların dağılımı belirlenebilir.
- Süreksizlikler: SLM ile üretilen parçalar, mekanik özelliklerini etkileyebilecek çatlaklar, gözenekler veya tane kusurları gibi süreksizliklere sahip olabilir. SEM, bu tür özelliklerin varlığını, boyutunu ve dağılımını ortaya çıkarabilir.

Şekil 4.16'da SLM yönteminde eriyik havuz katılaşma sürecinde oluşan mikroyapının şematik gösterimi verilmiştir. Eriyik havuzu merkezinin mikroyapısı, Al-matrisinde zengin bir ötektik silisyum ağının dağıtıldığı ince bir hücresel-dendritik yapı ile karakterize edilmiştir [158]. Mikro yapının dağılımı ve tane boyutu, eriyik havuz ve ısıdan etkilenen bölge (IEB) alanına bağlıdır. Eriyik havuzunun soğuması sırasında, birincil düzlemsel taneler katı ve sıvı fazlar arasındaki arayüzde çekirdeklenir ve büyür. Daha sonra, dendritler ısı akışının yönünü izleyerek uzanırlar [201]. Şekil 4.16'da büyütülmüş görsel son katılaşma adımındaki, kolon tanelerinin yönelimlerini ve Si-ötektik ağının dairesel alan içinde oluşumunu göstermektedir. Yapıda ayrıca yüzeyde füzyon eksikliğinden kaynaklanan gözeneklerle birlikte Al-Mg oksitlere rastlanabilir.



Şekil 4.16. SLM yönteminde eriyik havuz katılaşma sürecinde oluşan mikroyapının şematik gösterimi. α-Al matris, ötentik Si ağı tarafından sarılmıştır. (Referans [195]'den alınarak tekrar düzenlenmiştir)

Eriyik havuzun çevresinde Isıdan Etkilenen Bölge (IEB) yer almaktadır. Isıdan Etkilenen Bölge (HAZ), eriyik havuzu çevreleyen lazer ışınımından etkilenmiş ancak erimemiş veya kaynaşmamış alandır. Bu bölgede malzemede bir dizi mikroyapısal değişikliğe yol açan bir termal gradyan görülmektedir. Bu termal gradyan malzemenin mekanik özelliklerini etkileyebilen tane büyümesi, faz dönüşümleri ve kalıntı gerilmeler gibi mikroyapısal değişikliklerle karakterize edilir. Isıdan etkilenen bölgede Si ağının kısmen kırıldığı görülmektedir. Isıdan etkilenen bölgenin boyutu; lazer gücü, tarama hızı, malzeme özellikleri ve katman kalınlığı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. SLM ile üretilen parçanın mekanik özelliklerini iyileştirilmesi için genellikle ısıdan etkilenen bölgenin boyutunun küçültülmesi arzu edilir, ancak bu, SLM süreçlerinde zorlu bir görevdir. Isıdan etkilenen bölgenin boyutu lazer parametrelerinin optimizasyonu, katman kalınlığının azaltılması, ön ısıtma ve ardıl ısıl işlemler gibi yöntemlerle azaltılabilir [202]. Resim 4.17'de gösterilen alanda lazer enerjisi girdilerinin eksikliğine bağlı olarak azalan soğutma hızı nedeniyle kaba tane yapıları görülmektedir. Bununla birlikte, ısıdan etkilenen bölgedeki hücreler arası sürekli ağ yapısı silisyum fazın idiomorfik parçacıklara ayrılmasıyla kırılmakta ve kaba tanelere neden olmaktadır [203]. 80 Watt lazer gücü ve 600 mm/s lazer tarama hızı (lazer enerji yoğunluğu 32 (J/mm^3)) ile üretilen 0,8 mm çaplı dik açılı çubuk elemanın mikroyapısındaki ısıdan etkilenen bölge (IEB), gözeneklilik ve tane yapılarının SEM görüntüleri Resim 4.17'de verilmiştir.

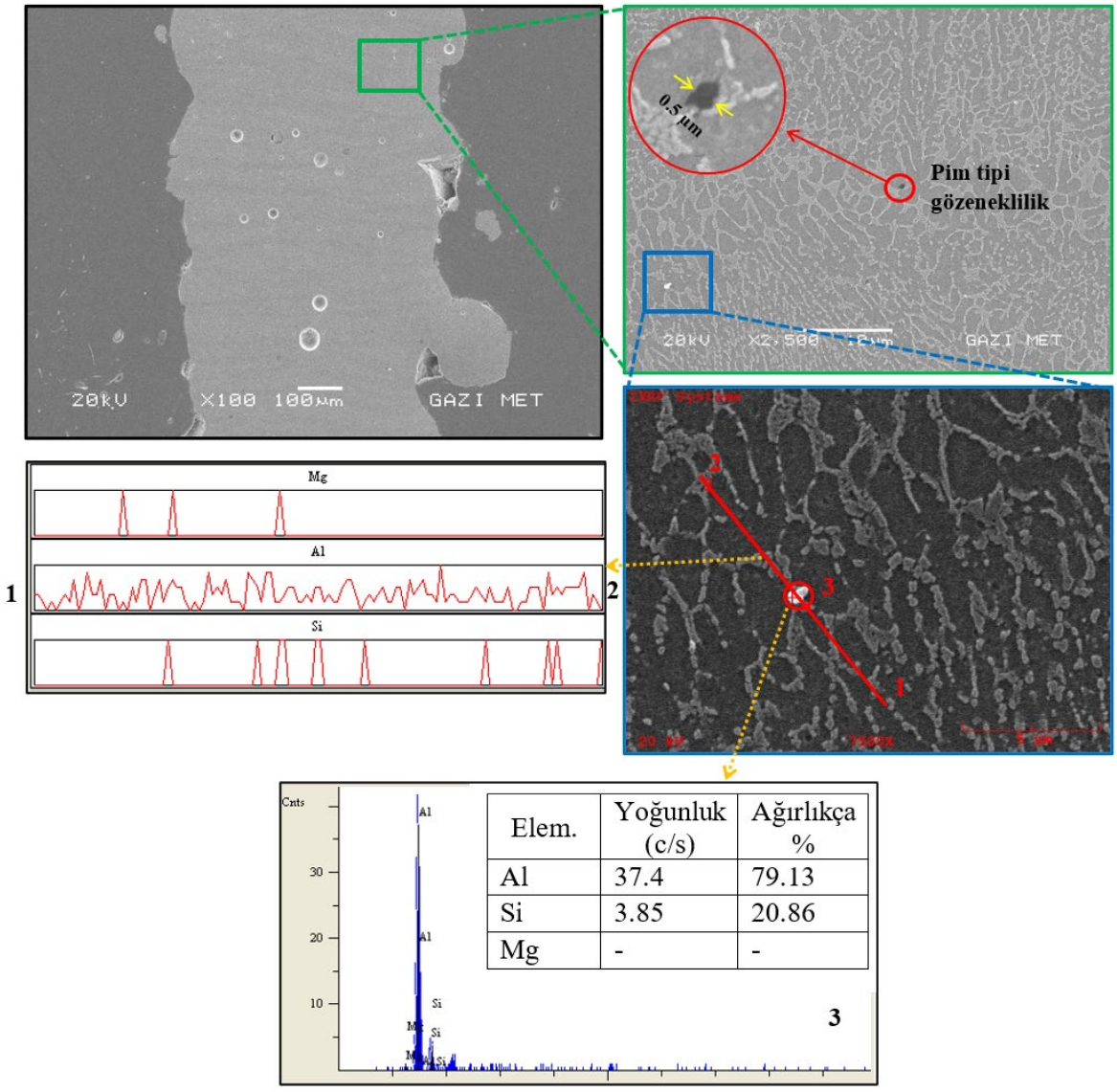


Resim 4.17. 80 Watt lazer gücü ve 600 mm/s lazer tarama hızı (lazer enerji yoğunluğu 32 (J/mm^3)) ile üretilen 0,8 mm çaplı dik açılı çubuk elemanın mikroyapısı

Resim 4.17'de gösterildiği gibi SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanlara ait mikroyapı, farklı şekiller ve boyutlardaki tanecikleri içermektedir. α-Al fazını çevreleyen ötektik Si ağı ince veya kaba hücresel yapılar oluşturmaktadır. Bu ağlar ince tane yapısından kaba tane yapısına doğru 0,4 µm ile 4 µm aralığında değişmektedir. Kaba tanelerin eriyik havuzu merkezinde oluştuğu ve eriyik havuzu sınırlarında bulunan IEB bölgesine doğru ilerledikçe inceldiği görülmüştür. Bu duruma eriyik havuzunun sınırlarından merkezine doğru gidildikçe katılaşma hızındaki değişimler neden olmuştur. Kaba taneler daha az tane sınırı barındırdığı için dislokasyon hareketi kolaylaşır, bu da mukavemet ve sünekliğin azalmasına neden olur. Diğer taraftan ince tanelere sahip yapılar Hall-Petch ilişkisine [204] göre genellikle daha yüksek dayanımı sunmaktadır. Mikroyapıdaki ince tane miktarı SLM baskı

parametreleri optimizasyonuyla veya lazer ile tekrar eritme [205] ve HIP gibi ardıl işlemlerle arttırılabilir [203].

EDS analizi sonuçları, ince bölgede kaba bölgeye göre daha fazla Si ve Mg elementi bulunduğunu göstermektedir. Katılaşma sırasında, katı-sıvı arayüzü eriyik havuzu boyunca hareket ederek numune boyunca soğuma hızında değişikliklere neden olmaktadır. Bu, homojen olmayan mikro yapılara ve farklı faz oluşumlarına yol açmaktadır. Genel olarak, soğutma hızı, eriyik havuzunun kenarlarında daha hızlıdır. Bu nedenle eriyik havuz sınır bölgelerinde çoğunlukla ince taneler oluşurken, eriyik havuz merkezine doğru gidildikçe yavaşlayan soğuma hızı nedeniyle kaba tane görülme sıklığı artmaktadır. Alüminyumdaki düşük çözünürlüğü nedeniyle katı-sıvı arayüzüne doğru ayrışma eğilimi gösteren silisyum, hızlı katılaşma esnasında mikroyapıdan ayrışarak ince taneli yapıların oluşmasını sağlamaktadır. Al-Si sistemi, soğuma esnasında sıvı fazın katı α-Al ve Si fazlarının bir karışımına dönüştüğü ötektik bir reaksiyon sergilemektedir. SLM ile üretim gibi soğuma hızının çok yüksek olduğu durumlarda, ötektik dönüşüm baskılanabilir ve bu da daha yüksek Si konsantrasyonuna sahip ince tanelerin oluşumuna yol açmaktadır. Ayrıca, SLM ile üretilen parçalardaki tane boyutu, süreçte kullanılan lazer parametrelerine bağlı olarak değişmektedir [206]. Örneğin, yüksek bir lazer gücü ve tarama hızı, hızlı bir katılaşma hızına ve daha küçük tane boyutuna yol açabilir. Bu nedenle, lazer parametrelerinin optimize edilmesi, nihai ürünün mikro yapısını ve tanecik boyutunu kontrol etmeye yardımcı olabilir. EDS sonuçları, Resim 4.17 ve Resim 4.19'da görüldüğü gibi, SLM ile üretilen çubuk eleman yapılarının proses parametrelerine bağlı olarak %75-%85 alüminyum, %15-25 silisyum ve %0,5-1,5 magnezyum içerdiğini göstermektedir.

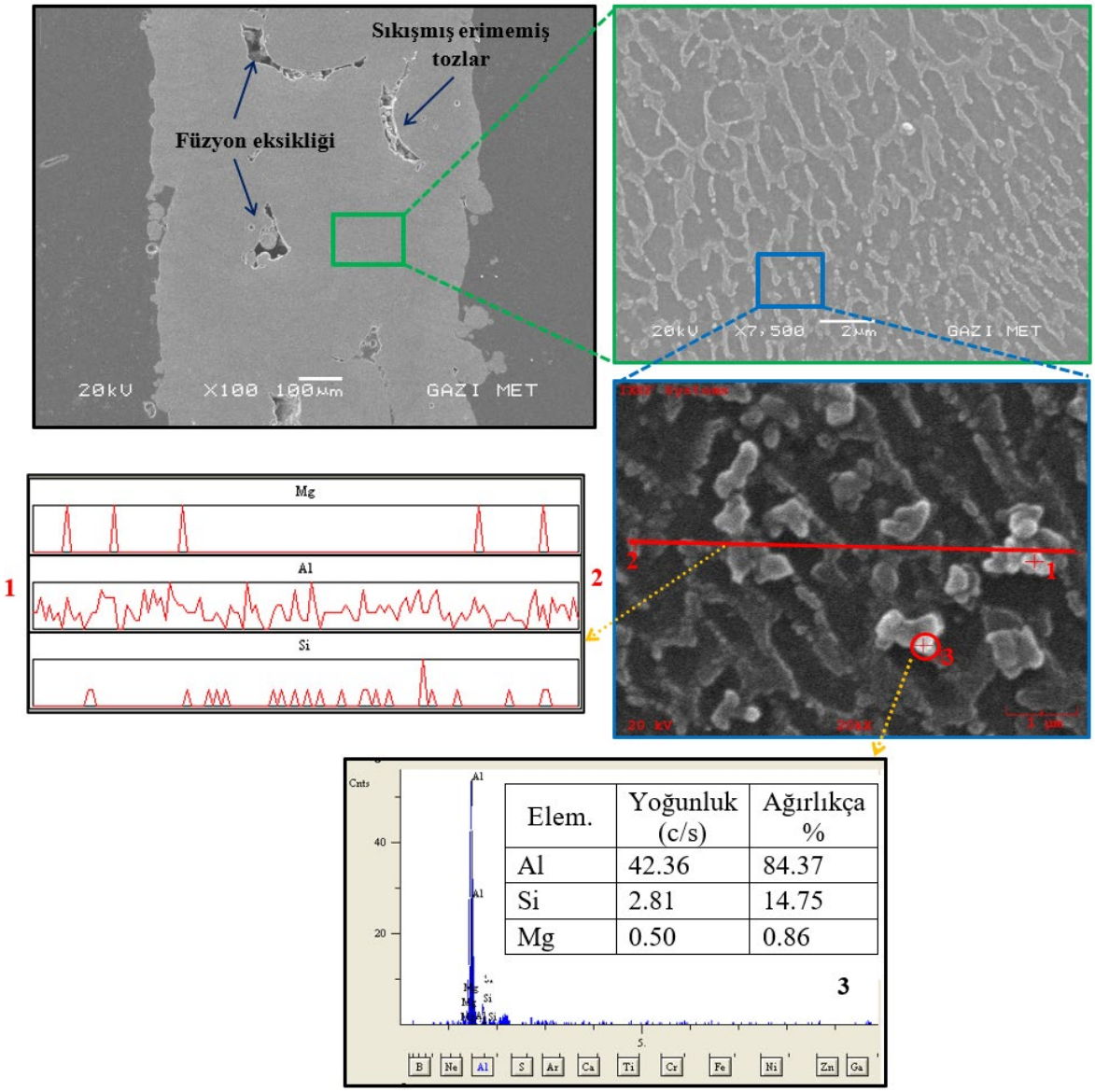


Resim 4.18. 133 Watt lazer gücü ve 400 mm/s lazer tarama hızı (lazer enerji yoğunluğu 79 (J/mm^3)) ile üretilen 0,6 mm çaplı dik açılı çubuk elemanın mikroyapısı

Resim 4.18'de görüldüğü gibi, lazer enerji yoğunluğu, SLM ile üretilen AlSi10Mg parçalarının mikroyapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Daha yüksek lazer enerjisi yoğunluğu, daha büyük eriyik havuzuna ve derin nüfuziyete yol açmaktadır. Bu, daha homojen erime ve katmanlar arasında gelişmiş füzyon ile sonuçlanır. Tane boyutu ve faz dağılımı açısından, daha yüksek enerji yoğunluklarında daha yüksek soğuma hızlarını elde edilmektedir. Bu durum özellikle ince tanelerde yarı kararlı fazlar ve silisyumun ayrışması dahil olmak üzere mikroyapılarda dengesiz katılaşmaya neden olmaktadır. Metalik ve metalik olmayan bir bileşen içeren Al-Si sisteminde, α-Al fazının yönlü olmayan sınırı, önemli aşırı soğuma koşullarına maruz kaldığında, Si fazının yönlü sınırına kıyasla daha hızlı bir büyüme sergilemektedir [207]. Düşük enerji yoğunluklarında ise soğuma hızları

daha yavaş olabilir, bu da daha kaba Si parçacıklarına ve daha düzensiz bir dağılıma neden olabilir. Lazer enerji yoğunluğu, üretilen parçalarda gözenekliliğin ve diğer kusurların oluşumunu da etkilemektedir. Yetersiz enerji yoğunluğu, katmanlar veya sıkışmış tozlar arasında füzyon eksikliğine yol açabilirken, aşırı enerji yoğunluğu, malzemenin buharlaşması veya sıçraması nedeniyle anahtar deliği ve pim deliği gözenekliliğine neden olabilir. Resim 4.18 yüksek enerji girişinin neden olduğu pim deliği tipi gözenekliliği göstermektedir. Ayrıca çubuk eleman etrafındaki tozlar kısmen sinterlenmiş, derin ve geniş oyuklar oluşturmuştur. Resim 4.18'deki parlak 3 noktasının EDS analizinde magnezyum tespit edilememiştir. SLM işleminde, aşırı enerji girişi, magnezyumun AlSi10Mg alaşımından hızla buharlaşmasına neden olarak alaşımdaki magnezyum miktarının ciddi oranda azalmasına sebebiyet verebilir. Ayrıca, SLM ile ilişkili lokalize ısıtma ve soğutma olayları, EDS ile tespitten kaçabilen ultra ince Mg_2Si çökeltilerinin oluşumunu kolaylaştırabilen termal gradyanlar da üretmektedir.

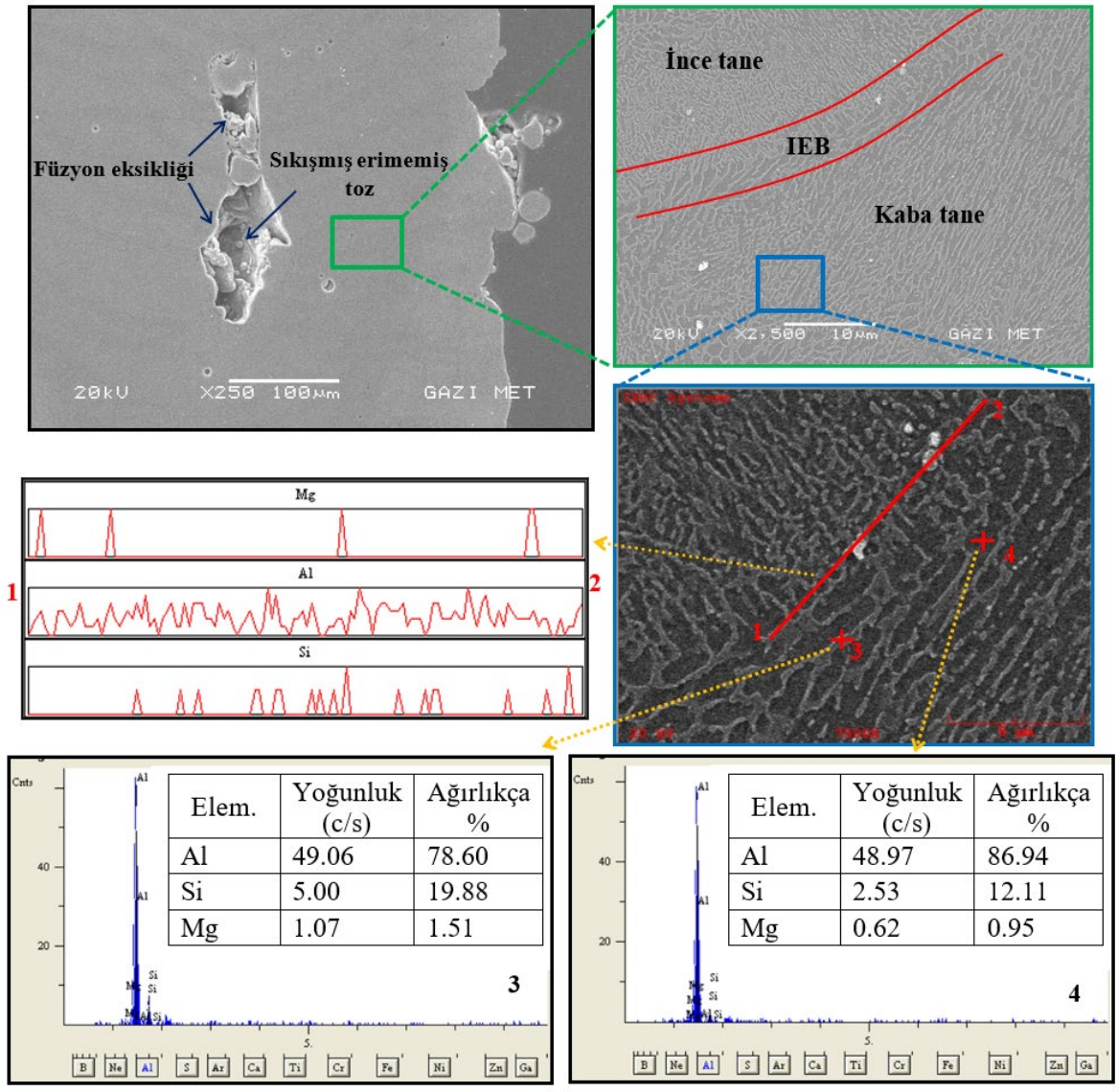
Resim 4.19'de, Resim 4.17'de verilen numuneyle aynı enerji yoğunluğunda fakat daha düşük lazer güç yoğunluğu ve tarama hızında üretilen (SET2 parametreleriyle) çubuk eleman verilerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde tane yapılarının SET1 parametreleriyle üretilen numuneye kıyasla daha kaba olduğu görülmektedir. Kaba tane, eriyik havuzu boyunca farklı bir termal geçmişle ilişkilendirilebilir. Lazer güç yoğunluğunun azalmasıyla birim toz hacmine ileten enerji miktarı da azalacağından eriyik havuzun erime ve katılaşma süreleri daha uzun sürerek kaba tane yapısının oluşmasına yol açmaktadır. SET2 parametreleri kullanılarak üretilen numunenin mikroyapısındaki Si ağının SET1 parametreleri kullanılarak üretilen numune mikroyapısına nazaran nispeten az, α-alüminyum fazının ise daha yoğun olduğu görülmüştür. Resim 4.19'da ayrıca düşük enerji girdisinden dolayı ara katmanlardaki zayıf örtüşmelerinin sonucu olarak katmanlar arasında füzyon eksikliği tipi gözenekliliğinin hizalanma eğiliminde olduğunu da görülmektedir [204]. Porozitedeki bu hizalanmalar kümülatif olarak birikerek parçanın mukavemetini ciddi oranda düşüren büyük gözeneklere neden olurlar. Ayrıca bu gözenekler içerisinde erimemiş toz varlığı da tespit edilmiştir. Bu nedenle eriyik havuzlarının iyi bir biçimde örtüşmesi parçanın performansı açısından önem arz etmektedir.



Resim 4.19. 53 Watt lazer gücü ve 400 mm/s lazer tarama hızı (lazer enerji yoğunluğu 32 (J/mm^3)) ile üretilen 0,6 mm çaplı dik açılı çubuk elemanın mikroyapısı

Baskı oryantasyonu üretim esnasında termal dağılımı etkilemektedir. Termal etkiler ise erime ve katılaşma süreçlerini belirlediği için baskı oryantasyonu mikroyapıyı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Resim 4.20'de düşük lazer enerji yoğunluğu ile üretilen baskı tablasıyla 75° açılı çubuk elemanın mikroyapısı incelendiğinde ise füzyon eksikliği kaynaklı derin ve geniş poroziteler görülmektedir. Bu nispeten büyük gözenekler içerisinde sinterlenmemiş toz partikülleri yer almaktadır. Aynı işlem parametreleri ile üretilen dik açılı çubuk elemanlar (Resim 4.17) ile kıyaslandığında açılı çubuk eleman yapılarında gözenekliliğin daha yoğun olduğu görülmektedir. Dikey eksene göre artan açılar, ısı birikimindeki veya eriyik havuzu dinamiklerindeki değişiklikler nedeniyle kusur oluşumunu yoğunlaştırabilir. Ayrıca baskı açısı, tane morfolojisini etkileyen katılaşma süreçlerinde ısı

akış yönünü de belirlemektedir. Tipik olarak, eş eksenli taneler ısı akışına dik olarak oluşurken, sütunlu taneler ısı akış yönü boyunca oluşmaktadır. Sonuç olarak, farklı yapı açıları, çubuk elemanın mekanik özelliklerini etkileyebilecek farklı tane morfolojileri sağlamaktadır. SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşım parçaların yüksek sertlik ve mekanik dayanımı, 1 µm'den daha az bir dendrit kol aralığına sahip olan ve genellikle baskı yönü boyunca hizalanan silisyum parçacıklarının nano-kristal dendritik organizasyonuna atfedilir [208].



Resim 4.20. 80 Watt lazer gücü ve 600 mm/s lazer tarama hızı (lazer enerji yoğunluğu 32 (J/mm^3)) ile üretilen 0,6 mm çaplı baskı tablasıyla 75° açılı çubuk elemanın mikroyapısı

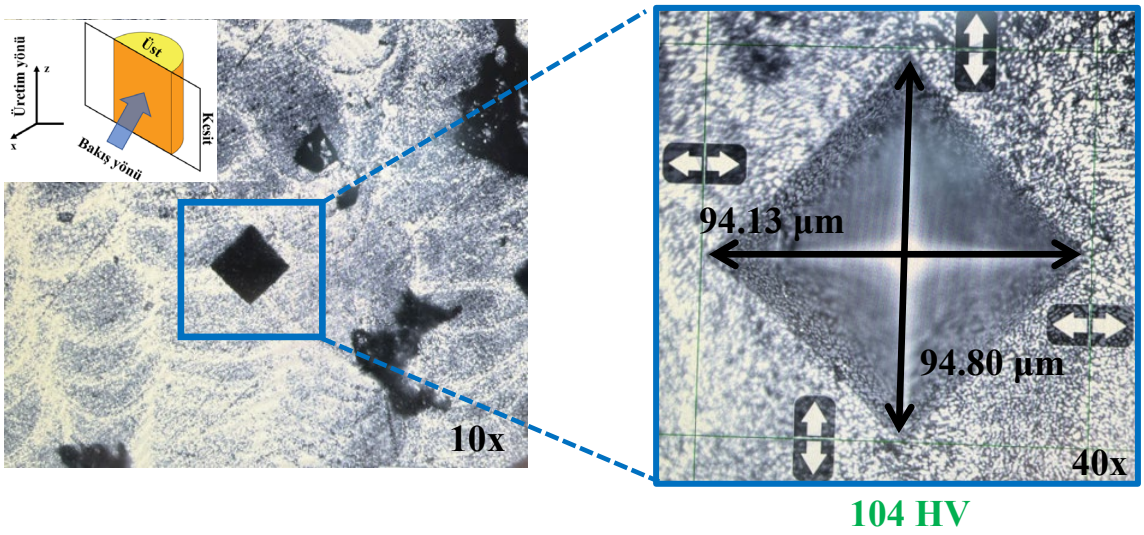
EDS analizinde, yoğunluk (saniye başına sayım - c/s), spektrumdaki belirli bir enerji aralığı içindeki X-ışını sinyal gücünü temsil ederek AlSi10Mg'deki elementel konsantrasyon

hakkında bilgi sağlamaktadır. Resim 4.20, çoklu büyütmelerde koyu bir α-Al fazı ve parlak bir Si ötektik faz ağı ile karakterize edilen 75° açılı çubuk elemanların mikroyapısını göstermektedir. Özellikle, parlak fazın büyütülmüş görüntüsü, ötektik bir yapının tipik radyal dendritik yapısını ortaya koymaktadır. Resim 4.20'deki 3. nokta ile gösterilen parlak faz (% ağırlıkça) %78,60 Al, %19,88 Si ve %1,51 Mg içerirken, 4. noktadaki koyu faz %86,94 Al, %12,11 Si ve %0,95 Mg içermektedir. Hat boyunca yapılan EDS analizinde (Resim 4.20'de 1. noktadan 2. noktaya), silisyum piklerinin ısıdan etkilenen bölge sınırındaki ince taneli kısımda yoğunlaştığı görülmüştür.

Sonuç olarak, baskı oryantasyonu ve işleme parametreleri, SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların mikroyapısal özelliklerini ve yüzey morfolojisini önemli ölçüde etkilemektedir. İşleme parametrelerinin ve baskı yönünün optimizasyonu ile iyileştirilmiş mikroyapıya, minimum kusura ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip çubuk elemanlar elde edilebilir. Mevcut çalışmada en optimum mikroyapı 48 ile 79 (J/mm^3) arasında değişen lazer enerji yoğunluğu ile üretilen dik açılı çubuk elemanda elde edilmiştir.

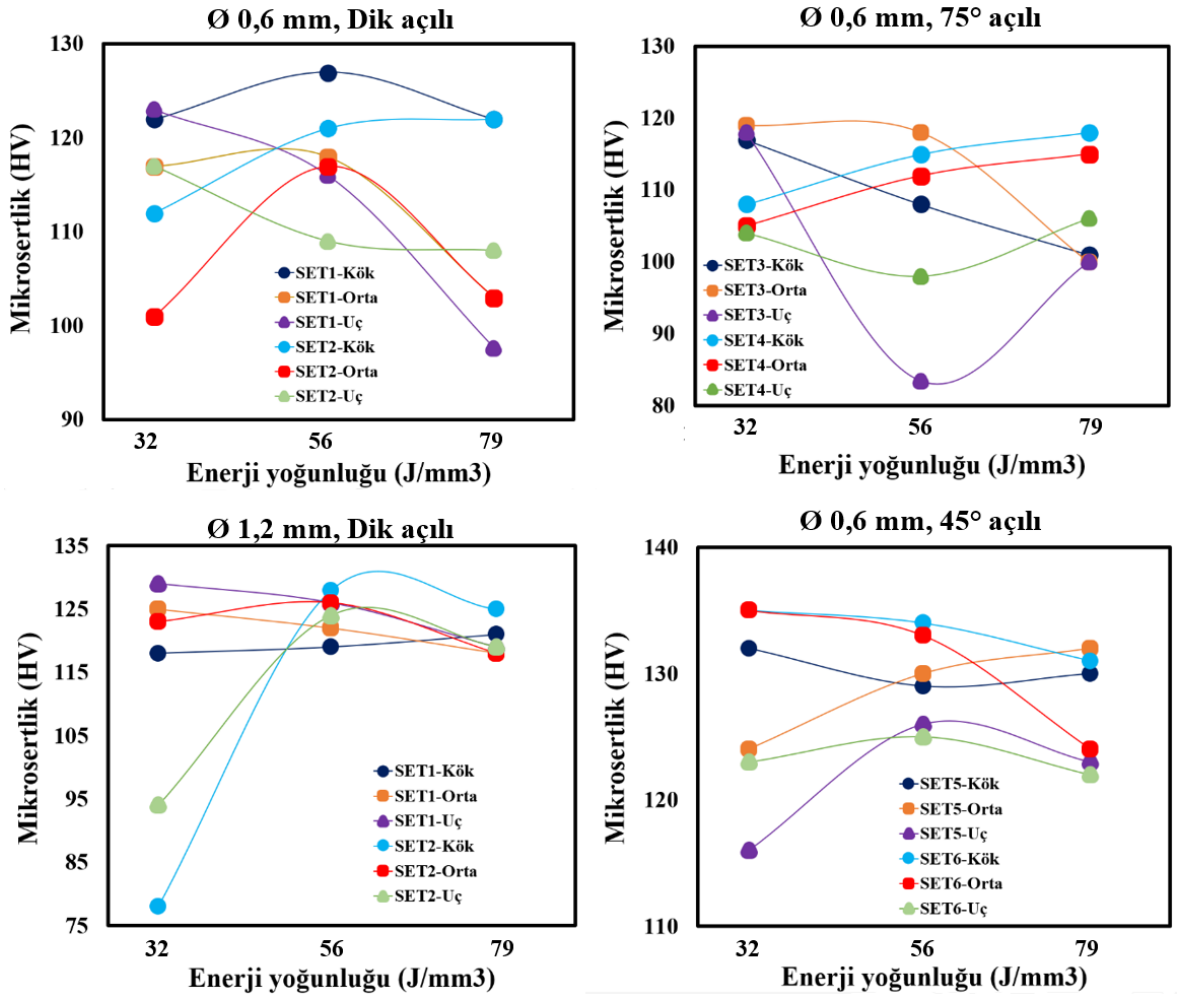
4.3.5. Mikrosertlik

Resim 4.21’de 200 W lazer gücü, 600 mm/s lazer tarama hızıyla üretilen 0,6 mm çaplı çubuk elemana ait Vickers mikrosertlik ölçümü gösterilmiştir. Belirlenen köşegen sınırlarının uzaklıkları mikrosertlik cihazı tarafından otomatik ölçülmüştür. Batırma ucu (İng. indenter) genel olarak eriyik havuzun merkezine hizalanmıştır. Fakat köşegen uzunluklarının ucun temas ettiği mikroyapı bölgesine (HAZ, kaba tane vs.) bağlı olarak ihmal edilebilecek düzeyde farklılık gösterdiği görülmüştür. Resim 4.21’de gösterildiği gibi mikrosertlik ölçümleri gözeneksiz alanlara uygulanmıştır. Bu nedenle unsurun makro sertliğinin mikrosertlik değerlerinden daha düşük çıkması beklenebilir. Bu nedenle, mikrosertlik, özellikle SLM ile üretilen küçük unsurlu numunelere özgü olarak mikroskobik ölçekteki sertlik değişikliklerini gözlemlemek için kullanılabilir.



Resim 4.21. 200 W lazer gücü, 600 mm/s lazer tarama hızıyla üretilen 0,6 mm çaplı dik çubuk eleman kesitinin orta noktasına ait mikrosertlik test uygulaması

Genel olarak, mikrosertlik, mikroyapısal özelliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu nedenle, işleme parametreleri AlSi10Mg çubuk eleman numunelerinin mikrosertliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 4.17'deki mikrosertlik / enerji yoğunluğu grafiği, AlSi10Mg çubuk eleman numunelerin mikrosertlik değerlerinde, 56 J/mm^3 enerji yoğunluğuna kadar bir artışı ve ardından daha yüksek enerji yoğunluğu seviyelerinde mikrosertlikte bir düşüş görülmektedir. Bu duruma, düşük veya aşırı enerji yoğunluğuna bağlı olarak ortaya çıkan mikroyapısal kusurlar ve eriyik havuz şekli neden olmuştur. Düşük enerji yoğunluğunda füzyon eksikliği kaynaklı kaynaşmamış tozlar, çubuk elemanın yoğunluğunu azaltarak uygulanan kuvvete karşı direncini düşürmektedir. Ayrıca daha düşük enerji yoğunluklarında, malzeme daha yavaş bir soğuma hızına sahiptir. SLM işlemindeki yavaş soğuma mikroyapıdaki tane boyutu, ikincil dendrit kol aralığı boyutu ve yaşla sertleşebilen Mg/Si çökeltilerini negatif yönde etkilemektedir [209]. Daha büyük taneler ve mikroyapıdaki östenit miktarında artış malzemenin genel mukavemetini ve mikrosertliğinde azalmaya yol açabilir [210]. Yüksek enerji yoğunluğunda ise malzemenin hızla erimesi ve katılaşması anahtar/pim tipi gözeneklilik ve çatlak gibi kusurlara neden olabilir. Bu kusurlar malzemenin deformasyona karşı direncini azaltarak mikrosertlik değerlerini düşürmektedir. Ayrıca, aşırı enerji yoğunluğunda malzeme, üretim süreci sırasında önemli bir sıcaklık gradyanına maruz kalmaktadır. Sıcaklık gradyanı, malzeme yapısında kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olarak malzemenin kristal kafes yapısında değişmelere ve dislokasyonlara sebebiyet vermektedir. Bu değişiklikler de malzemenin mikrosertliğe negatif etki etmektedir [211].



Şekil 4.17. SLM proses parametrelerine ve yapı oryantasyonlarına bağlı değişen çubuk elemanların mikrosertlik değerleri

Şekil 4.17'de aynı enerji yoğunluğuna sahip olmasına karşın yüksek lazer gücü ve lazer tarama hızına sahip tek sayılı ardışık set parametreleri (SET1-SET3-SET5) ile elde edilen mikro sertlik değeri çift sayılı set parametreleri ile üretilen numunelere nazaran yüksektir. Yüksek lazer gücüne sahip tekil setlerin üretimi esnasında lazerin enerji yoğunluğuna bağlı olarak toz yatağına nüfuz etme derinliği daha fazladır. Artan nüfuziyetle daha büyük bir eriyik havuzu ve eriyik havuzunda daha düzgün bir ısıl dağılım sağlanmaktadır. Bu durum daha uniform bir mikroyapıya ve dolayısıyla daha yüksek mikrosertliğe neden olmaktadır. Ayrıca yüksek lazer gücünde, eriyik havuz sıcaklığı kısa bir zaman diliminde artırmakta ve ardından hızlıca soğumaktadır. Artan soğuma hızıyla elde edilen ince taneli yapı, gelişmiş mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır. Yine aynı enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen daha yüksek lazer gücüne sahip tekil setlerde dendrit kol aralığı (DAS) daha kısa olabilir. Bunun nedeni, daha yüksek lazer gücünün çekirdeklenme oranını arttırarak daha kısa dendrit kol aralığı oluşturmasıdır [211]. Azaltılmış dendrit kol aralığı,

mikroyapısal özelliklerin daha düzgün dağılmasını ve böylece daha yüksek mikrosertliğin elde edilmesini sağlamaktadır [146,211].

Düşük enerji yoğunluğu ile üretilen (32 J/mm^3) dik açılı çubuk elemanların mikrosertlik değerlerinin çubuk elemanın uç noktalarında daha fazla olduğu görülmektedir. Fakat dik açılı çubuk elemanlarda enerji yoğunluğunun artmasıyla (79 J/mm^3) en yüksek mikrosertlik değerinin çubuk elemanın kök kısımlarına kaydığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.17). Düşük enerji yoğunluklarında üretilen çubuk elemanların kök ve orta kısımlarındaki yetersiz lazer enerjisi, parça mukavemetini azaltan füzyon eksikliğine neden olmaktadır. Düşük enerji yoğunluklarında üretilen dik çubuk elemanların uç kısmında ise ardışık katmanlara nüfuz eden sürekli lazer ışının oluşturduğu ısıl geçmiş sayesinde diğer kısımlara nazaran daha yüksek termal gradyanlar elde edilmektedir. Bu sayede düşük lazer yoğunluğuna sahip dik çubuk elemanların uç kısmında daha düşük gözeneklilik, homojen dağılımlı eriyik havuzu ve yüksek mekanik özellikler elde edilebilir. Fakat çubuk elemanın açılı olması durumunda, alt katmanlarda bulunan erimemiş destek tozları ve artan yüzey alanı nedeniyle, özellikle çubuk elemanın uç kısımlarına gidildikçe büyük ve düzensiz termal gradyanlar oluşmaktadır. Oluşan düzensiz bu ısıl dağılım, yüksek kalıntı gerilmesine ve zayıf mekanik özelliklere neden olmaktadır [177,212].

Şekil 4.17'de baskı yüzeyine dik oryantasyonda üretilen numunelerin açılı olanlara nazaran daha yüksek mikrosertliğe sahip olduğu görülmektedir. SLM baskısı sırasında, erimiş metal, numunenin alt kısmından üst kısmına doğru yönlü bir şekilde katılaşmaktadır. Numune dikey olarak üretildiğinde, katılaşma yönü yapı plakasına diktir. Bu durum mikrosertliği artıran daha düzgün ve hizalı bir mikro yapı ile sonuçlanır. Bununla birlikte, numune açılı olarak üretildiğinde, katılaşma yönü yapı plakasına açılıdır ve bu mikro sertliği azaltabilen hizalanmamış bir mikroyapıya neden olmaktadır [212,213]. Ayrıca açılı numunelerde parçanın ağırlığından kaynaklanan deformasyonlar nedeniyle kalıntı gerilmeler daha yüksek olabilir. Daha yüksek kalıntı gerilmeler daha düşük mikrosertliğe yol açabilir [214].

Çubuk eleman çapının artmasıyla çubuk eleman geometrisinin farklı noktalarından alınan mikrosertlik ölçüm değerlerinin birbirlerine yaklaştığı görülmektedir. Çubuk eleman çapı arttıkça daha büyük malzeme hacminin işlenmesi için artan enerji girişi, ısıl birikimlerin de artmasına neden olmaktadır. Artan ısıl birikimler kaba ve uniform tanelerin elde edilmesine neden olmaktadır. Daha düzgün tane boyutu dağılımı, çubuk eleman boyunca daha tutarlı

mikrosertlik sağlamaktadır [215]. Ayrıca, çubuk eleman çaplarının büyümesiyle yüzey-hacim oranı azalarak, hızlı soğutma veya yüzey oksidasyonu gibi etkilerden kaynaklanabilecek yerel mikroyapısal varyasyonların giderilmesine yardımcı olmaktadır. Böylece hem mikroyapının hem de mikrosertliğin parça boyunca daha eşit bir şekilde dağılması sağlanmış olur. Ek olarak, SLM ile üretilen AlSi10Mg numunelerinde mikrosertlik ve çubuk eleman çapı arasındaki ilişki mutlaka doğrusal değildir ve SLM proses parametreleri arasındaki dengeye bağlıdır. Bu nedenle, değişken çubuk eleman çaplarına sahip kafes yapılarda istenen mekanik özellikleri ve mikroyapısal tekdüzeliği elde etmek için işlem parametrelerinin optimize edilmesi ve termal koşulların kontrol edilmesi gereklidir.

Sonuç olarak, SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanlar, çok ince mikro yapısı ve α-alüminyumun tane sınırlarında ayrılmış silisyumun iyi dağılımı nedeniyle geleneksel yöntemlerle üretilen benzer yapılardan daha üstün mikrosertlik değerlerine sahiptir. Fakat SLM ile gelişmiş mikroyapı ve üstün mekanik özelliklere sahip bu çubuk elemanların elde edilmesi lazer gücü ve lazer tarama hızı gibi baskı parametrelerinin optimizasyonuna bağlıdır. Genel olarak en iyi mikrosertlik değerleri 56 J/mm^3 enerji yoğunluğunda üretilen çubuk elemanlarda görülmüştür. Çubuk elemanlar geometrileri boyunca yapılan mikrosertlik ölçümlerinde ise en kararlı mikrosertlik özelliklerinin çubuk elemanların orta kısımlarında görüldüğü gözlemlenmiştir. Bu duruma çubuk elemanların orta noktalarında ısıl yayılımı, termal dağılım ve katılaşma sürelerinin diğer bölgelere nazaran en optimum seviyede olması neden olmuştur. Çalışmada lazer enerji yoğunluğu girdisinin tek başına mikrosertliğin tahmin etmede yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır. Aynı lazer enerji yoğunluğunda fakat farklı üretim parametreleri ile üretilen çubuk elemanlardan yüksek lazer gücü ve tarama hızıyla üretilen numunede daha gelişmiş mikrosertlik değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, SLM ile üretilen çubuk elemanların mikrosertliklerinin belirlenmesinde lazer güç yoğunluğu, termal dağılım, ısıl etkiler, eriyik havuzu yapısı ve katılaşma süresi de dikkate alınmalıdır.

İşlem parametrelerinin yanı sıra baskı oryantasyonu da ısıl dağılımı etkileyerek farklı mikroyapısal ve mekanik özelliklere sebebiyet vermektedir. Baskı tablasına dik üretilen çubuk elemanların, açılı olarak üretilenlere göre daha gelişmiş mikrosertliğe sahip olduğu görülmüştür. Yine, açılı üretilen çubuk elemanlar, dik çubuk elemanlara nazaran daha yüksek anizotropik özellik göstermektedir. Ayrıca çubuk eleman çapı da mekanik özellikleri

etkilemektedir. Çubuk eleman çapının azalmasıyla dar bir alana yüksek ısıl girdisine bağlı olarak mikroyapıda düzensiz termal etkiler görülmektedir. Bu termal düzensizlikler, mikro kusurlara sebebiyet vererek çubuk elemanın mikrosertlik değerinde dalgalanmalara neden olmaktadır.

En nihayetinde üretim parametrelerinin ve çubuk eleman yönelimlerinin, SLM tekniği kullanılarak üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların mikrosertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, üretim parametreleri ve oryantasyonun AlSi10Mg çubuk elemanların mikrosertliği üzerindeki etkisinin toz özelliklerine ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebileceğini not etmek gerekir. Bu nedenle, bu değişkenler arasındaki ilişkiyi tam olarak anlamak ve farklı uygulamalar için en uygun üretim koşullarını geliştirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

4.4. Sonuç

Geniş hacimli parçaların üretiminde kullanılan üretici firma tarafından belirlenen optimumum işlem parametreleri çubuk eleman gibi ince unsurların üretiminde yetersiz kalmaktadır. İnce unsurlar üretilirken küçük bir hacme yoğun ve sürekli ısıl girdi nedeniyle boyutsal, morfolojik, mikroyapısal ve dayanımsal farklılıklar görülmektedir. Bu çalışmada AlSi10Mg malzeme kullanılarak SLM yöntemi ile üretilen çubuk elemanlarda, işlem parametrelerinin unsur özelliklerine etkileri ele alınmıştır. Farklı lazer gücü ve tarama hızı kullanılarak üretilen çubuk elemanların üretim süreçleri, boyutsal doğruluğu, mikroyapıları ve mekanik özellikleri irdelenmiştir.

İlk olarak çubuk elemanların üretilebilirlikleri incelenmiştir. Genel olarak dikey eksenle yapılan açı miktarı azaldıkça çubuk elemanların üretilebilirliğinin arttığı görülmüştür. Özellikle düşük enerji yoğunluklarında üretilen açılı ve küçük çaplı (Ø 0,2 – 0,6 mm) çubuk elemanların üretim ve baskı tablasından çıkarılması sürecinde çubuk eleman kayıpları yaşanmıştır. Bu duruma, füzyon eksikliği kaynaklı yoğun ve büyük porozitelerin, özellikle küçük çaplı çubuk elemanlarda kırılmaya karşı direnci düşürmesi neden olmuştur. Diğer yandan yüksek enerji girişinin neden olduğu derin ve geniş eriyik havuz geometrisi sayesinde yüksek lazer güç yoğunluklarıyla üretilen çubuk elemanlarda katmanlar arasındaki nüfuziyet daha fazladır. Bu durum, yüksek enerji yoğunluğu kullanılan çubuk elemanların üretilebilirliklerini artırmaktadır.

Çubuk eleman geometrilerinin doğruluğu ve kalitesi optik mikroskop yardımıyla karakterize edilmiştir. Lazer enerji yoğunluğunun düşük olduğu (24-40 J/mm^3) numune yüzeylerinde yoğun porozite görülmesine karşın yapı çevresinde yarı sinterlenmiş toz grupları nadiren görülmektedir. Enerji yoğunluğunun aşırı artmasıyla (79-95 J/mm^3) küçük küresel anahtar/pim deliği tipi porozite ve yapı çevresinde yoğun yarı sinterlenmiş toz varlığı tespit edilmiştir. Yüksek yoğunluğa ve boyutsal doğruluğa sahip optimum çubuk eleman geometrileri 48 ile 71 J/mm^3 enerji yoğunluklarında elde edilmiştir. Ayrıca enerji yoğunluğu tek başına mikro ve makro yapıları tanımlamakta yetersiz kalmaktadır. Aynı enerji yoğunluğunda fakat farklı lazer gücü ve tarama hızlarında üretilen deney setlerinden yüksek güçlü ve hızlı taraman setlerin (tekil setler) düşük güçlü ve yavaş tarama hızına sahip setlere nazaran (çift setler) daha önce füzyon etkilerine maruz kaldığı görülmüştür. Bu nedenle tekil setlerde optimum enerji yoğunluğu 48 ile 63 J/mm^3 değerleri arasında elde edilirken, bu değer çift setler için 63 ile 79 J/mm^3'tür.

Lazer enerji yoğunluğuna bağlı olarak çubuk eleman çaplarının doğrulukları değişmektedir. Enerji yoğunluğu arttıkça çubuk eleman yüzeyine erimemiş tozların yarı sinterlenmesi nedeniyle boyutsal doğrulukta azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca çubuk eleman çapı küçüldükçe boyutsal tamlık azalmıştır. Boyutsal tamlığın enerji yoğunluğunun yanı sıra yapı yönelimine bağlı olduğu da görülmüştür. Yarı eriyik toz parçacıkların ikincil sinterlenmesi nedeniyle, baskı düzlemiyle 45°'lik açıya sahip çubuk elemanlar yüzey kalitesini düşüren pürüzlü bir aşağı bakan yüzeye görülürken, 75° ve 90°'lik çubuk elemanlarda nispeten daha pürüzsüz bir yüzeye elde edilmiştir.

Tekil izlerin araştırılması, ince özellikli kafes yapılarının üretiminde sonraki çalışmalara rehberlik etmek için kullanılabilecek iyi bir ön çalışma sunmaktadır. Belirlenen tüm lazer gücü ve tarama hızı kombinasyonları için tek yollu lazer taramayla 200 μm delik çapına sahip (dış çap 400 μm) ince unsurlar üretilmiştir. Delik geometrisi sadece enerji yoğunluğu 30 J/mm^3 olan numunede elde edilmiştir. Lazer gücü ve tarama hızının, tek hatlı eriyik havuzunun boyutları ve kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıktır. Artan lazer enerji yoğunluğu, alt katmanlarda ve unsuru çevreleyen tozlara nüfuz ederek eriyik havuz derinliği ve genişliğinin artmasına neden olmaktadır. Katılaşma esnasında sıvı fazdaki havuz yüzey geriliminin etkisi ile yüzey alanını en aza indirerek kubbe biçimli yapı halini almaktadır. Bu nedenle unsura ait geometrik doğruluk azalmaktadır. Düşük enerji

yoğunluklarında üretilen unsurlarda ise belirgin bir topaklanma, alt tabakada sığ bir erime derinliği ve üst tabakalarda alt katmanlar ile kaynaşmamış yüzey morfolojisi görülmektedir.

Kesitleri alınan çubuk eleman geometrilerinin morfolojik kusurları ve eriyik havuz boyutları optik mikroskop kullanılarak, yapıdaki fazlar ve malzeme bileşenleri ise SEM/EDS yardımıyla karakterize edilmiştir. İşlem parametreleri çubuk eleman gözenekliliği ve eriyik havuz yapısı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Yapıda işlem parametreleri kaynaklı füzyon eksikliği tipi ve anahtar/pim deliği tipi gözeneklilik görülmüştür. Füzyon eksikliğine bağlı metalurjik kusurlar yeterli enerjinin sağlanamamasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Pim deliği tipi kusurlarda ise yüksek enerji girdisi nedeniyle buharlaşan metal, hızlı soğutma esnasında sıkışarak yuvarlak şekilli gözenekleri oluşurmuştur. Eriyik havuz derinliği artan enerji yoğunluğuyla lineer olarak artmış ve eriyik havuz anahtar deliği şeklini almıştır. Eriyik havuz genişliği ise kritik bir değere kadar artmış (SET1 için 48 J/mm^3) ve ardından anahtar deliği etkilerin başlamasıyla birlikte azalmıştır. Bu nedenle özellikle çubuk eleman gibi hassas unsurların üretiminde yüksek yoğunluk ve düzgün geometrili eriyik havuzun elde edilebilmesi için üretim parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Çalışmada SET 1 için en uygun enerji yoğunluğu değerinin 48 J/mm^3 olduğu görülürken SET 2 için bu değer 71 J/mm^3'tür.

SLM tekniğiyle üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların mikroyapıları SEM ile incelendiğinde α-Al fazını çevreleyen farklı şekil ve boyutlardaki ötektik Si ağı görülmektedir. Kaba tanelerin eriyik havuzu merkezinde oluştuğu ve eriyik havuz sınırlarında bulunan HAZ bölgesine doğru ilerledikçe tane boyutunun azaldığı görülmüştür. İnce taneli mikroyapılar hızlı soğumanın bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yükselen lazer gücüne bağlı olarak artan hızlı soğuma oranı daha ince taneli mikroyapıların elde edilmesini sağlamaktadır. İnce tane boyutu ve azaltılmış gözenekliliğe sahip eriyik havuzu, parçanın mukavemet ve sünekliğini iyileştirmektedir. EDS analiz sonuçları, ince bölgede kaba bölgeye göre daha fazla silisyum ve magnezyum elementi bulunduğunu göstermiştir. Bu durum AlSi10Mg alaşımın SLM işlemindeki katılaşma davranışının bir sonucudur.

Aynı enerji yoğunluğunda fakat daha düşük lazer gücü ve tarama hızında (SET2) üretilen çubuk elemanın tane yapısının, yüksek güç ve tarama hızıyla (SET1) üretilene kıyasla daha kaba olduğu görülmüştür. Bu duruma SET2 parametreleri ile düşük güç yoğunluğunda üretilen çubuk elemanın soğuma hızının düşük olması neden olmuştur. Yüksek güç ve daha

hızlı tarama (SET1) ile üretilen çubuk elemanlardaki artan soğutma hızı, daha ince taneli yapıların oluşumu desteklemektedir. Baskı yönü açısından, üretim plakasına dik olarak üretilen çubuk elemanların üretim plakasına açılı olarak üretilen çubuk elemanlardan daha iyi mikroyapısal özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum üretim plakasına dik olarak üretilen çubuk elemanların ısıl dağılımlarının daha homojen olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, baskı yönü ve işlem parametreleri, SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların mikroyapısal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu parametrelerin optimizasyonu ile belirli uygulamalar için istenen mikro yapı ve mekanik özellikler elde edilebilir. Bundan dolayı, SLM ile üretilen AlSi10Mg parçalarında optimum mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için enerji yoğunluğunun hassas bir biçimde belirlenmelidir. Mevcut çalışmada en optimum mikroyapı 48 ile 79 lazer enerji yoğunluğu (J/mm^3) ile üretilen dik açılı çubuk elemanda elde edilmiştir.

SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanlar, çok ince mikro yapısı ve α-alüminyumun tane sınırlarında ayrılmış silisyumun iyi dağılımı nedeniyle genel olarak geleneksel yöntemlerle üretilen benzer yapılardan daha üstün mikrosertlik değerlerine sahiptirler. Fakat özellikle çubuk eleman gibi ince unsurlarda bu gelişmiş mikroyapı ve üstün mekanik özelliklerin elde edilmesi SLM baskı parametrelerinin optimizasyonuna bağlıdır. İşlem parametrelerinin AlSi10Mg çubuk elemanların mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için mikrosertlik testi yapılmıştır. Genel olarak en iyi mikrosertlik değerleri 56 J/mm^3 enerji yoğunluğunda üretilen çubuk elemanlarda görülmüştür. Çubuk elemanlar geometrileri boyunca yapılan mikrosertlik ölçümlerinde ise en kararlı mikrosertlik özelliklerin çubuk elemanların orta kısımlarında elde edilmiştir. Bu duruma çubuk elemanların orta noktalarında termal dağılım ve katılaşma sürelerinin diğer bölgelere nazaran en optimum seviyede olması neden olmuştur.

Genel olarak, bu çalışmanın bulguları, işlem parametrelerinin seçici lazerle eritilmiş AlSi10Mg mikro çubuk elemanların geometrik kusurları, mikro yapıları ve mikro mekanik özellikleri üzerindeki etkisine dair değerli bilgiler sağlamaktadır. Bu öngörüler; havacılık, uzay ve biyomedikal mühendisliği gibi yüksek performans/parça ağırlığı oranının arzu edildiği endüstrilere ait çeşitli uygulamalarda, arzu edilen boyutsal doğruluğa ve mekanik özelliklere sahip yüksek kaliteli mikro çubuk elemanların üretilebilmesi için işleme koşullarını optimize etmekte kullanılabilir.

5. KAFES YAPI ÇUBUK ELEMANLARININ SLM İMALAT PROSESİNİN NÜMERİK MODELLENMESİ

Metal eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer eritme (SLM) teknolojisi ile gelişmiş yapısal özelliklere sahip karmaşık geometriler hızlı ve etkin bir şekilde üretilebilmektedir. Alüminyum alaşım malzemelerin ve kafes yapısı geometrilerinin SLM yöntemiyle bir araya gelmesiyle, yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına sahip bileşenler elde edilebilmektedir. Fakat eklemeli imalat yöntemlerini bile zorlayan ince unsurlardan oluşan bu karmaşık kafes yapıların üretiminde, boyut/yüzey özelliklerini ve kusurları önemli ölçüde etkileyen işlem parametreleri optimize edilmelidir. Bu optimizasyon sürecinin sadece deneysel yöntemler kullanılarak yürütülmesi oldukça zaman alıcı ve maliyetli olabilir. Tezin bu bölümünde, kafes yapı çubuk elemanlarının SLM ile üretimi esnasında eriyik havuzunda meydana gelen ısı iletim mekanizmasının belirlenmesi için üç boyutlu sayısal (nümerik) bir model oluşturulmuştur. Bu sayısal modelde, SLM ile üretimin sıcaklığa bağlı özellikleri, lazer gücü, tarama hızı, toz malzemesi, koruyucu gaz özellikleri ve çubuk eleman çapı dikkate alınarak irdelenmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sayısal analiz sonuçlarının 4. Bölüm'de belirtilen deneysel sonuçlarla büyük bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Sonuçlar, üretimde karşılaşılan eriyik olmayan alan ve aşırı ergimiş bölgeler gibi kusurların, çubuk eleman çapına ve işlem parametrelerine bağlı olarak süreç optimizasyonu ile en aza indirilebileceğini göstermiştir. Her iki parametre seti içinde optimum ısıl dağılımın ve eriyik havuz yapısının elde edildiği en optimum hacimsel enerji yoğunluğu değerinin 71 J/mm^3 olduğu görülmüştür. Bu enerji yoğunluğu değeri SET 1 için P=120 W, v=0,6 mm/s ve SET 2 için P=80 W, v=0,4 m/s işlem parametrelerinde elde edilmiştir.

5.1. Giriş

Yıllar içerisinde Eklemeli İmalat (Eİ) gelişmiş işlevselliğe sahip nihai ürünlerin imalatında umut verici bir yöntem haline gelmiştir. Bu yöntem işlevselliği artırırken kullanılan malzeme miktarını ve parça ağırlığını önemli ölçüde azaltabilen topoloji optimizasyonu gibi farklı tasarım metodolojileriyle birlikte kullanılarak işlevsel parçaların hızlı üretimine olanak sağlamaktadır. Böylece dolu katı parçalar yerine benzersiz kafes yapıları kullanılarak bileşenlerin mukavemet/ağırlık oranı önemli ölçüde artırılabilir. Bu yapılar ayrıca gelişmiş termal, ses ve titreşim sönümleme özelliklerine sahip olabilirler [12,216,217]. Kontrol edilebilir özelliklere sahip bu yenilikçi yüksek performans yapıları havacılık [83], otomotiv

[161] ve biyomedikal [108] uygulamalarında kullanılabilir. Eİ teknolojilerinin tasarım esnekliğinden maksimum düzeyde faydalanmayı amaçlayan kafes yapı tasarım ve üretim süreçleri, yapının mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Hücresel yapının tasarım sürecinde, imalat yöntemi, malzeme, üretim kısıtlamaları, fiziksel ve boyutsal özellikler ile işlevsellik dikkate alınmalıdır.

Kafes yapılar farklı eklemeli imalat teknolojileri ile üretilebilmesine rağmen metalik kafes yapıların eklemeli imalatında Seçici Lazer Eritme (SLM) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. SLM'de iş parçası, ince toz katmanlarının bir lazer ışını [218] ile yerel olarak eritilmesiyle oluşturulur. Dolayısıyla bu teknolojiyle doğrudan özelleştirilmiş karmaşık ağ yapılı bileşenler üretebilmektedir [154]. Bu bileşenlerin yapısal ve mekanik özellikleri, kullanılan malzemeye ve yapı geometrisine bağlı termal dağılım, erime ve katılaşma parametreleri gibi metalurjik değişkenlerle ilişkilidir [219, 220]. SLM yönteminde birçok farklı metalik malzeme kullanılmasına rağmen, gelişmiş metalurjik özelliklere sahip, hafif ve yüksek performanslı karmaşık yapıların üretiminde genellikle alüminyum alaşımlar tercih edilmektedir [221]. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarının SLM ile işlenmesi önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir [149]. Olakanmi vd., SLM ile alüminyum alaşımlarının üretiminde toz ve işlem parametrelerinin yoğunlaşma mekanizması ve mikroyapısal değişim üzerindeki etkisini incelemiştir [145]. Trevisan vd., SLM işlem parametrelerinin nihai parçaların mikroyapısal, çekme ve yorulma özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır [179]. Yapılan bu çalışmalarda katma değeri yüksek nihai ürünlerin imalatı için toz karakterizasyonu ve geometriye bağlı optimum işlem parametrelerini belirlemenin önemi vurgulanmıştır.

Yüksek iletkenliğe ve düşük lazer absorpsiyonuna sahip alüminyum alaşımların eklemeli imalatında lazer gücü, güç dağılımı, ilerleme hızı, katman kalınlığı gibi SLM işlem parametreleri nihai parçanın metalurjik ve yüzey özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır [222]. Diğer yandan, lazer ergitme işlemindeki termal dağılım ve eriyik havuz yapısı nihai parçaların mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [154]. Özellikle kafes yapılar gibi ince unsurlar içeren alüminyum alaşımlı yapıların SLM üretiminde, yüksek kaliteli ürün elde etmek için işlem parametrelerinin çok iyi optimize edilmesi gerekmektedir. Mevcut durumda, süreç optimizasyonu esas olarak deneysel deneme yanılma yaklaşımlarıyla yürütülmektedir. Oldukça zahmetli, zaman alıcı ve pahalı olan bu yaklaşımdan ziyade SLM ile ince elemanların üretim optimizasyonu için sayısal analiz

yönteminin kullanımı kolay ve hızlı bir çözüm sunmaktadır [223]. SLM sürecini simüle etmeyi amaçlayan bazı yeni araştırmalar yapılmıştır. Bajaj vd., molibden erimiş havuzunun büyüklüğünü tahmin etmek için analitik ve sayısal bir model kullanmıştır [224]. Çalışmada topaklanma ve termal kalıntı gerilmeleri azaltmak için işlem parametrelerinin ek optimizasyonuna ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Eriyik havuzundaki ısıl dağılımın tespiti, erime ve katılaşma mekanizmasının anlaşılması açısından oldukça önemlidir. Liu vd., eriyik havuzun farklı konumlarındaki termal değişkenleri hesaplayabilmek için sonlu elemanlar analizi kullanmıştır. Artan lazer tarama hızı ile katılaşma hızının arttığı, sıcaklık gradyanının ise azaldığı bildirilmiştir [225]. Başka bir çalışmada, eriyik havuz uzunluğunun lazer tarama hızı arttıkça arttığı, ancak hem genişlik hem de derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir [226]. Bu durum, tarama yönü boyunca füzyon eksikliğine neden olarak nihai parçada gözeneklere ve boşluklara neden olabilmektedir [154]. Öte yandan, daha düşük lazer tarama hızında, aşırı lazer enerji girişi nedeniyle yerel malzeme buharlaşmakta ve anahtar deliği tipi gözenekliliğe neden olmaktadır [227]. Han vd., çeşitli tarama aralıkları ve tarama hızları için alüminyum tabanlı bir kompozit eriyik havuzunun geçici sıcaklık dağılımını simüle etmiştir [228]. Tarama yolu boyunca elde edilen maksimum sıcaklığın tarama hızına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Lui vd., farklı sayıda taramanın AlSi10Mg metal alaşım eriyik havuzunun sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için sonlu elemanalar yöntemi önermiştir. Sonuçlar, tarama sayısının artmasıyla eriyik havuzun genişliğinin ve derinliğinin arttığını ve böylece yüksek yoğunluklu nihai parçaların elde edilebildiğini göstermiştir [229].

Eriyik havuzu özelliklerinin nihai ürünün kalitesi üzerinde önemli etkiye sahip olması nedeniyle SLM sürecinin simülasyonu son yıllarda önemli bir çalışma alanı olmuştur. Bununla birlikte, eriyik havuzun tüm fiziksel ve metalurjik etkiler dikkate alınarak modellenmesi hesaplama açısından oldukça zor, karmaşık ve zaman alıcıdır [230]. Bu nedenle, yönetilebilir ve etkili sonuçlar veren basitleştirilmiş sayısal modellerin geliştirilmesi gereklidir.

Lazer malzeme etkileşim mekanizmasındaki ana basitleştirilmeler, absorpsiyon açısı bağımlılığı ile çoklu yansımaların göz ardı edildiği ve idealleştirilmiş küresel tozların kullanımını içeren bazı varsayımıdır. Basitleştirilmiş toz dağılım modelinde yüksek doğrulukta simülasyon sonuçlarının elde edilebilmesi için toz yatağının termofiziksel özellikleri, tozların boyutu ve paketleme verimliliği dikkate alınmalıdır [219]. SLM işleminde, toz özellikleri ve dağılımlarının yanı sıra ısı akısı, taşınım ve iletimle olan ısı

transferleri de değerlendirilmelidir. Hem erimiş metal ısı transferlerinin hem de doğru toz yatağı özelliklerinin hesaba katıldığı gelişmiş modeller mevcut olsa da bu yöntemler hesaplama açısından zorlayıcı ve genellikle iki boyutlu hesaplamalarla sınırlıdır [231,232]. Eriyik havuzunda meydana gelen kılcal kuvvet, yüzey gerilimi ve Marangoni etkisi gibi iç kuvvetlerin eriyik havuz sıcaklık dağılımı ve sıcaklık gradyanı üzerindeki etkileri, lazer güç yoğunluğu gibi diğer dış etkilere kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir [230]. Bununla birlikte, eriyik havuzunun sıcaklık gradyanına bağlı olarak faz değiştirme özellikleri iyi tanımlanmalıdır [233]. SLM işleminde eriyik havuzu; toz fazı, erimiş sıvı fazı, yoğun katı fazı ve buharlaşmış gaz fazı veya bunların bir kombinasyonu olan peltemsi bölge olarak ayrılmaktadır. Malzemenin sıcaklığa bağlı faz geçiş özelliklerinin bir fonksiyonu olarak eriyik havuzundaki faz ayrımları tahmin edilebilmektedir [234].

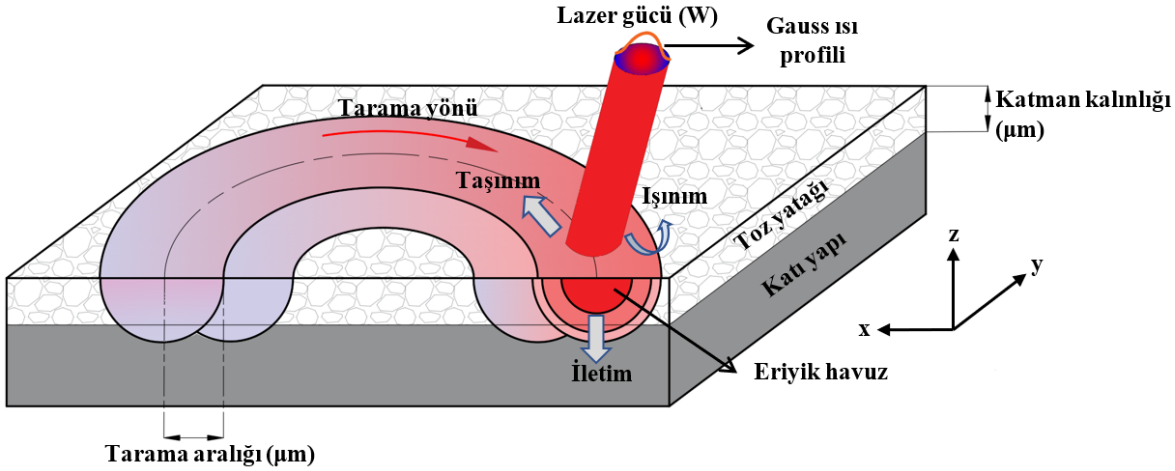
Metal tozların lazerle işlenmesi esnasındaki termal davranışı tahmin etmek için birçok sayısal simülasyon çalışması olmasına rağmen, sınırlı çalışma ince unsurların eriyik havuz simülasyonuna odaklanmıştır. Bu hassas yapıların üretiminde ısı ve kütle transferi hassas bir şekilde kontrol edilmelidir. İnce yapıların eriyik havuz özellikleri ve sonuç olarak parçanın kalitesi sonlu elemanlar yöntemiyle ile tahmin edilebilmektedir. Li vd., birleştirilmiş termal-yapısal analiz kullanarak farklı lazer tarama mesafelerinin ince duvar yapısının sıcaklık, gerilme ve gerinim etkilerini araştırmıştır [235]. Lui vd., farklı alt tabaka malzemelerinin ince duvar parçaların eriyik havuz özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır [221]. Bununla birlikte, çalışmaların hiçbiri çubuk elemanlar gibi ince kafes yapı elemanlarını simüle etmeye odaklanmamıştır. Yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip karmaşık ince eleman yapıların imalat süreçlerinin simüle edilmesi, Eİ yöntemlerinin avantajlarını en üst seviyeye çıkarmak için büyük bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, farklı çaplardaki ince çubuk elemanların SLM imalat süreci sonlu elemanlar analizi ile simüle edilmiştir. Simülasyonda, dairesel yol boyunca hareket eden 3B gauss dağılımlı lazer ısı kaynağının, güç ve tarama hızı parametrelerinin eriyik havuzun termal davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan AlSi10Mg alüminyum alaşım malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Ayrıca eriyik havuzun faz değişimlerinin nümerik analizde dikkate alınmıştır. Bu araştırma, ince çubuk elemanların SLM imalatındaki lazer malzeme etkileşiminin tahmininde kapsamlı bir anlayış sunmaktadır. Böylece, kafes yapıların yüzey ve yapısal özelliklerinin tahmin edilmesi için bir yol haritası sağlanmaktadır.

5.2. SLM Süreci İçin Sonlu Elemanlar Modeli

5.2.1. Modelin fiziksel tasviri ve varsayımlar

Şekil 5.1, SLM işleminde lazer ışıması altındaki toz yatağının şematik diyagramını göstermektedir. Burada yüksek güç yoğunluklu lazer metalik tozları eritmek ve kaynaştırmak için belirli bir hat boyunca ilerlemektedir. Lazer ışınının toz yatağı ile etkileşiminde, lazer enerjisinin bir kısmı toz metale aktarılmakta, bir kısmı da geri yansımakta olup bu enerji aktarımında toz malzemenin boyutu ve fazı belirleyicidir. Emilen lazer enerjisi ile katı haldeki toz faz değiştirerek eriyik havuz oluşturmakta ve ardından bitişik hatlar ve katmanlar arasında metalurjik bir bağ oluşturarak katılaşmaktadır. Bu süreç simüle edilirken iletim, taşınım ve radyasyonla enerji transferi ile faz değişimi sırasında gerçekleşen gizli ısıdan kaynaklanan kayıplar da simülasyona dahil edilmiştir.



Şekil 5.1. Lazer ışıması altındaki toz yatağının termal davranış şematiği

SLM, birçok fiziksel olayı içeren karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle, SLM sürecinin tüm bileşenleri dahil edilerek gerçekleştirilen simülasyonlar hesaplama açısından zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle SLM sürecinin sayısal simülasyonu gerçekleştirilirken işlem verimliliği açısından aşağıdaki basitleştirmeler yapılmıştır.

1. Toz parçacıklarının eşit büyüklükte, tam küresel, kusursuz şekilde istiflenmiş ve sürekli homojen bir ortamda bulunduğu varsayılmıştır.
2. Toz yatağı, hacimsel bir gauss ısı kaynağı radyasyonuna maruz kalmaktadır. Bu nedenle absorpsiyon açı bağımlılığı ve gölgeleme etkileri ihmal edilmiştir.

3. Kaynama noktasındaki maddenin buharlaşması ihmal edilmiştir.
4. Eriyik havuzunun akışkanlığı ve eriyik havuzunun termal dağılımı üzerinde çok az etkiye sahip olan kılcal kuvvet, yüzey gerilimi, Marangoni etkisi gibi bazı iç kuvvetler ihmal edilmiştir.

5.2.2. Korunum denklemleri

SLM işlemi, lazer ışını ile iletilen yüksek yoğunluklu enerjinin metal toza aktarılması sonucu artan sıcaklık seviyelerinde metal tozun eritildiği ve ardından hızla soğuyarak katılaştığı bir termo-akışkan fizik olayına dayanmaktadır. Eriyen tozlar bir eriyik havuzu oluştururlar. Soğuma esnasında yüzey enerjisi ve yüzey gerilimi nedeniyle tozlar birlerine tutunurlar. Eritilmiş tozlar soğuyup katılaştıkça, atomlar arası kuvvetler nedeniyle moleküller bir araya gelmekte ve birbirlerine bağlanmaktadır. Bu bağlanma, malzemenin içindeki enerjiyi düşürmeye yardımcı olmakta ve böylece toz taneleri arasında daha güçlü bağlar oluşturmaktadır. Bu süreç, katılaşan malzemenin bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini belirlemektedir.

SLM işlemi sırasında eriyik havuzdaki sıcaklık dağılımını belirlemek için zamana bağlı ve doğrusal olmayan ısı transferi korunum denklemleri genel olarak şu şekilde ifade edilebilir [236];

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u.\nabla T + \nabla.(-k\nabla T) = A(T)Q_{lazer} + Q_{ışınım} + Q_{buharlaşma} \quad (5.1)$$

Burada *ρ, cp, T* ve *t* sırasıyla yoğunluğu (kg/m^3), özgül ısı kapasitesini (J/kgK), tozun sıcaklığını ve etkileşim süresini göstermektedir. Ayrıca *k, u, A(T), A_{lazer}, $Q_{ışınım}$,* ve $Q_{buharlaşma}$ sırasıyla termal iletkenlik (W/m.K), hız (m/s), sıcaklığa bağlı absorpsiyon katsayısı, giriş lazer enerji kaynağı (W/m^3), yayılan enerjisi (W/m^2) ve buharlaşma ısı kaybı (W/m^3)'dır.

Toz yatağının başlangıç sıcaklığı (T_0), ortam sıcaklığı 293 K olarak kabul edilmektedir.

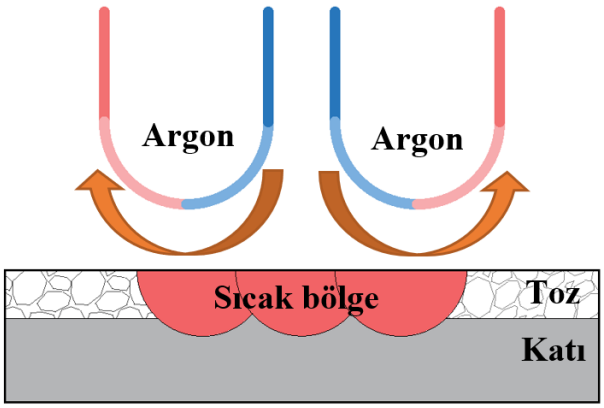
$$T(x,y,z)_{t=0} = T_0 \quad (5.2)$$

Tablanın üst yüzeyi hariç diğer tüm kenarlarının yalıtımlı olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla, sınır boyunca sıcaklık gradyanı sıfırdır. Çözüm alanının yüzeylerindeki ısı akısı sınır koşulu şu şekilde verilmektedir [237];

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0} = \alpha_A q(r) - h(T - T_0) - \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \tag{5.3}$$

Burada $q(r)$, lazer merkezinden r mesafesindeki ısı akısı (W/m^{-2}), k termal iletkenlik (W/mK), σ Stefan–Boltzmann sabiti (5,67x10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}), T_0 ortam sıcaklığı (K) ve h ısı transfer katsayısı (W/m^{-2}.K)'tır. Ayrıca, α_A ve ε sırasıyla absorpsiyon katsayısı ve emisiviteyi temsil etmektedir.

Eş. 5.2'deki taşınım (konveksiyon) ifadesi ($h(T-T0)$) ısı akısı olarak tanımlanmaktadır. Burada h argonun ısı transfer katsayısıdır. SLM sürecinde Şekil 5.2'de görüldüğü gibi yüksek sıcaklıktaki yatay plaka üzerine doğal taşınımla argon gazı etki etmektedir. Doğal taşınım, bir sıvı veya gazın sıcaklık farklarından kaynaklanan yoğunluk değişiklikleri nedeniyle hareket ettiği bir süreçtir. Bu hareket, ısı enerjisinin bir bölgeden diğerine taşınmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.2. Toz yatağının üst yüzeyleri boyunca doğal konveksiyon ısı akısının gösterimi

Argon, periyodik tablonun inert gazlar grubunda yer alan renksiz, kokusuz ve tatsız bir elementtir. SLM prosesinde sıcak bir plaka üzerinde bulunan argon gazı, doğal taşınım sürecine tabi tutulmaktadır. Sıcak plaka, argon gazının alt kısmını ısıtmakta ve bu da gazın yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Yoğunluğu azalan argon gazı, daha soğuk ve yoğun olan gaz kütlesinin üzerine doğru hareket etmektedir. Bu süreç, sıcak gazın yükselmesine ve soğuk gazın aşağı inmesine neden olan bir akış döngüsü oluşturmaktadır.

Bu döngü, ısı enerjisinin sıcak plakadan soğuk gaz tabakalarına taşınmasını sağlar ve sürekli bir akış oluşturarak sürekli bir ısı transferi gerçekleştirir.

SLM sürecinde, lazer eritme nedeniyle fiziksel bir faz değişimi (katı-sıvı) meydana gelmektedir. Katı-sıvı faz değişimi sırasında maddenin iç enerjisi değişmekte ve buna bağlı olarak moleküler bağ ve atomlar arasında değişiklikler meydana gelmektedir. Faz değişimi sırasında malzemenin enerji dengesini ve termodinamik özelliklerini modellemek için kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir. Faz değişim eşitliği, gizli ısı hesaba katılarak entalpinin (H (J/m^3)) bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [234,238,239].

$$H = \int_{T_{ref}}^{T} \rho C_p T \tag{5.4}$$

$$\rho = \theta_1\rho_1 + \theta_2\rho_2 \qquad \theta_1 + \theta_2 = 1 \tag{5.5}$$

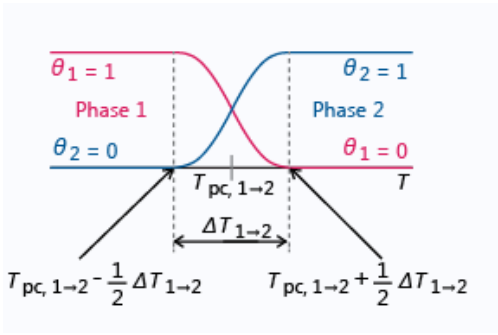
$$C_p = \frac{1}{\rho}\left(\theta_1\rho_1 C_{p1} + \theta_1\rho_1 C_{p1}\right) + L_{1\to2}\frac{\partial\alpha_m}{\partial T} \qquad \alpha_m = \frac{1}{2}\ \frac{\theta_2\rho_2 - \theta_1\rho_1}{\theta_1\rho_1 + \theta_2\rho_2} \tag{5.6}$$

Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), Cp özgül ısı ($J/(kg.K)$), $L_{(1\to2)}$ faz geçişindeki gizli ısı (kJ/kg)'dır. 1 indisi katı fazı temsil ederken, 2 indisi sıvı fazı ifade etmektedir.

Eş 5.4'te, entalpi (H) sıcaklıkla ilgili bir fonksiyon olarak ifade edilmiştir. Başlangıç sıcaklığından (T_{ref}) belirli bir sıcaklığa (T) kadar entalpi değişimi, yoğunluğun (ρ) ve özgül ısının (C_p) bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Eş 5.5, toplam yoğunluğun (ρ) hesaplanmasında faz yoğunlukları (ρ_1 ve ρ_2) ve oranlarının (θ_1 ve θ_2) etkisini ifade etmektedir. Burada, θ_1 ve θ_2'nin toplamı 1'e eşittir, çünkü iki fazın oranlarının toplamı %100 olmalıdır. Eş 5.6, özgül ısının (C_p) iki fazın yoğunlukları, özgül ısıları ve gizli ısı değişimi ile ilişkisini göstermektedir. Burada, α_m ortalama alfa değeri olarak tanımlanır ve entalpi hesaplamalarında gizli ısıyı hesaba katan bir düzeltme faktörü olarak kullanılmaktadır. Faz geçiş aralığında ($L_{(1\to2)}$) farklı malzeme fazlarına sahip bölge "peltemsi bölge" olarak adlandırılmaktadır. Peltemsi bölgenin özellikleri soğuma hızı, malzeme kompozisyonu ve termal gradyanlar gibi faktörlere bağlıdır.

Sayısal modelde AlSi10Mg alüminyum alaşım için tanımlanan faz göstergeleri, faz değişim sıcaklığı ve geçiş aralığı Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. AlSi10Mg alüminyum alaşım için tanımlanan faz göstergeleri, faz değişim sıcaklığı ve faz geçiş aralığı [240]

Özellik	Birim	Değer	Faz değişim grafiği
Faz değişim sıcaklığı ($T_{pc,\,1\to2}$)	K	850	
Geçiş aralığı ($\Delta T_{1\to2}$)	K	40	
Gizli ısı ($L_{1\to2}$)	J/kg	423	

5.2.3. Gauss ısı kaynağı

SLM sürecinin sayısal analizinde Gauss ısı kaynağı, enerji dağılımını temsil etmek ve lazer-toz malzeme etkileşimini modellemek için kullanılan önemli bir bileşendir. SLM sürecinde kullanılan Gauss ışın profili, enerji dağılımı Gauss profilinde olan ve eriyik havuzu şeklini belirleyen bir lazer ısı kaynağı temsil etmektedir. Bu ısı kaynağı, lazer enerjisinin belirli bir alana odaklanmasını sağlayarak, malzemenin düzgün ve kontrollü bir şekilde erimesine ve katmanların hassas bir şekilde oluşmasına olanak vermektedir. Ayrıca, Gauss ısı kaynağı ile lazer odağı ve enerji yoğunluğu ayarlanarak SLM süreci optimize edilebilmektedir. Böylece, yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı erime-geri soğuma hızları sağlanarak gelişmiş mekanik özelliklere sahip nihai parçalar elde edilebilir. Gauss ısı kaynağı kullanılarak yürütülen SLM sürecinde ayrıca daha homojen malzeme özellikleri elde edilmektedir. Gauss dağılımlı lazer ışını, eriyik havuz yapısı yanı sıra mikroyapıyı da belirlemektedir. Bu nedenle, Gauss ısı kaynağı, SLM sürecinin performansını ve üretilen parçaların kalitesini önemli ölçüde etkileyen önemli bir faktördür.

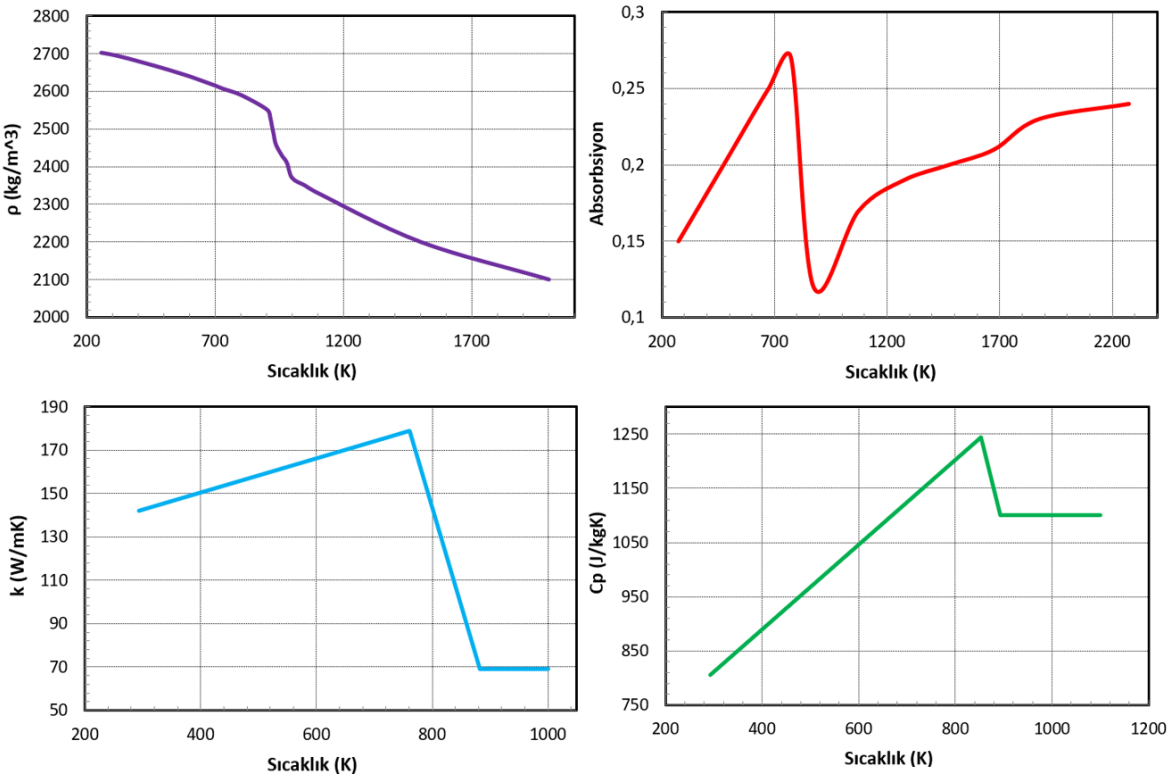
SLM sürecinde katmanlar halinde yayılan tozlar Gauss dağılımlı lazer ışını etkisine maruz kalmaktadır (Şekil 5.4). Lazer ışını, toz malzemenin yüzeyine odaklandığında, enerji ısıya dönüşmekte ve tozun erimesine yol açmaktadır. Tozlar arasındaki boşluk nedeniyle, lazer yalnızca tozun yüzeyine etki etmekle kalmayıp aynı zamanda birçok yansıma yoluyla toz yatağının derinliklerine de nüfuz etmektedir. Penetrasyon derinliği ve çoklu yansımalar göz önüne alındığında, SLM süreçlerinin simülasyonunda matematiksel olarak Eş. 5.7'de ifade edilen hacimsel bir Gauss ısı kaynağı kullanılmıştır [241].

$$\omega(r,\theta,z) = \frac{2\alpha_A P}{\pi {w_0}^2 \Delta} exp\left[-2\frac{R^2}{{w_0}^2}\right] exp\left[-\frac{|z|}{\Delta}\right] \quad (5.7)$$

Burada P lazer gücü (W), α_A sıcaklığa bağlı soğurma katsayısı, w_0 lazer spot yarıçapıdır ve Δ tozun lazer penetrasyon derinliğidir. Lazer penetrasyon derinliği nümerik modelin basitleştirilmesi için katman kalınlığına eşdeğer olarak belirlenmiştir. r, θ, z ise lazer etkileşim noktasının kutupsal koordinatlarıdır. R, spot alanındaki herhangi bir noktadan lazer odağının merkezine olan radyal mesafedir ve $R = \sqrt{r\sin(\theta)^2 + rcos(\theta)^2}$ olarak tanımlanmaktadır.

5.2.4. Termofiziksel özellikleri

SLM sürecinin sayısal simülasyonunda diğer bölümler de olduğu gibi AlSi10Mg alaşım malzeme kullanılmıştır. AlSi10Mg iyi sertliği, yüksek mukavemeti, yüksek dinamik tokluğu ve iyi korozyon direnci nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrilerinin sıklıkla kullanılmaktadır [58]. Bununla birlikte, hafif AlSi10Mg alaşım tozlar zayıf akıcılığa, yüksek yansıtıcılığa ve yüksek termal iletkenliğe sahiptirler. Bu durum ilgili alaşımların SLM gibi termal işlemlerde kullanımını zorlaştırmaktadır [242]. Bu nedenle malzeme ve geometriye bağlı işlem parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 5.3, sayısal analizde kullanılan AlSi10Mg alaşımın sıcaklığa bağlı termofiziksel özelliklerini göstermektedir [243,244]. Ara değerleri hesaplamak için parçalı kübik enterpolasyon kullanılmıştır. Üretim haznesinde koruyucu gaz olarak argon kullanılmıştır. Argonun sıcaklığa bağlı termofiziksel özellikleri ise COMSOL Multiphysics sonlu eleman analiz yazılımı kütüphanesinden alınmıştır [239].



Şekil 5.3. AlSi10Mg alaşımın sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri (a) ρ yoğunluk, (b) α_A absorpsiyon, (c) k termal iletkenlik, (d) Cp özgül ısı [243]

Alüminyum alaşımlarının sıcaklığı arttıkça yoğunluğunun düşmesinin (Şekil 5.3a) temel nedeni, termal genleşme olarak adlandırılan fiziksel bir süreçtir. Termal genleşme, sıcaklık artışıyla birlikte malzeme içindeki atomlar veya moleküller arasındaki ortalama mesafenin artmasıyla malzeme hacminin genişlemesi olarak tanımlanmaktadır. Bu durum malzeme yoğunluğunun düşmesine neden olmaktadır.

Alüminyum alaşımların sıcaklığı arttıkça lazer absorbsiyonunun önce yükselmesi ve sonra faz değişimi sırasında düşmesi, malzemenin optik ve termal özelliklerindeki değişikliklerle ilişkilidir. Sıcaklık arttıkça, alüminyum alaşımlarının serbest elektron sayısı artar. Bu, lazer ışınının daha iyi absorbe edilebilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, sıcaklık arttıkça alüminyum alaşımlarının lazer absorbsiyonu belirli bir seviyeye kadar yükselmektedir. Alüminyum alaşımı erime noktasına yaklaştığında ise malzemede faz değişimi meydana gelmektedir. Bu süreç, alüminyum alaşım yüzeylerinde oksit tabakalarının oluşumu ve iç yapının düzensizleşmesiyle sonuçlanır. Oksit tabakaları lazer ışığını yansıtabilir ve malzemenin iç yapılarındaki düzensizlik lazer enerjisinin dağılımını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, faz değişimi sırasında alüminyum alaşımlarının lazer absorbsiyonu düşmektedir (Şekil 5.3b).

Alüminyum alaşımları genellikle yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Ancak, sıcaklık arttıkça, alüminyum alaşımlarının termal iletkenliği önce belirli bir sıcaklığa (~780 K) kadar hafifçe artmakta ve ardından önemli miktarda azalmaktadır. Bunun nedeni, faz değişimi sıcaklıklarında malzeme içindeki atom ve elektronlar arasındaki titreşimlerin artmasıdır. Bu artan titreşimler ve hareketler, ısı enerjisinin iletimini engelleyerek termal iletkenliği azaltmaktadır (Şekil 5.3c).

Özgül ısı, bir maddenin birim kütlesini 1 derece sıcaklık artışı için gerekli olan ısı miktarını ifade etmektedir. AlSi10Mg malzemenin faz değişimi sırasında, bir maddenin özgül ısısı da değişmektedir. Alüminyum alaşım malzemenin sıvı faza geçmesiyle özgül ısının arttığı görülmektedir (Şekil 5.3d). Bu, sıvı halden katı hale geçişte enerjinin daha çok moleküler bağların oluşumu için kullanılmasına karşın sıvı fazda enerjinin daha çok moleküler hareketlilik için kullanılmasıyla ilgilidir.

Sayısal analizde kullanılan AlSi10Mg malzeme özellikleri ait diğer termofiziksel özellikler Çizelge 5.2'de verilmiştir. AlSi10Mg alaşımının katılaşma noktası (T_s) 830,15 K ve erime noktası (T_l) 870,15 K olarak verilmiştir. Alaşımın katılaşma ve erime sıcaklıkları arasında 40 K'lik bir sıcaklık farkı vardır. Bu nispeten küçük sıcaklık aralığı, malzemenin hassas soğutma ve erime koşulları gerektirdiğine işaret etmektedir. Bu nedenle AlSi10Mg parçaların SLM ile üretiminde kullanılacak lazer enerji yoğunluğunun tahmini oldukça önemlidir. İşlem başlangıç sıcaklığı ise oda sıcaklığı (293,15 K) olarak kabul edilmiştir. Alaşımdaki ışınım yayılımı (ε) değeri 0,36'dır. Bu, malzemenin yüzeyinden yayılan enerji miktarını ifade etmektedir ve süreç sırasında ışınımla gerçekleşen enerji transferinin belirlenmesi için önemli bir parametredir. Yine sayısal analizde kullanılan Alsi10Mg toza ait Stefan-Boltzmann sabiti (birimi $W/(m^2K)$) 5,67x10^-8 olarak belirlenmiştir. Bu değer, ışınım yayılımı ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi tanımlayan sabittir ve enerji transferinin hesaplanması için önemlidir.

Toz çapı, 50 μm olarak belirtilmiştir (Çizelge 5.2). Bu değer, SLM sürecinde kullanılan toz partiküllerinin boyutunu ifade etmektedir. Toz boyutu, üretim sürecinin kalitesi ve parçaların özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Partikül boyutu küçüldükçe, SLM süreci sırasında enerji transferi daha etkili hale gelmektedir ve üretilen parçaların kalitesi artmaktadır. Fakat çok küçük toz partikülleri yüzey enerjisi ve van der Waals kuvvetleri nedeniyle birbirlerine tutunma eğilimindedir. Bu tip topaklanmalar toz akışkanlığını

azaltarak toz yatağının düzgün bir şekilde yayılmasını zorlaştırabilir ve tozun eşit dağılmasını engelleyebilir.

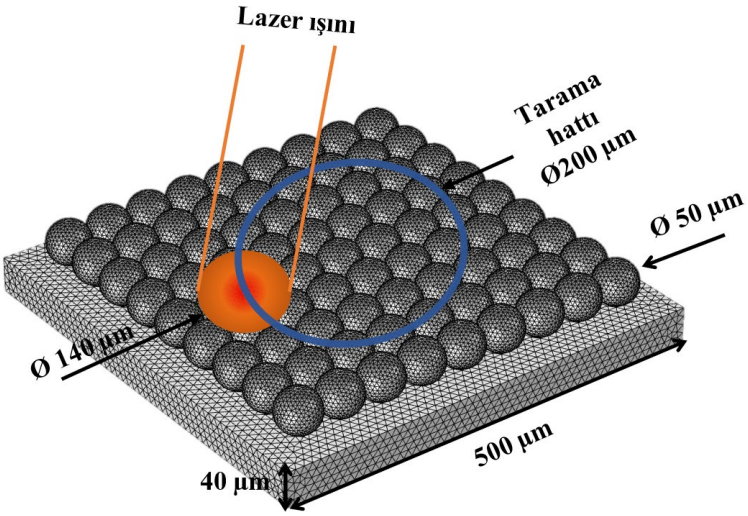
Çizelge 5.2. Sayısal analizde kullanılan AlSi10Mg malzemeye ait termofiziksel özellikler

Özellik	Birim	Değer
Katılaşma noktası, T_s	K	830,15
Erime noktası, T_l	K	870,15
Başlangıç sıcaklığı	K	293,15
Emisivite, ε		0,36
Toz çapı	μm	50
Stefan-Boltzmann sabiti	$W/(m^2K)$	$5,67x10^{-8}$
Yüzey gerilmesi, σ	N/m	0,86-0,92
Sıcaklığa bağlı termal özellikler	Bkz. Şekil 5.3	

5.3. Sayısal Simülasyon

Şekil 5.4'te SLM sürecinin sonlu elemanlar modelinde görüldüğü gibi platform üzerine hizalı bir şekilde yerleştirilen tam küresel tozlar hacimsel bir enerji kayağı kullanılarak ısıl etkiye maruz bırakılmıştır. Hacimsel ısı kaynağı, süreç sırasında enerji dağılımını ve malzeme dönüşümünü modellemek için kullanılan temel bir parametredir. Bu parametre, süreç sırasında oluşan sıcaklık dağılımı ve erime-katılaşma süreçlerini anlamak ve optimize etmek için önemlidir. Hacimsel ısı kaynağını etki süresi boyunca ilgili toz ağ elemanının sıcaklığını artırmaktadır. Isıl etki süresi ise lazer tarama hızına bağlı olarak farklılık göstermektedir. SLM sürecinin sayısal analizinde hacimsel ısı kaynağının hızı ve enerji yoğunluğu, etki ettiği noktanın sıcaklık davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu parametreler, enerjinin malzemeye aktarılma hızını ve dağılımını kontrol ederek, süreç sırasında sıcaklık dağılımını ve malzeme dönüşümünü etkilemektedir. Lazer hızının artması, sıcaklık dağılımının daha hızlı değişmesine neden olmaktadır. Enerji yoğunluğunun artması durumunda ise toz yatağı içindeki sıcaklık yükselmektedir. Ayrıca hacimsel ısı kaynağının hızı ve enerji yoğunluğu, SLM sürecinde gerçekleşen soğutma hızını ve dolayısıyla malzemenin mikroyapısını etkilemektedir. Soğutma hızı, malzemenin tane büyüklüğü, tane sınırları ve faz dağılımı gibi mikroyapı özelliklerini belirlemektedir. Bu özellikler, üretilen

parçaların mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Hız ve enerji yoğunluğu, soğutma hızının ve malzeme mikroyapısının kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 5.4. SLM sürecini simüle etmek için kullanılan sonlu eleman modeli

Hacimsel enerji kaynağı silindirik çubuk numunelerin kontur üretimini simüle etmek üzere dairesel bir hatta hareket etmektedir (Şekil 5.4). Dairesel bir hat üzerinde ilerleyen hacimsel ısı kaynağı silindirik koordinatlar kullanılarak tanımlanmıştır. Bu dairesel hat bir önceki bölümde üretilen 200 µm çaplı çubuk numunelerle benzer çapa sahiptir. Yine çubuk numunelerinin fiziksel üretiminde olduğu gibi simülasyonlarda da lazer ötelemesi yapılmamıştır. Gauss formundaki hacimsel ısı kaynağı toz partiküllerinin üst noktasına uygulanmaktadır. Lazer odak noktasında maksimum enerji yoğunluğu elde edilirken lazer spot sınırlarına yaklaştıkça enerji azalmaktadır (Eş. 5.7). Gauss dağılımlı ve zamana bağlı ısı kaynağının konuma bağlı etkisi spot merkezine olan uzaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmektedir.

Faz değişimi süreci, korunum denklemleri (Eş. 5.1 ve Eş. 5.6) yardımıyla işlem parametrelerine (lazer gücü, tarama hızı, enerji yoğunluğu vb.) bağlı olarak belirlenmektedir. Sayısal analizde faz değişimi, AlSi10Mg alaşımının erime ve katılaşma sıcaklıkları gibi termofiziksel özelliklerine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu termodinamik özellikler, malzemenin ne zaman eriyip katılaşacağına dair sınırları belirlemeye yardımcı olmakta ve faz değişimi sürecinin doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Hacimsel ısı kaynağı tarafından etkilenen noktadaki sıcaklık, malzemenin erime sıcaklığını (870,15 K)

geçtiğinde malzemenin erimiş olduğu ve katılaşma sıcaklığının (830,15 K) altına düştüğünde ise malzemenin katılaştığı kabul edilmektedir. Bu iki sıcaklık değerinin arasında ise Eş 5.5 ve Eş 5.6'da belirtildiği gibi her iki fazında belirli oranda bulunduğu peltemsi bölge yer almaktadır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.3 Sayısal analizde kullanılan işlem parametreleri

Özellik	Birim	Değer
Lazer tarama hızı, *v*	mm/s	400, 600
Lazer gücü (400 mm/s tarama hızı için), *P*	W	40, 80, 120, 160
Lazer gücü (600 mm/s tarama hızı için), *P*	W	60, 120, 180, 240
Çubuk eleman kontur çapı	µm	200
Spot çapı	µm	140
Toz katman kalınlığı, *d*	µm	50
Ortam başlangıç sıcaklığı, T_0	K	293,15

Çizelge 5.3'te çubuk elemanların SLM ile üretiminin sayısal analizinde kullanılan işlem parametreleri verilmiştir. Parametre seti olarak Bölüm 4'te çubuk elemanların SLM ile üretiminde kullanılan parametre setine benzer değerler kullanılmıştır. Burada sayısal analiz modelinin deneysel yöntemlerle verifikasyonu hedeflenmiştir. Lazer tarama hızı için 400 mm/s ve 600 mm/s olmak üzere iki farklı değer kullanılmıştır. Bu iki hız seviyesi için farklı lazer güçleri uygulanmıştır. 400 mm/s tarama hızı için, lazer güç değerleri 40 W, 80 W, 120 W ve 160 W olarak belirlenmiştir. 600 mm/s tarama hızı için ise lazer güç değerleri 60 W, 120 W, 180 W ve 240 W olarak seçilmiştir. Bu değerler, Bölüm 4'te belirtildiği üzere, tarama hızı ve lazer gücüne bağlı olarak değişen hacimsel enerji yoğunluğu ve lazer güç yoğunluğunun, çubuk elemanların yüzey morfolojileri ve eriyik havuz yapıları üzerindeki etkilerinin tahmin edilmesine olanak tanımaktadır.

Sayısal model, COMSOL Multiphysics sonlu elemanlar yazılımının zamana bağlı ısı transfer modülü kullanılarak geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ve boyutları Şekil 5.4'te verilmiştir. AlSi10Mg alaşım tozlarının üzerinde yer aldığı platform yine aynı malzemeden

blok olarak tanımlanmıştır. Platform üzerine aynı çaptaki (Ø50 µm) AlSi10Mg tozları hizalanmıştır. Modelin hesaplama doğruluğunu artırmak için yaklaşık 500.000 adet dört yüzlü ağ (İng. tetrahedral mesh) elemanı kullanılmıştır. Analizlerin ağdan bağımsız bölgede yapılabilmesini sağlamak için maksimum eleman boyutu 10 µm, maksimum büyüme hızı 1,3 ve eğrilik faktörü 0,2 olarak alınmıştır. Tam dairesel tek hattın lazer tarama verileri 0,01 bağıl toleransla 300 zaman adımında elde edilmiştir. Sayısal çözümlemede tam bağlı paralel ayrık doğrusal çözücü (PARDISO) kullanılmıştır. PARDISO büyük, ayrık matrislere sahip mühendislik ve fizik problemlerini hızlı ve etkili bir şekilde çözmek için kullanılmaktadır. Bu çözücü, performansı ve hafıza verimliliği nedeniyle karmaşık simülasyonlarda tercih edilmektedir. Sayısal modelin çift CPU Intel Xeon X5690 işlemciye sahip iş istasyonu kullanılarak çözümlenmesi yaklaşık 30 dakika sürmüştür.

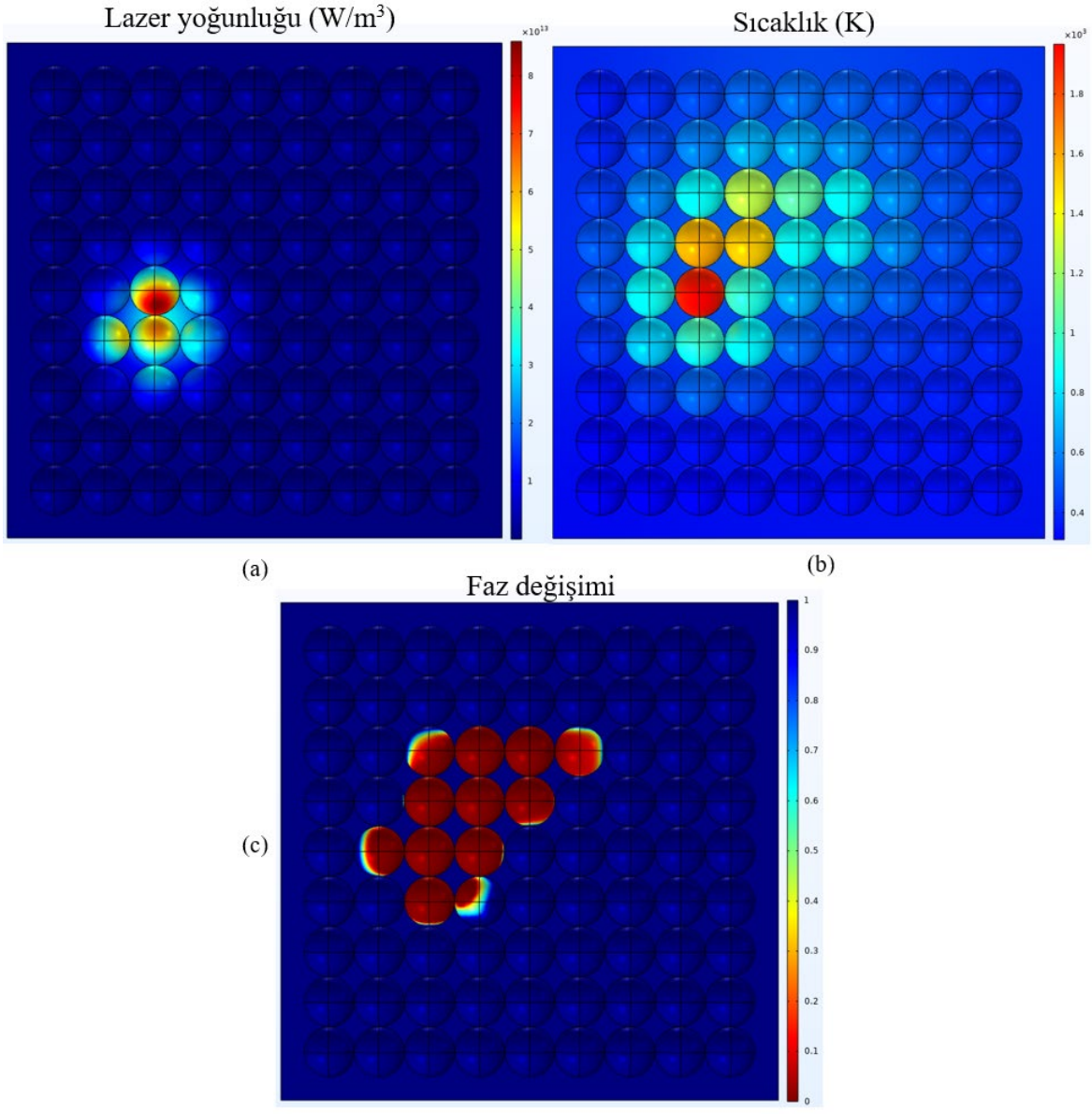
5.4. Bulgular ve Tartışma

5.4.1. Sıcaklık dağılım özellikleri

Sayısal analizde kullanılan sonlu elemanlar modeli Şekil 5.4'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere 40 µm kalınlığındaki platform üzerine hizalı bir şekilde serilen 50 µm çaplı tozların üzerine 140 µm çaplı gauss dağılımlı hacimsel ısı kaynağı etki etmektedir. Hacimsel ısı kaynağı 200 µm çaplı konturu tam bir tur taramaktadır. SLM simülasyon sürecinde kullanılan işlem parametreleri ise Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Şekil 5.5'te ise 165. adımında lazer gücü 180 W ve tarama hızı 600 mm/s iken $t=5{,}79\text{x}10^{-4}$ s'deki sıcaklık dağılımı, lazer ışınımını ve faz ayrımını gösterilmiştir. Şekil 5.5a'da görüldüğü gibi belirli hat boyunca ilerleyen belirli yoğunlukta ve gauss formundaki lazer ışını alüminyum alaşım tozun üst yüzeylerine etki etmektedir. Şekil 5.5b'de ise aynı esnada toz yüzeylerinin sıcaklıkları verilmiştir. İlgili toz partikülündeki maksimum sıcaklık seyrinin lazer etkisinden 0,2 milisaniye (ms)'den az bir süre sonra elde edildiği görülmektedir. İlgili işlem parametrelerinde elde edilen maksimum sıcaklığın 1950 K olduğu belirlenmiştir. Bu değer AlSi10Mg alaşım malzemenin erime sıcaklığından (T_l = 870,15 K) oldukça fazladır. Şekil 5.5c'de ise faz değişimi gösterilmektedir. Burada kırmızı ile gösterilen tozların sıvı fazda, mavi tozların katı fazda ve bu iki renk arasındaki skalada kalan tozların ise peltemsi bölgede olduğu söylenebilir. Şekil 5.5c'de belirtilen lazer işlem parametrelerinde, lazer odak noktası henüz bir sonraki toza doğrudan etki etmeden erimenin başladığı görülmüştür.

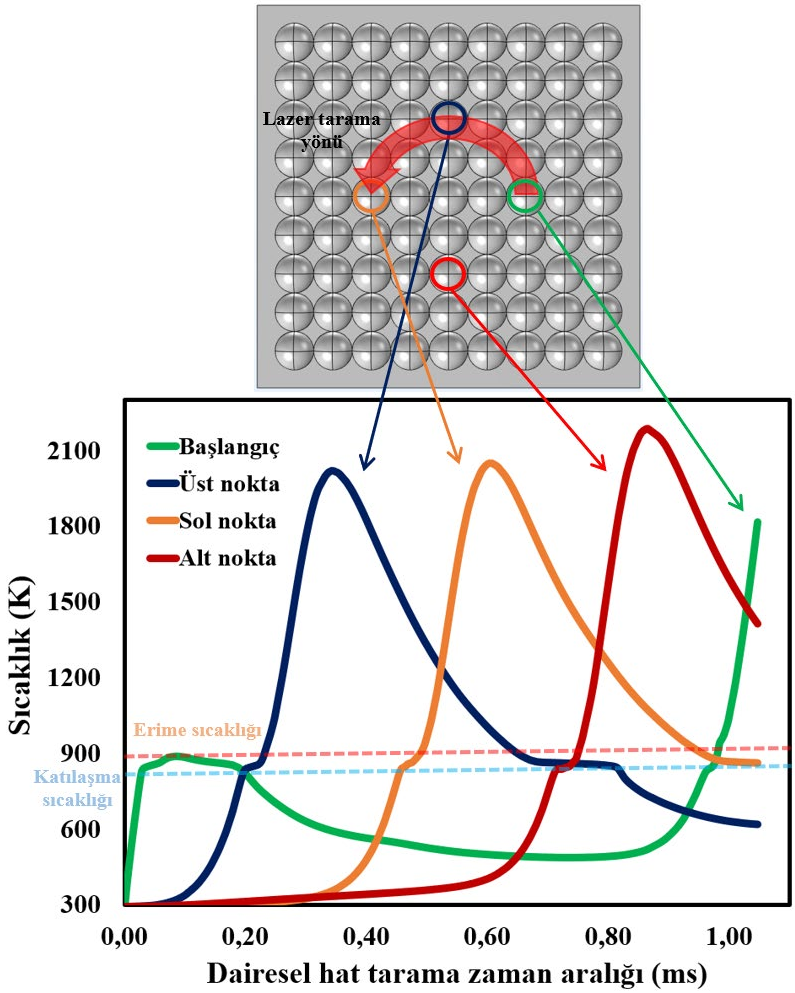
Ayrıca lazer etkisi altındaki tozun sağ ve sol taraflarında bulunan tozlarında sıvı faza geçtiği görülmüştür. Ortam sıcaklığındaki argon gazı ile dolu haznede katılaşma işleminin ise yaklaşık 0,4 ms sonra başladığı saptanmıştır. Katılaşma hızı sıvı fazdan katı faza geçen alaşımın termofiziksel özelliklerine (Şekil 5.3) bağlı ısı transferinin bir sonucu olarak farklılık göstermektedir.



Şekil 5.5. Lazer gücü 180 W ve tarama hızı 600 mm/s lazer parametreleri kullanılarak $t=5{,}79x10^{-4}$ saniyede elde edilen (a) lazer ışınımını (b) sıcaklık dağılımı ve (c) faz ayrımını gösteren sonlu elemanlar analizi sonucu

Şekil 5.6'da, 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızına sahip hacimsel enerji kaynağının 200 µm çaplı hat etrafında bir tam tur dönmesi sonucu farklı lokasyonlarda meydana gelen zamana bağlı ısıl değişimler verilmiştir. SLM sürecinin sayısal analizde Gauss formundaki

lazer enerji kaynağının 200 µm çaplı hat etrafında bir tam tur hareketi yaklaşık 1 ms sürmüştür. Maksimum sıcaklık değerleri toz tanesinin en üst noktası baz alınarak elde edilmiştir.



Şekil 5.6. 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı kullanılarak elde edilen SLM sürecinin sayısal analizde farklı konumlardaki toz tanelerinin zaman bağlı sıcaklık değişimini

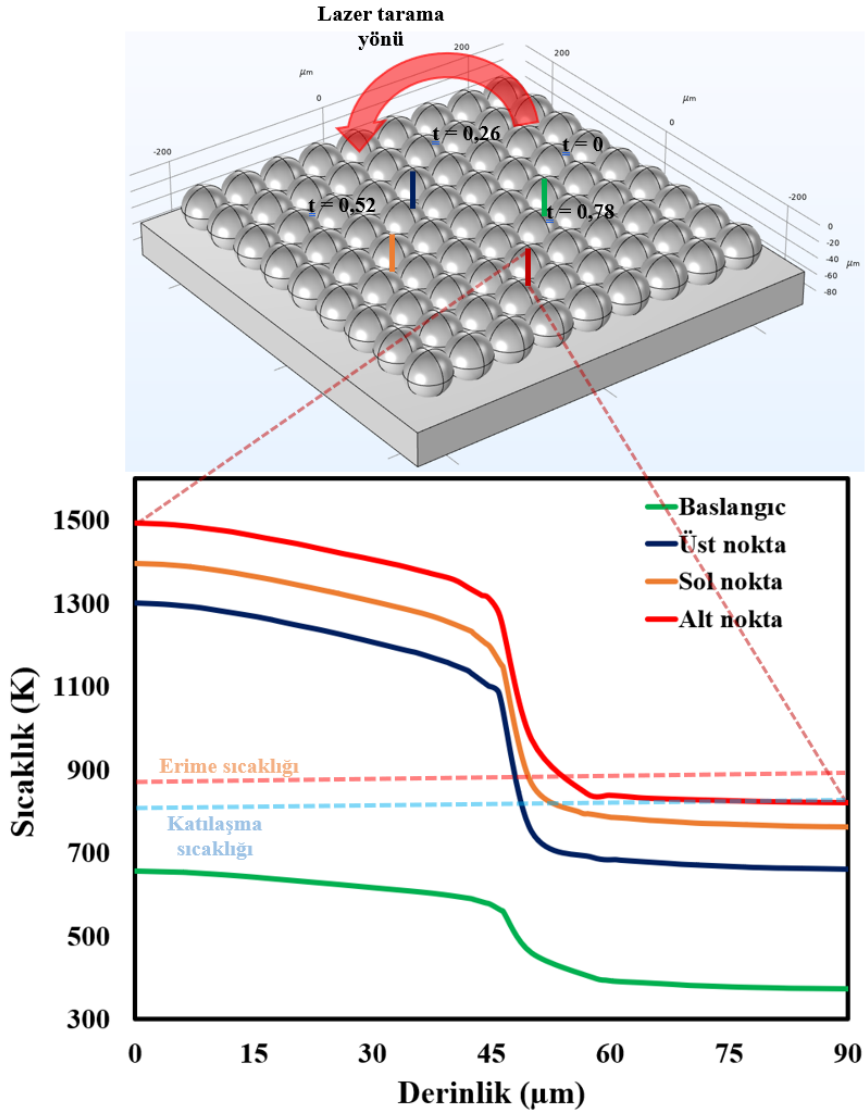
Şekil 5.6'da görüldüğü üzere lazer etkisinin başlangıç ve bitiş noktasında sıcaklıkta ani bir artış görülmektedir. Başlangıç noktadaki bu iki pik arasında soğuma platosu yer almaktadır. İlgili işlem parametrelerinde başlangıçtaki lazer etkisinin alüminyum alaşım tozunu eritmek için yeterli seviyede (< 870 K) olduğu görülmüştür. Dairesel hareketin bitiş noktasında ise bu bölgede eriyip katılaşan toz ikincil erimeye maruz kalmıştır. Alt noktanın zamana bağlı sıcaklık grafiği incelendiğinde ise 0,6 ms değerine kadar lineer bir şekilde biraz yükseldiği (293K'den 400K'e) ardından lazer ışın odağının toz üzerine doğrudan temasıyla hızlı bir biçimde arttığı görülmektedir. Bu durum, küçük çaplı (200 µm) dairesel hatta ilerleyen gauss

formlu lazer ısı kaynağının ürettiği termal gradyanın komşu tozlarda ön ısıtmaya neden olduğunun göstergesidir.

Şekil 5.6'da tüm lokasyonlarda sıcaklık değerinin erime sıcaklığına (870 K) ulaştığı noktada kısa bir faz dönüşüm aralığı görülmektedir. Bu aralıkta sıcaklık artış hızı kısa süreliğine yavaşlamıştır. Ardından sıvı faza geçen alaşımın sıcaklığının ısıl etkiyle hızlı bir biçimde yükseldiği görülmektedir. Yine üst noktada konumlandırılmış tozun 0,8 ms'de katılaşma sıcaklığının altına düşerek katılaştığı görülmektedir. Katılaşma sürecinden hemen önce neredeyse yatay seyreden sıcaklık eğrisi katılaşmanın ardından azalan bir eğimle soğumaya başlamıştır. Bu plato eğrisi katılaşma sırasında serbest bırakılan gizli ısıdan kaynaklanmaktadır. Ayrıca farklı fazlarda malzeme farklı iletkenlik oranlarına sahiptir (Şekil 5.3c). Yine sıcaklık değişimleri sırasında depolanan enerji miktarını belirleyen özgül ısı kapasitesine (Şekil 5.3d) bağlı olarak faz dönüşüm bölgelerinde farklı sıcaklık değişim hızları görülmektedir. Sonuç olarak faz dönüşüm bölgelerindeki bu farklılıklar alaşımın kimyasal bileşimi, termodinamik dengesi ve ısıl işlem koşulları gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.6'da farklı konumlarda yer alan tozların zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri incelendiğinde, üst noktadaki maksimum sıcaklık değerinin 1950 K ile 0,37 ms'de elde edildiği görülmüştür. Sol nokta için maksimum sıcaklık değerinin 2050 K olarak 0,6 ms'de yer aldığı görülmektedir. Alt nokta için maksimum sıcaklık değeri ise 0,85 ms'de 2173 K olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi kontur tarama sürecinde lazer odağının daha geç etki ettiği tozların sıcaklığı öncekilere nazaran daha yüksektir. Bu durum ısı birikiminin hat boyunca arttığını göstermekte olup; lazer ile toz malzeme arasındaki etkileşim mekanizmasının ve iletim ile ısı transferinin bir sonucudur. Lazer odak noktası, dairesel hattın başlangıcındaki tozlar üzerine etki ettiğinde, bu bölgelerde oluşan ısı, malzeme içinde ve çevredeki tozlar arasında iletilmektedir. Bu ısı, henüz lazer etkisine maruz kalmamış olsalar bile takip eden tozların sıcaklığını belirli ölçüde artırmaktadır. Diğer yandan lazer ışını, metal tozlar arasında yansıyabilir ve daha önce eritilmemiş tozlara etki edebilir. Bu, daha geç etki edilen tozların sıcaklığının daha yüksek olmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, eriyen ve katılaşan tozlar, lazer enerjisinin emilim özelliklerini değiştirerek, daha sonraki tozların daha fazla ısı emmesine ve daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasına neden olabilir.

SLM işleminde yüzeye etki eden lazer enerjisinin toz derinliği boyunca ısıl yayılımı bir dizi faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler lazer gücü, tarama hızı, toz tabakasının kalınlığı ve malzeme özellikleri gibi etkilerin bir kombinasyonudur. Eş. 5.3'te ifade edildiği gibi SLM sürecinde toz tanesinin üst yüzeyine etki eden lazer ışın enerjisinin bir kısmı geri yansımakta bir kısmı yüzeyde taşınım etkisiyle baskı hacmine aktarılmakta, kalan kısmı ise yüzey tarafından soğrulmaktadır. SLM işleminin sayısal analizinde baskı hacminin tamamen argon gazı ile dolu olduğu varsayılmıştır. Işınımla ısı kaybı miktarı ise alüminyum alaşıma ait absorpsiyon katsayısı α_A, ve emisiviteye ε, bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5.3b'de AlSi10Mg alüminyum alaşıma ait sıcaklığı bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi verilmiştir. Sayısal analizde emisivite ε ise 0,36 olarak alınmıştır. Sayısal analizde kullanılan gauss ışın dağılımlı hacimsel ısı kaynağının derinlik boyunca (z ekseni) etkisi Eş. 5.7'in son ifadesinde görüldüğü gibi yüzeyle olan mesafeye ve katman kalınlığına bağlı olarak eksponansiyel azalmaktadır. Şekil 5.7'de 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızına sahip lazer ışını toz etkileşimi sonucu ortaya çıkan toz derinliği boyunca sıcaklık gradyanı verilmiştir. Sıcaklık gradyanları Şekil 5.6'ya benzer şekilde toz yatağının farklı lokasyonlarından elde edilmiştir. Gradyanlar lazer spotunun ilgili tozun üst noktasına temas ettiği zaman dilimi baz alınarak hesaplanmıştır. Lazer enerjisi toz tabakasının yüzeyine uygulandığında, bu bölgede sıcaklık hızla artar ve erime başlar. Toz tabakasının yüzeyindeki bu erime bölgesi, en yüksek sıcaklık değerlerine sahiptir. Sıcaklık gradyanı, yüzeyden derinliklere doğru düşüş eğilimindedir.



Şekil 5.7. 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı kullanılarak elde edilen SLM sürecinin sayısal analizde farklı toz yatağı konumlardaki sıcaklığın derinlik boyunca değişimi

Şekil 5.7'de farklı konumlarda yer alan tozların derinliğe bağlı sıcaklık değişim grafikleri incelendiğinde başlangıç noktası haricinde diğer konumlarda benzer eğilimler görülmektedir. Bu konumlarda maksimum sıcaklık toz yüzeyinde elde edilirken toz tanesinin alt kısımlarına geldikçe sıcaklık kademeli olarak azalmaktadır. Platform ile toz tanesi arasında ise sıcaklığın önemli miktarda düştüğü görülmektedir. Bu duruma ısıl iletkenliğe bağlı sıcaklık gradyanlarının derinliğe bağlı azalması ve geçiş bölgesinde taşınımla ısı transfer mekanizmasının etkileriyle yüksek enerji kayıplarının meydana gelmesi neden olmuştur. Ayrıca platform veya inşa edilen parça bloğu ısı emerek bu bölgelerde hızlı soğumaya neden olmaktadır. Böylece, platform ile toz tanesi arasındaki sıcaklık önemli ölçüde düşmektedir. Üretim sırasında platformun sıcaklığı da zamanla

artabilir, ancak genellikle toz yüzeyinden daha düşük bir sıcaklıkta kalmaktadır. En yüksek sıcaklık (1490 K) ısıl birikimlerin etkisiyle alt konumumda t = 0,78 ms zamanında elde edilmiştir. Başlangıç konumundaki toz hariç diğer tüm alaşım tozların lazer ışın odağının temas etmesiyle tamamen eridiği görülmektedir. Platformun ısınması için belli bir süre gerektirmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizde hesaplama verimliliği açısından ihmal edilen akışkanlar mekaniğine bağlı etkilerde platform sıcaklığının artmasında etkilidir. Başlangıç konunda ise lazer enerjisinin, toz yatağını erimenin başlayacağı sıcaklık seviyesine (870 K) ulaştırmada yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu duruma başlangıç sıcaklığının düşük olması ve başlangıç anında lazer odak noktasının doğru odaklanmaması neden olmuştur. Ayrıca başlangıç anında lazer enerji yoğunluğu kademeli olarak yükselmektedir. Fiziksel SLM üretim sürecinde de başlangıç anında da lazer gücü ve ışını sürekli olmadığından sayısal analizde karşılaşılan bu durum olasıdır. t = 0 anında yetersiz lazer enerjisine maruz kalan bu tozlar ısınmakta (670 K'e kadar) ve sinterlenmektedir. Sinterleme sıcaklığı, erime sıcaklığının altındadır ve AlSi10Mg sinterlenme sıcaklığı genellikle 600-800 K arasındadır. Sinterleme süreci, malzemenin belirli bir sıcaklıkta yoğunlaşmasını ve parçacıkların birleşerek daha sıkı bir yapı oluşturmasını sağlamaktadır. Dairesel hat boyunca ilerleyen lazer kaynağının son adımında bu tozlar ikincil sinterlenme etkilerine maruz kalarak yüksek yoğunluklu katı geometrinin elde edilmesine katkı sağlarlar.

Sonuç olarak, 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı kullanılarak gerçekleştirilen SLM sürecinin sayısal analizinde, sıcaklık dağılımının zamana bağlı ve derinlik boyunca değişimi irdelenmiştir. Bu analiz, doğru işlem parametrelerinin belirlenmesinde, enerji yoğunluğunun ve soğutma hızının süreç üzerindeki etkisinin anlaşılmasında ve SLM sürecinin optimize edilmesinde değerli bir araçtır.

5.4.2. İşlem parametrelerinin termal davranışa etkisi

SLM sürecinde, lazer enerjisinin toz yatağındaki sıcaklık dağılımına etkisi, sıcaklık değişim hızı, soğuma hızı ve ısıl geçiş etkileri gibi termal davranışların optimizasyonu ile yüksek yoğunluklu ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip parçalar imal edilebilmektedir. SLM işlem parametrelerinin sayısal simülasyon kullanılarak optimizasyonu ile lazer malzeme etkileşimindeki termal davranışlar deneysel test süreçlerine nazaran hızlı ve düşük maliyetli bir biçimde belirlenebilir. Çalışmada 400 mm/s ve 600 mm/s olmak üzere iki farklı tarama

hızı kullanılmıştır. Ayrıca her bir tarama hızı için dört farklı lazer gücü belirlenmiştir. Bölüm 4'te olduğu gibi farklı lazer tarama hızları için ardışık lazer güçlerinde aynı lazer enerji yoğunluğu elde edilmiştir (Çizelge 5.4). Hacimsel enerji yoğunlukları her iki tarama hızı içinde sırasıyla 24, 48, 71 ve 95 J/mm^3 olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.4'te kullanılan lazer parametrelerine ait ayrıntılı enerji yoğunluğu (EY - (J/mm^3)) ve lazer güç yoğunluğu (GY - W/cm^3) değerleri verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere enerji yoğunluğu aynı olmasına karşın lazer gücüne bağlı değişen güç yoğunlukları farklıdır. Ayrıca güç yoğunluklarının aynı olduğu fakat enerji yoğunluklarının farklı olduğu parametrelere yer verilmiştir. Böylece hacimsel enerji yoğunluğu ve lazer güç yoğunluğunun ısıl dağılama ve eriyik havuz morfolojisine etkileri belirlenmiştir.

Çizelge 5.4. Lazer işlem parametre seti ile ilgili parametreler ait enerji yoğunluğu (EY - (J/mm^3)) ve lazer güç yoğunluğu (GY - W/cm^3) değerleri

SET 1	Lazer tarama hızı: 600							
Güç (W)	60		120		180		240	
	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)
	24	3250	48	7800	71	11700	95	15600
SET 2	Lazer tarama hızı: 400 mm/s							
Güç (W)	40		80		120		160	
	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)	EY (J/mm^3)	GY (W/cm^3)
	24	2600	48	5200	71	7800	95	10400

Çizelge 5.4'te verilen parametre setleri kullanılarak yürütülen sonlu elemanlar analizinde dairesel tarama hattının üst noktasında oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekilde Bölüm 4'te elde edilen deneysel sonuçları destekleyecek şekilde hacimsel enerji yoğunluğunun sıcaklık dağılımın tahmin edilmesinde tek başına yeterli olmadığı görülmüştür. Aynı enerji yoğunluğuna sahip setlerden daha yüksek lazer güç yoğunluğuna sahip setin (SET 1) maksimum sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. 24 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğu kullanılarak elde edilen sonuçlarda her iki set içinde (SET 1 için P=60 W, v=0,4 mm/s ve SET 2 için P=40 W, v=0,4 m/s) AlSi10Mg için erime sıcaklığının (870 K) aşılmadığı görülmüştür. Bu enerji yoğunluğunda yüksek lazer güç yoğunluğuna sahip analiz setinin (SET 1) t=0,3 ms anında maksimum sıcaklık değerinin 850 K olduğu görülmüştür. Bu durumda, ilgi proses parametrelerinde (P=60 W, v=0,6 m/s), toz yatağının yoğun bir şekilde sinterlendiği söylenebilir. Fakat tam erimenin olmaması nedeniyle bu işlem parametreleri ile üretilen numunelerde yoğun poroziteye görülmektedir. 24 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğu ve 2600 W/cm^3 lazer güç yoğunluğu kullanılarak elde

edilen analiz sonuçlarında ise sinterlenme etkilerinin de yeteri kadar gerçekleşmeyerek yoğun gözenekli ve düşük mekanik özelliklere sahip yapılara neden olabileceği görülmüştür.

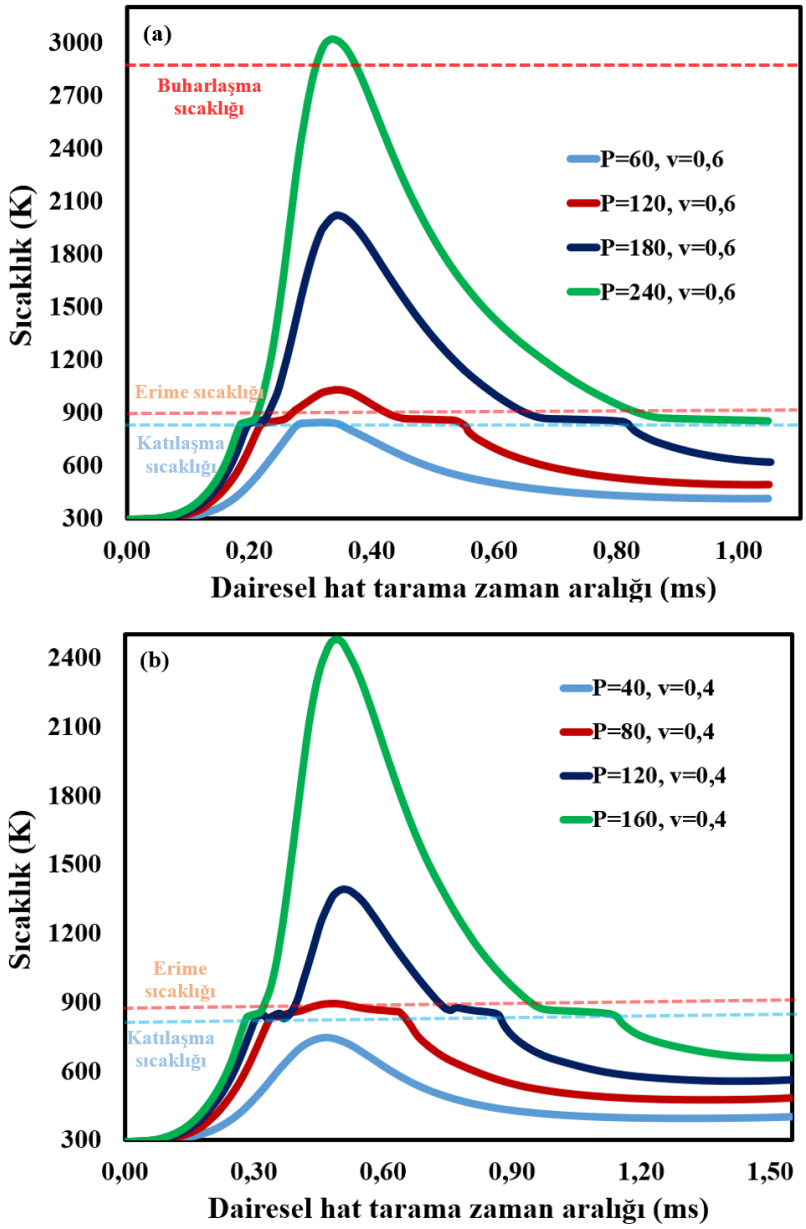
48 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğu kullanılarak elde edilen sonuçlarda her iki set içinde (SET 1 için P=120 W, v=0,6 mm/s ve SET 2 için P=80 W, v=0,4 m/s) AlSi10Mg için erime sıcaklığının (870 K) aşıldığı görülmüştür. Fakat elde edilen maksimum sıcaklıklar erime sıcaklığının hemen üstündedir. Bu durum yüzeyde erimenin olacağı anlamına gelse de toz derinliği boyunca azalan sıcaklık gradyanı nedeniyle önceki katmanın eritilmesinde yetersiz kalınacağını göstermektedir. Bu nedenle katmanlar arasındaki yetersiz kaynaşma nedeniyle parçada yoğun anizotropik etkiler ve düşük mekanik özellikler gözlemlenecektir.

95 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğu kullanılarak elde edilen sonuçlarda ise 15600 W/cm^3 lazer güç yoğunluğuna sahip analizde (SET 1) maksimum sıcaklık değerinin t=0,3 ms anında 3000 K'e çıktığı görülmüştür. Bu sıcaklık AlSi10Mg için buharlaşma sıcaklığının (2750 K) üstündedir. Buharlaşma sıcaklığına ulaşıldığında, malzeme sıvı fazdan gaz fazına geçiş yapmaktadır. Bu durum anahtar deliği tipi porozitelere yol açmaktadır. Ayrıca, buharlaşma, partikül sıçramasına sebebiyet vererek hatalı yapının oluşmasına (düşük boyutsal doğruluk, yüksek pürüzlülük) neden olmaktadır. Aynı hacimsel enerji yoğunluğuna (95 J/mm^3) fakat 10400 W/cm^3 lazer güç yoğunluğuna sahip parametre setinde (SET 2) ise aynı konumdaki maksimum sıcaklık değeri t=0,5 ms anında 2400 K olarak elde edilmiştir.

Her iki parametre seti içinde en optimum hacimsel enerji yoğunluğu değerinin 71 J/mm^3 olduğu görülmüştür. Bu enerji yoğunluğu değeri, SET 1 için P=120 W, v=0,6 mm/s ve SET 2 için P=80 W, v=0,4 m/s işlem parametrelerinde elde edilmiştir. Lazer güç yoğunluğuna bağlı olarak maksimum sıcaklık değerleri 11700 W/cm^3 lazer güç yoğunluğuna sahip SET 1 için t=0,3 ms anında 2020 K ve 7800 W/cm^3 lazer güç yoğunluğuna sahip SET 2 için t=0,5 ms anında 1370 K olarak hesaplanmıştır.

Aynı lazer güç yoğunluğuna (P=120 W), farklı tarama hızlarına ve enerji yoğunluğuna (SET 1 için v=0,6 m/s, EY=48 J/mm^3) ve SET 2 için v=0,4 m/s, EY=71 J/mm^3) sahip setler kıyaslandığında ise maksimum sıcaklığın SET 1 için t=0,3 ms anında 1030 K ve SET 2 için t=0,5 ms anında 1385 K olduğu görülmektedir. Aynı güç yoğunluğuna sahip lazer parametrelerinden daha yavaş lazer tarama hızına sahip olanın maksimum sıcaklık değerinin hızlı olana nazaran 355 K fazla olduğu görülmüştür. Lazer tarama hızı, SLM sürecindeki

malzemenin ısınma derecesini önemli ölçüde etkileyen bir faktördür. Aynı güç yoğunluğuna sahip lazer parametrelerinde, lazer tarama hızı düştükçe, lazer ışınının belirli bir noktada daha uzun süre kalacağı ve dolayısıyla o noktanın sıcaklığının daha fazla olacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 5.8. 200 µm çaplı dairesel tarama hattının üst noktasında oluşan farklı işlem parametrelerine bağlı sıcaklık değişimi

Özetle, Şekil 5.8, lazer işlem parametrelerinin, özellikle lazer gücü, tarama hızı, hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3) ve lazer güç yoğunluğu (W/cm^3) gibi parametrelerin, toz yatağı sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu açıkça göstermektedir. Lazer gücü, ısının

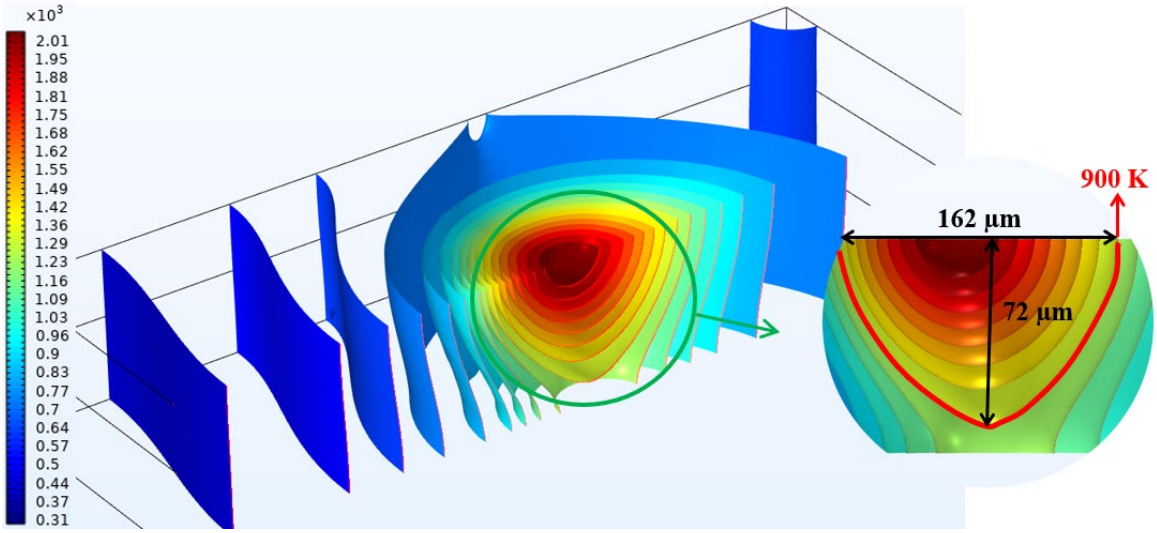
kaynağı olduğu için, malzemeye aktarılan enerji miktarını doğrudan belirlemektedir Tarama hızı ise belirli bir noktadaki ısınma süresini kontrol ederek lazerin malzemeye enerji transfer etmek için harcadığı zamanı belirlemektedir. Daha yavaş tarama hızları, daha yüksek lokal sıcaklıklara neden olmaktadır. Hacimsel enerji yoğunluğu ve lazer güç yoğunluğu gibi parametreler ise lazerin malzeme üzerindeki termal etkilerinin belirlenmesinde etkin bir biçimde kullanılabilir. Yüksek enerji yoğunlukları, malzemenin daha hızlı ve daha geniş bir alanda erimesine neden olmakla birlikte, çok yüksek güç yoğunlukları istenmeyen etkilere, örneğin malzemenin aşırı ısınması veya buharlaşması gibi durumlara, yol açabilmektedir. Bu parametrelerin dikkatlice kontrol edilmesi ve ayarlanması, SLM ile üretilen parçaların kalitesini ve tutarlılığını sağlamak için gereklidir. Bu nedenle, herhangi bir SLM uygulamasında lazer işlem parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve yönetilmesi ürünün kalitesini belirleme oldukça önemlidir.

5.4.3. İşlem parametrelerinin eriyik havuz yapısına etkisi

Şekil 5.9'da 180 W lazer gücüne ve 600 mm/s tarama hızına sahip lazer ısı kaynağı - alaşım tozu etkileşimi sonucu elde edilen ısıl dağılım ve eriyik havuz yapısı görülmektedir. Analizde hesaplama verimliliği sağlamak için toz yapısı aynı malzeme ve aynı kalınlıktaki dikdörtgen blokla değiştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi toz yatağının üst yüzeyine etkiyen lazer ışını önceki katmanda yer alan katı malzemeyi eriterek yarım ay şeklindeki eriyik havuzuna neden olmaktadır. Eriyik havuzun bu şekli gauss dağılımlı ısıl etkilere bağlı olarak oluşmuştur. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi 180 W lazer gücüne ve 600 mm/s tarama hızına sahip lazer ısı kaynağı 98 µm eriyik havuz genişliğine ve 60 µm eriyik havuz derinliğine neden olmaktadır. Isı, malzeme yüzeyi boyunca daha hızlı yayılmakta ve derinliğe doğru daha yavaş ilerlemektedir. Bu, eriyik havuzun yüzey alanının, derinliğinden daha geniş olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, malzemenin iç kısımlarında lazer ışınının enerjisi nüfuziyeti azalmaktadır. Bu, yüzeyde geniş, ancak sığ bir eriyik havuzun oluşmasına neden olmaktadır.

Eş yüzeyler incelendiğinde ise hareket yönünde sıcaklık gradyan sıklığının arttığı lazer odak noktasının arkasında kalan bölümlerde ise kontur sınırlarının genişlediği görülmektedir. Lazer spotu hareket ederken, toz katmanına ani ve yoğun bir şekilde ısı enerjisi aktarılmaktadır. Bu enerji, malzemenin belirli bir alanını hızla ısıtmakta ve bu bölgedeki sıcaklık gradyanını artırmaktadır. Lazer spotu hızla hareket ettiği için, bu bölgedeki ısı

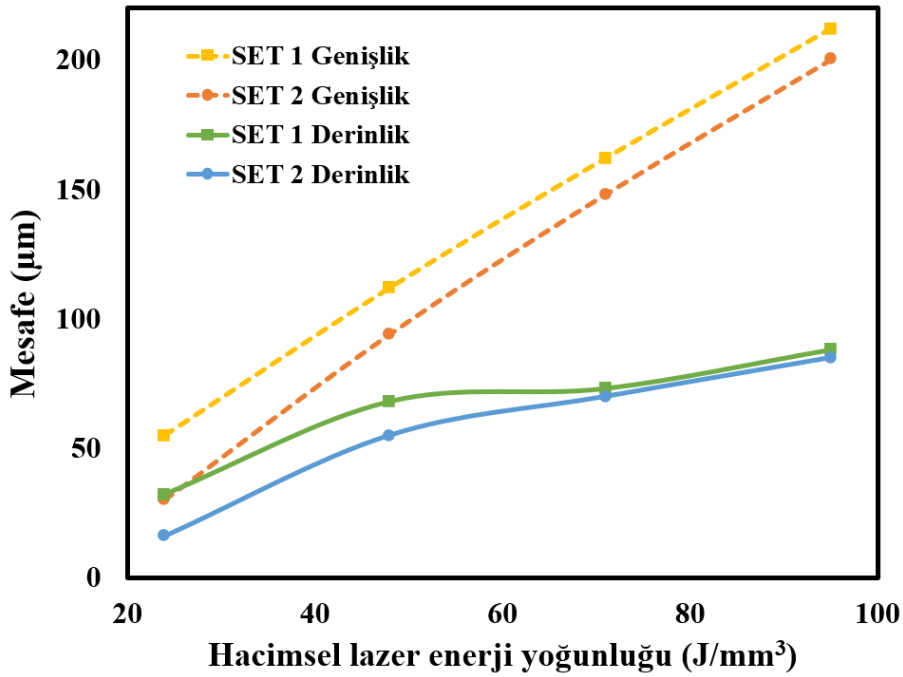
birikimi genellikle daha dar bir alanda yoğunlaşmaktadır. Lazer spotu geçtikten sonra, yüksek enerjili bölge hızla soğumaya başlamaktadır. Bu, malzemenin ısıyı daha geniş bir alana yayması ve daha geniş bir eş kontur oluşturması anlamına gelmektedir. Bu bölgelerde sıcaklık dağılımı daha az yoğun ve daha az öngörülebilir niteliktedir. Benzer şekilde düşük enerji yoğunluklarında da geniş eş yüzeyler elde edilmiştir. Bu durum eriyik havuzun homojenliğini negatif yönde etkileyerek yetersiz füzyona neden olmaktadır. Sonuç olarak, lazer spotunun ön ve arka kısımlarındaki sıcaklık dağılım farklılıkları, lazerin ısı transfer profili ve malzemenin ısı yayılım mekanizmasıyla ile ilgilidir. Lazerin hızı, odak boyutu ve gücü ve ayrıca malzemenin termal iletkenliği ve ısı kapasitesi gibi özellikleri (AlSi10Mg için termal özellikler Şekil 5.3'te verilmiştir.) bu dağılımları etkilemektedir.



Şekil 5.9. 180 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı parametrelerine sahip toz yatağına ait ısıl dağılım ve eriyik havuz yapısına ait sonlu elemanlar analiz sonuçları

Eriyik havuzun genişliği ve derinliği lazer işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Şekil 5.10). Fiziksel olarak, yüksek enerji yoğunluğu malzemeyi daha hızlı ve daha geniş bir alanda eritecektir, bu da eriyik havuzunun hem genişliğinin hem de derinliğinin artmasına neden olmaktadır. İlerleme hızı arttıkça, lazerin belirli bir noktaya enerji iletim süresi azalır. Bu durum, malzemenin erimesi için daha az zaman olduğu anlamına gelir ve bu da eriyik havuzunun hem genişliğinin hem de derinliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, lazer gücünü artırmak genellikle daha büyük bir eriyik havuzuna yol açarken, ilerleme hızını artırmak genellikle daha küçük bir eriyik havuzuna neden olmaktadır. Bu parametreler arasındaki denge, istenen sonuçları elde etmek için SLM sürecinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirmektedir.

Şekil 5.10'da 200 µm çaplı dairesel tarama hattının üst noktasında oluşan farklı işlem parametrelerine bağlı eriyik havuz ölçüleri verilmiştir. Analizde farklı ilerleme hızlarına sahip iki farklı set (SET 1 için v= 0,6 mm/s, SET 2 için v= 0,4 mm/s) kullanılmıştır. Bu iki sette hacimsel enerji yoğunlukları sabit tutularak lazer güç yoğunluğuna bağlı etkilerin adil bir şekilde kıyaslanması sağlanmıştır. Bölüm 4'te elde edilen deneysel sonuçlara benzer şekilde artan lazer enerji yoğunluğu eriyik havuz sıcaklığı ve derinliğinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca lazer ilerleme hızına bağlı etkileşim süresinin de eriyik havuz boyutunun belirlenmesinde önemli rol oynadığı görülmüştür.



Şekil 5.10. 200 µm çaplı dairesel tarama hattının üst noktasında oluşan farklı işlem parametrelerine bağlı eriyik havuz ölçüleri

SLM sürecinde, hacimsel enerji yoğunluğunun artması genellikle eriyik havuzun genişliğinin ve derinliğinin artmasına yol açmaktadır. Bu durum yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazerin daha fazla toza etki ederek eritmesinin bir sonucudur. Şekil 5.10'da görüldüğü üzere artan hacimsel enerji yoğuyla birlikte eriyik havuz genişliğe lineer olarak artmasına rağmen eriyik havuz derinliği belirli bir enerji yoğunluğu değerinden (48 J/mm^3) sonra azalan artış oranıyla artmaktadır. Eriyik havuz genişliğinin hacimsel enerji yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artması malzeme yüzeyinin daha fazla enerjiye maruz kalmasının bir sonucudur. Eriyik havuz derinliğinin belirli bir enerji yoğunluğundan sonra azalan oranda artması lazer enerji nüfuziyetinin belirli bir derinlikten sonra azalması ile ilgilidir. Bu durum derinlik boyunca üstel azalan soğurma oranı ve ısıl dağılım ile ilişkilidir. Ayrıca yüksek

sıcaklıktaki eriyik havuz yüzeyi, ısıyı çevreye yayma eğilimindedir, bu da derin bölgelerde ısıl etkilerin azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 5.10'da görüldüğü üzere 40 W lazer gücü ve 0,4 mm/s lazer tarama hızı parametreleri kullanılarak elde edilen eriyik havuzu, en küçük genişliğe (30 µm) ve en küçük derinliğe (16 µm) sahiptir. Bu derinlik katman kalınlığı değerinin (25-30 µm) altındadır. Eriyik havuz derinliğinin düşük olması, bir sonraki katmanın yeterince erimemesine ve dolayısıyla katmanlar arasında zayıf bağ yapısına sebebiyet vermektedir. Bu durum, nihai ürünün mekanik özelliklerini negatif yönde etkilemektedir. Ayrıca daha sığ eriyik havuz derinliği, daha düşük kaliteli bir yüzeye neden olabilir. Bu, son ürünün estetik görünümünü ve bazı durumlarda işlevselliğini etkileyebilir.

En yüksek eriyik havuz boyutlarına ise (212 µm genişlik ve 88 µm derinlik) SET 1 parametreleri ile üretilen 95 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğuna sahip lazer işlem parametrelerinde ulaşılmıştır. Yüksek sıcaklıktaki (3070 K'e kadar) aşırı büyük eriyik havuzu ürün yüzeyinde düzensizliklere, boyutsal sapmalara ve pürüzlülüğe neden olabilir. Büyük eriyik havuzu ayrıca sonraki katmanların yeterince soğumasını engelleyerek hatalı katman yapılarına neden olmaktadır. Yine yüksek sıcaklıktaki eriyik havuzu bazı malzemelerin yapısını değiştirebilmekte (Resim 4.18'de magnezyumun buharlaşmasına sebebiyet verdiği gibi), bu da nihai ürünün mekanik ve kimyasal özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

Her iki parametre seti için en optimum eriyik havuz boyutlarına (genişlik 140-160 µm ve derinlik 70-75 µm) ise 71 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğuna sahip lazer işlem parametrelerinde ulaşılmıştır. Optimum eriyik havuz derinliği katmanlar arasında oluşan füzyon eksikliği veya anahtar deliği tipi porozitelerin minimize edilmesi için önemlidir. Bu derinlik ayrıca toz katmanı ile önceki katı katmanın homojen bir şekilde kaynaşarak gelişmiş mikroyapısal özelliklerin elde edilmesine katkıda bulunmaktadır. Böylece son ürünün genel mekanik özelliklerini iyileştirilebilir. Eriyik havuz genişliği ise özellikle boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi için önemlidir. Kontrollü bir eriyik havuzu yüzeyi, düzgün ve tutarlı bir yüzey kalitesi sağlamaktadır. Aksine, kontrolsüz bir eriyik havuzu yüzeyi, pürüzler, çatlaklar, çukurlar veya diğer yüzey kusurlarına neden olabilir.

Şekil 5.10'da farklı lazer tarama hızlarına (SET 1 için 0,6 m/s, SET 2 için 0,4 m/s) ve sabit güç yoğunluğuna (P=120 W) sahip eriyik havuzları kıyaslandığında ise SET 2 parametreleri ile (71 J/mm^3 enerji yoğunluğu) elde edilen eriyik havuz genişliğinin %15-%20 daha geniş, derinliğin ise neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Bu durum lazer tarama hızının bir sonucudur. Lazer tarama hızı azaldıkça, lazerin belirli bir noktada daha uzun süre kalması ve dolayısıyla daha fazla enerji sağlaması sonucunda eriyik havuzunun genişliği artmaktadır. Bu, SET 2 parametreleri (tarama hızı 0,4 m/s) ile elde edilen eriyik havuzunun SET 1'e (tarama hızı 0,6 m/s) göre (%15-%20) daha geniş olmasının nedenidir. Öte yandan, eriyik havuz derinliği, lazer gücü yoğunluğuna daha çok bağlıdır. Sabit bir güç yoğunluğu (7800 W/cm^3) kullanıldığında, lazerin malzemenin içine nüfuz etme yeteneği sabit kalmaktadır. Bu nedenle eriyik havuzun derinliği, tarama hızının azalmasına rağmen, neredeyse aynıdır.

Benzer enerji yoğunluklarına sahip olmalarına karşın daha yüksek lazer güç yoğunluğuna sahip parametre seti (SET 1) kullanılarak elde edilen eriyik havuzlarının derinlik ve genişliklerinin daha büyük olduğu görülmüştür. SLM sürecinde lazer güç yoğunluğu malzemeye aktarılan enerjinin miktarını belirlemektedir. Yüksek güç yoğunlukları, daha hızlı ısı yayılımını sağlayarak daha geniş bir alanın eritilmesine yardımcı olmaktadır. Yüksek lazer güç yoğunluğu ayrıca malzemenin termal genleşmesini teşvik etmektedir. Bu, malzemenin ısındıkça genişlemesi anlamına gelir ve bu da eriyik havuzun genişlemesine neden olur. Böylece daha büyük bir eriyik havuzu elde edilmektedir. Enerji yoğunluğu, lazer gücünün tarama hızına oranıdır. Lazer tarama hızının azalması, lazerin belirli bir noktada daha uzun süre kalmasına ve dolayısıyla daha fazla enerji sağlamasına neden olmaktadır. Ancak, eğer lazer güç yoğunluğu yetersizse, ısı enerjisi, toz yatağı boyunca yeterince derine nüfuz etmek yerine, malzemenin yüzeyinden yayılarak sığ ve geniş eriyik havuzuna neden olmaktadır. Bu durumda, yetersiz güç yoğunluğu ayrıca termal kayıpların etkisinin artmasına da neden olabilir. Eriyik havuz yüzeyindeki bu termal kayıplar eriyik havuzun sıcaklığını düşürerek, daha hızlı soğumaya neden olabilir.

5.5. Sonuç

Seçici Lazer Eritme (SLM) sürecinin sayısal simülasyonu üzerine odaklanan bu tez bölümü, enerji ve kütle denklemlerinin çözümü ve süreç parametrelerinin dikkate alınmasıyla SLM sürecinin anlaşılması ve optimize edilmesine yönelik çalışmaları ele almaktadır. AlSi10Mg alaşımının termofiziksel özellikleri, sayısal analizde faz değişimi süreçlerinin temelini

oluştururken, süreç parametreleri ve malzeme özellikleri dikkatlice incelenerek SLM sürecinin başarısı ve üretilen parçaların kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu tez bölümü, SLM sürecinin sayısal simülasyonlarının önemini vurgulayarak, sürecin verimliliğini artırmak ve yüksek kaliteli parçalar üretmek için uygun parametre kombinasyonlarının belirlenmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

SLM sürecinin sayısal analizi ile optimum işlem parametreleri deneysel yöntemlere kıyasla hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu nedenle, sayısal analizler, SLM ile üretim sürecinin kontrolü ve optimizasyonunu büyük ölçüde kolaylaştırır ve geliştirir. Sonlu elemanlar tabanlı çoklu fizik bir çözücü kullanılarak, lazer işlem parametrelerinin eriyik havuz boyutu ve şekli üzerindeki etkisi saptanabilir. Bu tür bir analiz ayrıca, SLM sürecinde meydana gelen termofiziksel etkilerin daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını da sağlamaktadır. Böylece daha hızlı ve daha verimli üretim, yüksek malzeme verimliliği ve yüksek kaliteli ürünler sağlanmış olur.

Araştırmanın bulguları, SLM işlem parametrelerinin (özellikle hacimsel enerji yoğunluğu ve lazer güç yoğunluğu) termal dağılım üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Optimum eriyik havuz boyutlarının (140-160 μm genişlik ve 70-75 μm derinlik) elde edilmesi için gereken özel hacimsel enerji yoğunluğu her iki set içinde 71 J/mm^3 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, sıcaklık gradyanının derinlikteki değişimi, lazer gücü ve tarama hızı gibi işlem parametrelerine de bağlıdır. Lazer gücü arttıkça, yüzeyde daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmekte ve sıcaklık gradyanı daha belirgin hale gelmektedir. Tarama hızı arttıkça ise, lazer malzeme etkileşim süresi kısalarak düşük sıcaklık gradyanlarına neden olmaktadır.

Sonuç olarak SLM sürecinin sayısal analizi, parçaların iç yapısı, yüzey morfolojisi ve mekanik özelliklerinin daha iyi kontrol edilmesine olanak tanıyarak yüksek kaliteli ve gelişmiş performanslı parçaların üretimini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla, bu analiz ve gözlemler sayesinde, SLM sürecinin daha da geliştirilmesi ve geniş çapta uygulanmasına imkân sağlanmaktadır. İleride yapılacak çalışmalar, sıcaklık dağılımının daha derinlemesine incelenmesi ve SLM sürecinin daha geniş bir malzeme yelpazesine uyarlanması için yeni yöntemler ve teknolojilerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

6. OPTİMUM SLM TASARIM VE İMALAT PARAMETRELERİYLE YAPAY ZEKA TABANLI KAFES YAPI TASARIMI VE MEKANİK PERFROMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tekrarlayan hafif hücresel formların birleştirilmesiyle elde edilen kafes yapıları, yekpare katı cisimlere kıyasla daha etkili yük dağılımı sağlamaktadır. Fakat özelleştirilmiş mekanik özelliklere sahip alüminyum alaşımlı kafes yapılar oluşturma süreci, sonsuz olası tasarım konfigürasyonu ve bu tasarımların mekanik performansla olan karmaşık ilişkisi nedeniyle oldukça zorlu bir süreçtir.

Bu bölüm, bahsedilen mühendislik zorluğunun üstesinden gelmek için derin öğrenme temelli 3B üretken çekişmeli ağ (İng. 3D Generative Adversarial Networks, 3DGAN) yapay zeka modelini kullanan yeni bir tasarım optimizasyonu yaklaşımı sunmaktadır. Gelişmiş mekanik özelliklere sahip kafes yapıların GAN algoritmasıyla elde edilebilmesi için parametrik tasarım aşamasında yapısal analiz yoluyla belirlenen yüksek performanslı kafes yapıları veri seti olarak kullanılmıştır. Farklı tasarım yaklaşımları kullanılarak elde edilen kafes yapılar, karmaşık metal geometrilerin üretimine izin veren Seçici Lazer Sinterleme (SLM) eklemeli imalat makinesi kullanılarak üretilmiştir. Arttırılmış çubuk elaman yoğunluğuna sahip kafes yapılarının gelişmiş yüzey kalitesi ve yüksek boyutsal doğrulukla üretilebilmesi için Bölüm 4'te elde edilen optimum işlem parametreleri kullanılmıştır. Üretilen AlSi10Mg kafes yapıların mekanik performansı, basma ve Charpy darbe testleri ile belirlenmiştir. Hücresel yapıların elastik modülü hem Gibson-Ashby hem de Hooke denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, GAN derin öğrenme modeli kullanılarak üretilen sentetik kafes yapıların (İng. Synthetic Structure, SS) gelişmiş mekanik performansa (standart kafes yapılarına nazaran gerilme ve gerinim değerlerinde sırasıyla %110 ve %27'ye kadar artış) sahip olduğunu göstermiştir. Çalışma, farklı kafes yapı tasarım yaklaşımları ile SLM işlem parametrelerinin etkin bir biçimde optimizasyonu ile gelişmiş uygulamalara yönelik hedeflenen mekanik özelliklere sahip parçaların üretilebilirliğini ortaya koymuştur.

6.1. Giriş

Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi, ürün ve bileşen tasarım yaklaşımlarında çığır açıcı yenilikler sunmaktadır. Eİ, daha önce üretilmesi zor veya imkansız olan karmaşık geometri ve formlara sahip parçaların hızlı ve uygun maliyetli bir şekilde üretilebilmesine olanak

sağlamaktadır [142]. Böylece Eİ, üstün işlevselliğe sahip ürünlerin tercih edildiği otomotiv, havacılık, motor sporları, enerji ve medikal gibi sektörlerde sıklıkla tercih edilen bir imalat yöntemi olmaya başlamıştır [143]. Eİ teknolojisinin bu benzersiz yeteneğini kullanarak, yüksek mekanik enerji emme ve gelişmiş dayanım-ağırlık oranına sahip periyodik kafes yapılar teknik ve ekonomik olarak üretilebilir hale gelmiştir [245]. Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi, kafes yapıların üretim zorluklarını büyük ölçüde ele almış olsa da, bu karmaşık yapılar ve bunların mekanik özellikleri arasındaki karmaşık korelasyon göz önüne alındığında, geleneksel tasarım metodolojileri gerekli tasarım konfigürasyonlarını oluşturmak için yetersiz kalmaktadır [51]. Üretken tasarım yöntemlerinin büyük potansiyeli, benzersiz ve arzu edilen mekanik özelliklere sahip kafes hücreleri üretmek için yeni bir yol sunmaktadır. Ayrıca yapay zeka teknolojilerinin yükselen gücünü, özellikle Makine Öğrenimi (İng. Machine Learning, ML) ve Derin Öğrenme (İng. Deep Learning, DL) yöntemlerini entegre etmek, özelleştirilmiş mekanik özelliklere sahip benzersiz kafes yapıları oluşturmanın olası yollarından biridir. DL teknolojisini DfAM'ye dahil etmek, üretim sürecinin doğruluğunu, hassasiyetini, otomasyonunu ve özelleştirmesini iyileştirmeye yardımcı olabilir. Ayrıca bu kombinasyon, kafesler ve diğer azaltılmış ağırlıklı işlevsel yapılar için yeni performans geliştirme ve özelleştirme fırsatları sunmaktadır [246,247]. Bununla birlikte, Eİ tekniği destek yapısı gerekliliği, sınırlı minimum unsur kalınlığı, işlem parametrelerine ve baskı oryantasyonuna bağlı değişen yüzey kalitesi ve mekanik özellikler gibi hücresel yapı tasarımını önemli ölçüde etkileyen bazı kısıtlamalara sahiptir [248]. Optimum hücresel yapı tasarımı, gerekli işlevselliği destekleyen tüm bileşenleri içermelidir. Bu, farklı boyut, şekil ve yönelimdeki çubuk eleman ve düğüm gibi birim hücre bileşenlerinin bir araya getirilmesiyle mümkündür. Literatürde bu tür yapıları verimli bir şekilde imal etmek için çeşitli tasarım ve imalat stratejileri önerilmiştir [249,250].

Li vd., AlSi10Mg alaşım kafes yapılarının SLM imalatını araştırmıştır. Çalışma, kafes yapıların kırılma mekanizmasının belirlenmesinde çubuk eleman çaplarının önemini vurgulamaktadır. Optimize edilmiş bir çubuk eleman yarıçapının gerilme yığılmalarını azalttığı ve kafeslerin mekanik davranışını iyileştirdiği belirlenmiştir. Bir 3B sonlu eleman modeli, makroskobik deformasyonları ve mikroskobik gerilme-gerinim gelişimini değerlendirerek, çoğu çubuk elemanın elastik bölgede kaldığı, fakat düğüm noktalarına yakın bölgelerde yerel plastik gerilmelerin ortaya çıktığını göstermiştir [251]. Dong vd., çubuk eleman boyutunun, SLM ile üretilen AlSi10Mg kafes yapılarının mikroyapı, geometrik sapma ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırma, unsur

çapındaki bir azalmanın, kararlı duruma kıyasla çubuk eleman mukavemetinde ve elastik modülünde %30'luk bir azalmaya yol açtığını ortaya koymaktadır [158]. Wang vd., üniform veya dereceli yoğunluk dağılımında sunulan, eklemeli olarak üretilmiş polimerik BCC ve BCCz kafeslerinin enerji emme kapasitesini araştırmıştır. Bulgular, BCCz konfigürasyonunun BCC kafesinin enerji emilimini yaklaşık iki katına çıkardığını göstermiştir [252]. Kafes yapı konfigürasyonlarının yanı sıra yapı yönelimleri de mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir.

Diğer bir çalışmada Dong vd., yapı oryantasyonunun SLM ile üretilen AlSi10Mg numunelerinin mikroyapısı, geometrik doğruluğu ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma, üst bölgenin soğuma hızının alt bölgeye göre daha hızlı olduğunu ve eğimli dikmelerin alt bölgesinin tane boyutunun ve gözenekliliğinin üst bölgeninkinden daha büyük olduğunu göstermiştir. Bu mikroyapısal farklılık SLM ile üretilmiş yapıların mekanik özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca, eğimli çubuk elemanların, dikey çubuk elemanlara kıyasla tasarlanan ve inşa edilen boyutları arasında daha az sapmaya sahip olduğu fakat daha yüksek yüzey pürüzlülüğü sergilediği bulunmuştur [177].

Birkaç çalışma, kafes yapılarındaki basma kırılma mekanizmalarını incelemektedir. Yu vd., değişen birim hücre yapılarına, birim hücre sayılarına ve çubuk eleman çaplarına sahip SLM ile üretilmiş AlSi10Mg mikro kafesleri incelemiştir. Çalışmada bu AlSi10Mg mikro yapılarının özgül enerjisi, basma dayanımı ve kırılma mekanizmaları değerlendirilmiştir [253]. Pirinu vd., SLM ile üretilmiş AlSi10Mg alaşım yapılarda birim hücre topolojisi, birim hücre boyutu ve çubuk eleman çapının, deformasyon ve kırılma davranışı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca yerel morfolojiyi analiz etmek ve mekanik davranışı etkileyebilecek malzeme dağılımını ve kusur varlığını karakterize etmek için mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) incelemesi kullanmışlardır [254]. Yan vd., düşük hacimli yapılar için elmas birim hücresi kullanılarak Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) ile üretilen AlSi10Mg kafes yapılarının üretimi ve performansı üzerine bir araştırma yürüttüler. Özellikle, DMLS tarafından üretilen yapılar, biraz daha büyük çubuk eleman boyutlarına rağmen, orijinal tasarımlarıyla yakından eşleşti. Yapıların basma özellikleri ile hacim oranları ve birim boyutları arasında açık bir ilişki gözlemlenmiştir [255].

Yarı izotropik sertlik ve mukavemet, tutarlı kırma davranışı ve üstün enerji emme özellikleri sergileyen bir kafes yapısı, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu kapsamda

Maconachie vd., beş farklı topolojiye sahip SLM AlSi10Mg kafes yapıları SLM yöntemiyle üreterek yarı statik ve dinamik yükleme testlerine tabi tutmuştur. Kırılma mekanizmaları, esas olarak, eşit olmayan gerilme dağılımı nedeniyle topolojiye bağlı olarak çapraz kayma düzlemlerinin oluşumuna atfedilmiştir [256]. Mantovani vd., göreceli yoğunluğun rijitlik, dayanım ve enerji emilimi üzerindeki rolüne odaklanarak SLM yoluyla üretilen AlSi7Mg BCCxyz kafes yapılarını değerlendirmiştir. Çalışma, optimum üretilebilirlik ve daha düşük yoğunlukta benzer mekanik özelliklere sahip birim hücrelerin seçilmesinde potansiyel iyileştirmeler önermektedir [257].

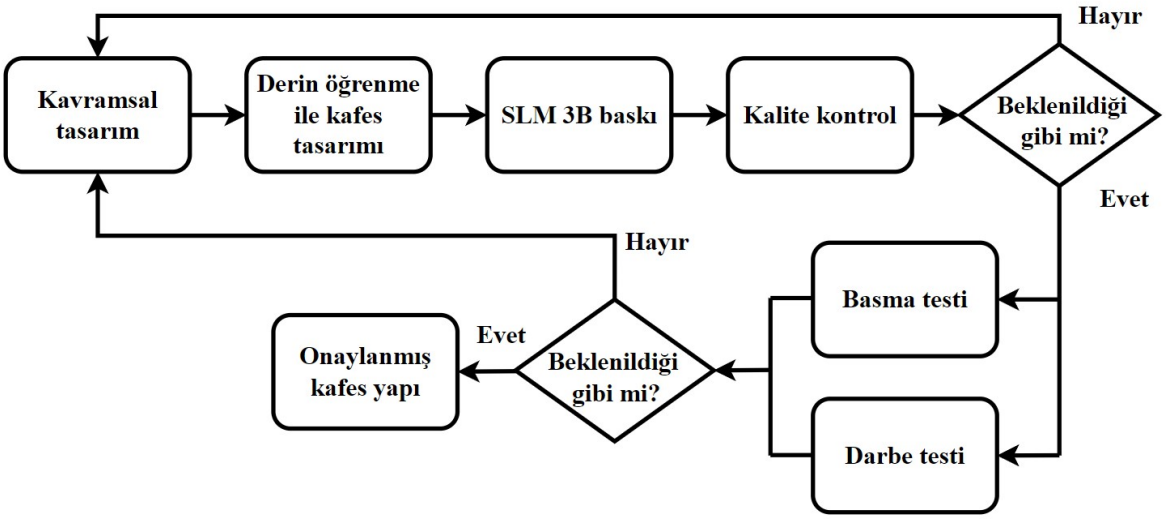
SLM tekniği ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri, sadece üretim özelliklerinden değil, aynı zamanda tasarım özelliklerinden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Kafes yapı tasarımında parametrik tasarım, topoloji optimizasyonu, üretken tasarım ve biyomimetik yaklaşım gibi farklı tasarım metodolojileri uygulama ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı avantajlar sunmaktadır [258]. Derin Öğrenme (DL) tekniklerini kullanmak, kafes yapıları oluşturmak için başka bir etkili yöntemdir [259]. Eklemeli olarak üretilen mikro yapıların mekanik özelliklerini tahmin etme ve iyileştirmede DL algoritmalarının etkinliği, Hassani vd., tarafından gösterilmiştir [260]. Aynı şekilde, Yu vd., eğilme ve gerinme baskın olduğu çeşitli kafes yapıların mekanik davranışını özelleştirmek için Derin Sinir Ağı (DNN) yaklaşımını kullanmıştır. DNN, farklı mikro yapılar için mekanik tepkileri etkili bir şekilde tahmin ederek Sonlu Elemanlar Analizine (SEA) alternatif bir yöntem sunmaktadır [261]. Ayrıca Siegkas, gözenekli yapıların özelliklerini ayırt etmek ve bunları yeni tasarımlara dahil etmek için bir tür derin öğrenme modeli olan Üretken Çekişmeli Ağlar (GAN) modelini kullanmıştır. Sonuçlar, gözenekli yapının orijinal özelliklerinin üretilen sentetik yapılara başarıyla dahil edilebileceğini göstermiştir [246]. Benzer şekilde, Challapalli vd., kafes tasarım alanını keşfetmek için GAN'ı gelişmiş regresyon yöntemleriyle entegre ederek tersine bir tasarım çerçevesi önermiştir. Yeni birim hücreler tek eksenli basma testinde oktet kafes yapısından daha iyi performans sergilemiştir [262]. Wang vd., değişken yoğunluklu hücresel yapıları optimize etmek için Ters Homojenleştirilmiş Üretken Çekişmeli Ağlar (IH-GAN) adı verilen koşullu bir derin üretken model önermiştir. Çalışmada, birim hücre geometrileri ve özellikleri arasındaki çok ölçekli tasarım optimizasyon problemini doğru bir şekilde ele alınarak verilen malzeme özelliklerini %98'in üzerinde doğrulukla karşılayan çeşitli birim hücreler üretilmiştir.

En yeni yapay zeka, eklemeli imalat ve bilgisayar destekli tasarım teknolojilerinin yeteneklerinden yararlanmaya yönelik ilk girişimlere rağmen, fonksiyonel derecelendirilmiş mekanik özelliklere sahip metalik kafes yapılarının oluşturulması, kapsamlı araştırma gerektiren bir mühendislik sorunu olmaya devam etmektedir [259,263]. Bu tez bölümü parametrik tasarım yöntemiyle birleştirilmiş derin öğrenme temelli 3B Üretken Çekişmeli Ağ (İng. 3D Generative Adversarial Networks, 3dGAN) yapay zeka modelinin gücünden yararlanarak, yüksek performans/ağırlık oranına sahip AlSi10Mg kafes yapılarının tasarlanması ve SLM yöntemiyle üretilmesi için yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Çalışmada ilk olarak, parametrik yöntemler kullanılarak çeşitli kafes hücrelerini içeren benzersiz 3B kafes veri seti oluşturulmuştur. Burada parametrik tasarım aşamasında yapılan yapısal analiz ile sadece yüksek mekanik performansa sahip kafes hücreler veri setine dahil edilmiştir. Bu veri kümesi, bir 3B Üretken Çekişmeli Ağ (3B-GAN) modelinin eğitimi için zengin veri kaynağı sağlamaktadır. Derin öğrenme modeli ile benzersiz geometrilere sahip 3B kafes hücrelerini başarıyla oluşturulmuştur. AlSi10Mg test numuneleri, karmaşık tasarım özellikleriyle yüksek uyumluluk sağlayan gelişmiş bir metal katkılı üretim yöntemi olan Seçici Lazer Eritme (SLM) kullanılarak üretilmiştir. Eklemeli imalat için tasarım ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak elde edilen kafes yapıların etkinliğini doğrulamak için, tasarlanan benzersiz kafes birim hücrelerinin mekanik özellikleri, standart kafes birim hücreleriyle karşılaştırılmıştır. 3D-GAN tarafından üretilen kafes geometrilerinin üstün yapısal performans sergilediğini görülmüştür. Sonuçlar Bölüm 4’te elde edilen optimum SLM parametreleri kullanılarak yüksek boyutsal doğruluğa sahip gelişmiş metalurjik özelliklere sahip kafes yapıların üretilebileceğini göstermiştir.

6.2. Metodoloji

Hücresel yapıyı tasarlama ve geliştirme süreci Şekil 6.1'de gösterilmektedir ve her adımın ayrıntıları sonraki bölümlerde açıklanmaktadır.



Şekil 6.1. Kafes yapı tasarımı ve geliştirme süreci akış şeması

6.2.1. Parametrik tasarım

Tasarım sürecinin verimliliğini artıran parametrik tasarım, tasarım öğeleri arasındaki ilişkileri tanımlamak için algoritmik bir yapı sunmaktadır. Bu yöntem, tasarım bileşenlerinin bilgisayar teknolojisi yardımıyla matematiksel formüllere dönüştürülmesini ve daha sonra karmaşık geometriler ve formlar oluşturmak için bir algoritmaya entegre edilmesini içermektedir. Bu özel algoritmik yapılar aynı zamanda tasarım öğeleri arasındaki anlamsal ilişkileri tanımlamak ve tasarım alternatifleri üretmek için görsel programlama tekniklerini de kullanabilmektedir [264,265]. Son yıllarda mimari, inşaat ve mekanik tasarım gibi birçok endüstride, özellikle yapısal performans ve ağırlık azaltma gerektiren mühendislik görevlerinde yaygın olarak uygulanmaktadırlar.

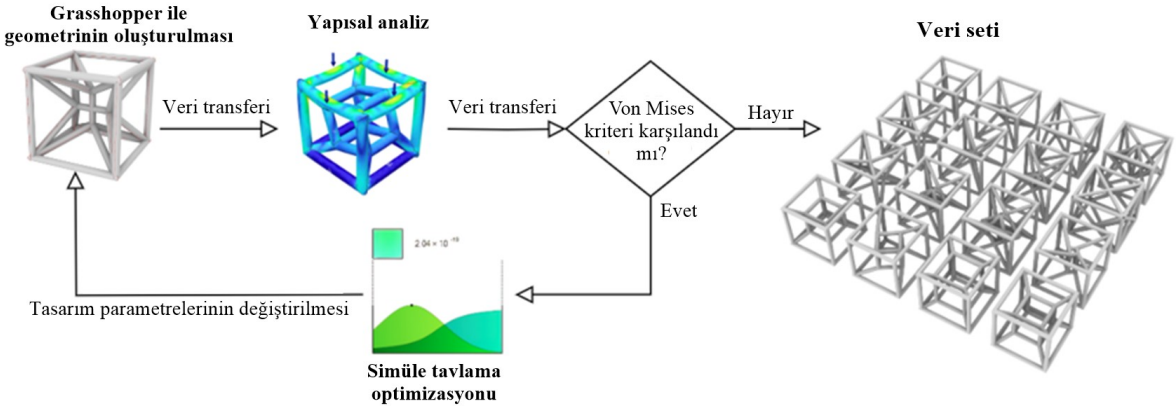
Bu mühendislik görevlerinden biri, çok sayıda ve çeşitli tasarım değişkenleri oluşturma becerisine sahip derin öğrenme modeli eğitimi için sentetik 3B verilerin oluşturulmasıdır. Eğitim veri kalitesi ve çeşitliliği, derin öğrenme modellerinin başarısını etkileyen en kritik faktörlerden biridir. Özellikle üretken derin öğrenme modellerinde, yetersiz ve düşük kaliteli eğitim verileri nedeniyle yaratıcılık eksikliği ve zayıf model performansı gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir [266]. Bu tez bölümünde, veri eksikliği problemini çözmek için bir parametrik tasarım süreci kullanılmıştır. Sürecin ilk aşamasında, modeli oluşturan tüm elemanlar (çubuk eleman, düğüm vb.) bir BDT yazılımında iyi bilinen (oktet, diyagonal vb.) kafes geometrileri referans alınarak parametrik olarak modellenmiştir. Ardından, çubuk eleman etkileşimini kontrol eden parametrik kısıtlama koşulları tanımlanmıştır. Burada

kafes hücreleri arasındaki tamamlayıcı ve tekrarlayan periyodik ilişkinin bozulmaması gereklidir. Son adımda ise tanımlanan parametrelerde değişiklikler yapılarak alternatif tasarım seçenekleri üretilmiştir.

Kafes tasarımlarının sürekliliğini ve belirtilen tasarım kısıtlamalarına uygunluğu sağlayan sentetik 3B kafes veri kümelerini elde etmek için alana özgü bazı parametrik tasarım kriterleri de göz önüne alınmalıdır. Özellikle 3B kafes boyutu, şekli ve yoğunluğu gibi temel özellikler ve bu özelliklerin hangi parametrelerle kontrol edileceği belirlenmelidir. Daha sonra bilgisayar destekli tasarım yazılımı ve görsel programlama aracı ile belirlenen parametreler bir algoritma yapısına dahil edilmiştir. Bir sonraki adımda, yeni bir 3B ağ oluşturulmuş ve farklı parametrelerin bir kombinasyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Burada, her döngüde farklı parametre kombinasyonları kullanılarak yeni bir 3B kafes geometrisi elde edilmiştir. Daha sonra bu kafes hücreleri sonlu elemanlar analizi eklentisi ile değerlendirilmiş ve sadece yüksek dayanım performansına sahip modeller veri setine eklenmiştir. Son olarak, tüm 3B ağ modelleri, derin öğrenme eğitimi için yaygın olarak kullanılan, düzenleme ve işlemeye uygun evrensel bir dosya biçiminde kaydedilmiştir. Oluşturulan veriler normalize edilerek 3DGAN model eğitimi için hazır hale getirilmiştir.

Grasshopper üzerinde çalışan Galapagos eklentisi, ağırlığa göre en yüksek mukavemet değerine sahip 3B kafes geometrilerini belirlemek için kullanılmıştır. Galapagos, adını malzeme bilimindeki tavlama işleminden alan simüle edilmiş tavlama algoritması (İng. Simulated Annealing Algorithm, SA) kullanan bir optimizasyon aracıdır [267,268]. Simüle edilmiş sezgisel tavlama algoritması, rastgele bir parametre seti ile problem alanında çözümü global optimuma yaklaştırmayı ve her iterasyonda parametre değişiklikleri ile ideal çözümü bulmayı amaçlamaktadır. Yeni çözümün mevcut çözüme göre performansı Kiwi3D eklentisi ile değerlendirilmiştir. Yeni oluşturulan çözümün yapısal performansı mevcut çözümden daha iyi ise yeni çözüm mevcut çözüm olarak kabul edilir. Aksi takdirde, daha iyi bir çözüm arayışı yeni bir parametre seti kullanılarak devam eder. Bu algoritma, geniş ve karmaşık bir çözüm uzayında yerel optimumdan kaçınarak global optimumu bulma ihtimalini arttırır [267]. Bu çalışmada benzetilmiş tavlama algoritmasının parametrik tasarım sürecine entegre edilmesi, yapısal performansı yüksek 3B kafes geometrilerinin belirlenerek veri setine dahil edilmesini sağlamıştır. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi parametrik modelleme ile oluşturulan kafes geometrileri detaylı bir yapısal analize tabi tutulmuştur. Von Mises gerilme

değerlerinin hesaplanması sonucunda tüm çözümler ağırlığa bağlı göreceli dayanım değerlerine göre sıralanmış ve performansı nispeten yüksek olanlar veri setine eklenmiştir.



Şekil 6.2. Parametrik tasarım süreci

Süreç sonunda 8 adet standart kafes yapısı temel alınarak parametrik tasarım mimarileri ile toplam 4322 adet farklı birim hücre seçeneği oluşturulmuştur. Bu 3B kafes modelleri normalizasyon işlemlerine tabi tutulduktan sonra 128x128x128 boyutlarında toplam 4002 adet veri elde edilmiştir. Son aşamada ise derin öğrenme eğitimi için veriler voksel formatına dönüştürülerek süreç tamamlanmıştır.

6.2.2. Üretken çekişmeli ağlar ile 3B kafes yapı tasarımı

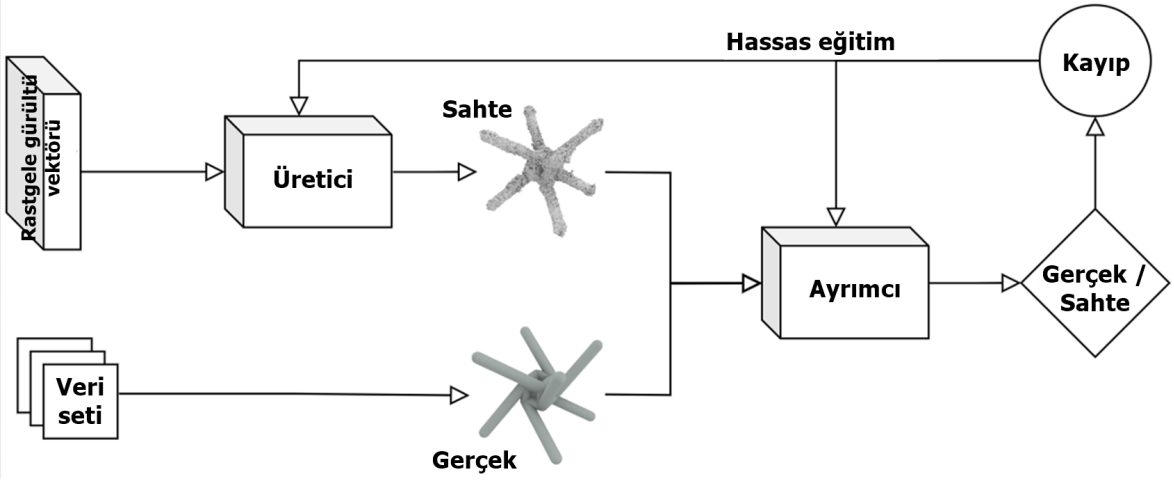
Derin öğrenme (DL), makine öğrenmesinin çok katmanlı sinir ağlarından oluşan bir alt dalıdır ve genellikle görüntü işleme, doğal dil işleme ve ses tanıma görevlerinde kullanılmaktadır [269,270]. Bu modellerden üretken çekişmeli ağlar (GAN), yüksek kaliteli ve gerçekçi veriler üretebilme özellikleri ile son zamanlarda oldukça popüler bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmiştir [271]. Klasik bir GAN mimarisi, sürekli olarak birbiriyle rekabet eden bir üretici (G) ve bir ayrımcı (D) ağdan oluşmaktadır. Üretici, gerçek verilere benzer sahte veriler oluşturmayı hedeflerken, ayrımcı, sahte verileri gerçek verilerden ayırmakla görevlidir. Bu eş zamanlı eğitimde, üreticinin gerçek verilere daha yakın sentetik veriler üretmesini amaçlanırken ayrımcının ise ayırt etme yeteneğinin geliştirilmesi hedeflenmektedir [272].

GAN, denetimsiz bir öğrenme modeli kullanarak görüntü, ses ve video üretme gibi görevlerde verimli bir modeldir. Ayrıca bu modeller, topoloji optimizasyonu, kavramsal tasarım, bilgisayar destekli mühendislik ve simülasyon gibi mühendislik tasarım

görevlerinde kullanılmaya uygun bir teknolojidir [263]. Bu yeteneklerle GAN modelleri, mühendislik ve endüstriyel tasarım başta olmak üzere çeşitli disiplinlerde veri iyileştirme ve yeni veri oluşturma görevlerinde etkileyici sonuçlar elde etmiştir [272]. Buna rağmen, geleneksel GAN modellerinin, veri karmaşıklığı ve boyutu nedeniyle tasarım uygulamalarında sıklıkla kullanılan 3B modeller oluşturma becerileri sınırlıdır. Bu nedenle DCGAN mimarisine dayalı doğrudan 3 boyutlu veri üretebilen 3DGAN mimarileri geliştirilmiştir [272,273].

3B geometrileri temsil etmek için üç temel format vardır: Nokta Bulutları, Ağ Yapılar (Mesh) ve Vokseller [274]. Nokta bulutu, noktaların belirli bir hacimde bir araya gelmesiyle oluşan veri yapısıdır. 3B tarama ve Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini (İng. Laser Imaging Detection and Ranging, LIDAR) teknolojileri ile elde edilen bu nokta bulutları gerçek nesneleri yüksek hassasiyetle temsil etme yeteneğine sahiptir [275]. Ancak geometrik yapıları doğrudan temsil edememesi uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. 3B modelleme alanlarında sıklıkla kullanılan ağ yapılarda ise yapının yüzey alanları genellikle üçgenlerden oluşan çokgenlerle temsil edilmektedir. Ancak kafes geometriler gibi içi boş ve karmaşık yapılar oluşturma yetenekleri zayıftır. Son olarak, voksel veri yapısı, bir nesneyi birim küpler kümesi olarak temsil etmektedir [274]. Vokseller, ağ yapısı ve nokta bulutu ile tasviri zor olan boşluklu ve karmaşık iç yapıları temsil etme yeteneğine sahiptir. Yüzey çözünürlüğü voksel sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kafes geometrileri, içi boş yapıları ve yüksek çözünürlük gerektirmeyen çubuk eleman ve düğüm gibi standart öğeler nedeniyle voksellerle tanımlanmıştır. Buna göre seçilen 3DGAN mimarisi voksel tabanlı verilerle çalışmaya uygun olmalıdır.

Bu çalışmada, Wu vd., tarafından geliştirilen gerçekçi 3B nesneleri sentezleyebilen denetimsiz voksel tabanlı bir üretken model kullanılmıştır. Temel 3DGAN yapısı Şekil 6.3'te verilmiştir. Bu model, düşük boyutlu bir olasılık dağılımından denetimsiz olarak gerçekçi 3B nesneleri sentezleyebilme kabiliyetine sahiptir [273]. 3DGAN modelinde süreç, gürültü vektöründen rastgele seçilen bir dizi sayıdan oluşan girdi ile başlamaktadır. Bu gürültü vektörü, gerçek veri boyutlarına ulaşabilmesi için üretici ağına girdi olarak sunulmuştur. Üreteç ağının her katmanı, girdi verilerini daha karmaşık bir yapıya dönüştürmek için bir dizi öğrenilebilir parametre içermektedir [276,277].



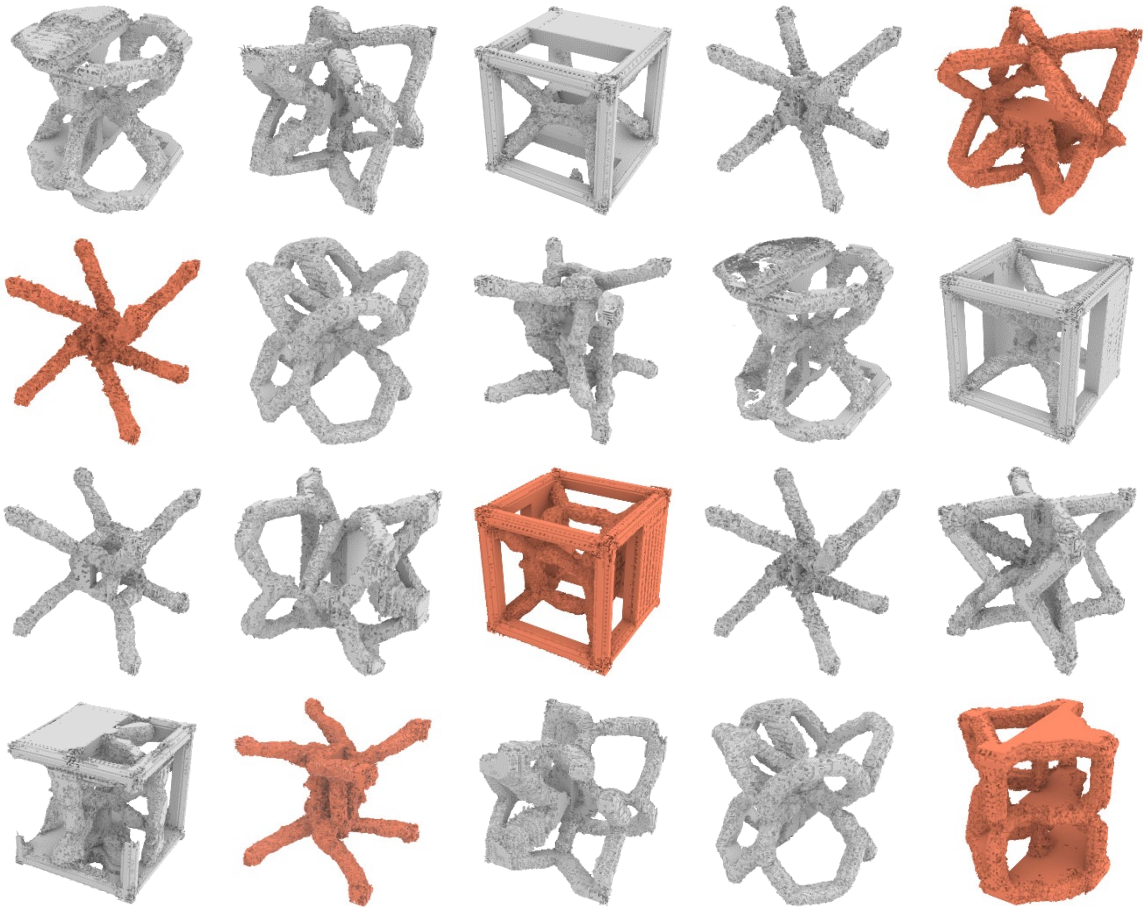
Şekil 6.3. Temel 3DGAN yapısı

Ayırımcı ise alınan gerçek bir model (veri kümesinden) veya sahte bir model (üretici tarafından oluşturulmuş) girdisinin gerçek mi yoksa sahte mi olduğunu test etmektedir (Şekil 6.3). Bu, 3B modelin boyutunu küçülterek ve ardından farklı boyutlarda özellik haritaları oluşturan 4 evrişim katman kullanılarak yapılmaktadır. Her katman, 3B model hacmini önceki katmandan daha küçük bir hacme dönüştürür. Bu 3B evrişim katmanları sonunda birim küp boyutuna (1x1x1) ulaşmaktadır. Ayrımcı ağ, giriş modelinin doğru olma olasılığını temsil eden Sigmoid aktivasyon fonksiyonunu kullanarak [0,1] aralığında bir değerle sona erer. Bu 3DGAN mimarisi, üretici ve ayırıcı ağ performansını aynı anda iyileştirmek için Eş. 6.1'de verilen geleneksel kayıp işlevi kullanılarak eğitilmiştir [278]. Bu fonksiyonda min, Üretken (G) kaybını en aza indirme sürecini temsil ederken, max, Ayırıcı (D) kaybını en üst düzeye çıkarma sürecini temsil etmektedir. Burada x gerçek modeller ve z gürültü girdisidir.

$$\min \max(D, G) = E_x\left[\log\left(D(x)\right)\right] + E_z\left[\log\left(1 - D\left(G(z)\right)\right)\right] \tag{6.1}$$

Bu çalışmada 3DGAN mimarisinin tanımlanması ve model eğitimi sürecinde bu amaç için özelleşmiş PyTorch kütüphanesinden yararlanılmıştır. İlk olarak, üretici rastgele bir gürültü vektörünü [1, 1, 1] 3B modele dönüştürmüştür. Burada, dört evrişim devrik katmanında farklı boyutlarda özellik haritaları oluşturularak giriş vektörünün boyutları artırılmaktadır. Oluşturulan her katmanın çıktısı, bir önceki katmandan daha büyük bir hacim elde edilmesini sağlamaktadır. Üreticinin son katmanında hedef küp boyutuna (128x128x128) ulaşılmıştır.

Her iki modelde de evrişimli (transpozisyon ve normal) katmanlar arasında Batch Normalization ve ReLU (Üretici) veya LeakyReLU (Ayırımcı) aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Ayrıca evrişim ve ters evrişim katman sayısı, parametre sayısı, havuz boyutu, gizli vektör boyutu, periyot sayısı, öğrenme oranı gibi parametreler deneme yanılma yoluyla sezgisel olarak belirlenmiştir. Bu parametreleri belirlemedeki ana kısıtlama, grafik işlemci kapasitesidir. Parametrik tasarım süreci sonunda elde edilen 4002 adet sentetik 3B modelin (voksel formatında) eğitilmesinde RTX 3090 GPU ekran kartı kullanılmıştır. Eğitim sürecinde 250 döngü kullanılmış ve bu süreç yaklaşık 45 saat sürmüştür. Eğitim sonunda GAN tarafından üretilen voksel formatlı veriler BDT yazılımı ile görselleştirme ve düzenleme için STL formatına dönüştürülmüştür. Şekil 6.4, elde edilen benzersiz 3B kafes modellerinden bazılarını göstermektedir. 3DGAN ile elde edilen yapıların etkinliğini araştırmak için rastgele seçilmiş 5 kafes model (turuncuyla gösterilmiştir) SLM 3B yazıcı ile üretilerek test ve analiz işlemlerine tabi tutulmuştur.

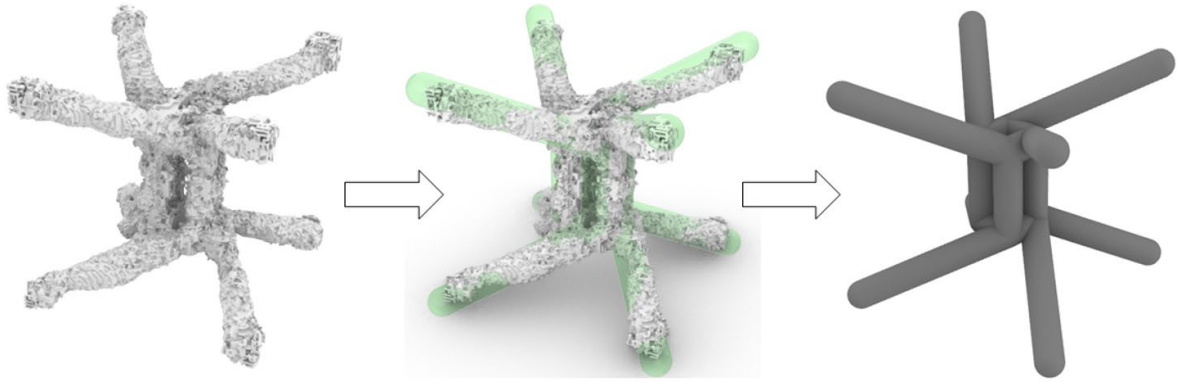


Şekil 6.4. 3DGAN tarafından üretilmiş 3B sentetik kafes yapı tasarım seçenekleri

6.2.3. Hücresel yapılar tasarım süreci

Kafes yapıları genel olarak stokastik ve stokastik olmayan olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [142]. Stokastik kafesler, belirsiz ve rastgele birim hücrelerle karakterize edilmektedir. Bu nedenle bu yapılarda bölgelere bağlı olarak farklı yapısal özellikler görülebilmektedir. Stokastik yapıların plastik deformasyona uğramadan yüksek deforme edilebilme yetenekleri onları enerji sönümleme uygulamalarında kullanışlı kılmaktadır [246]. Öte yandan, stokastik olmayan (kafes tabanlı) yapılar, düzenli bir şekilde birbirine kenetlenerek tekrar eden özdeş birim hücrelerden oluşmaktadır [126]. Bu yapılar, özelleştirilebilir mekanik özelliklere sahiptir. Bu durum onları yüksek yapısal performans ve hafifliğin arzu edildiği havacılık, uzay ve otomotiv gibi çeşitli sektörlerde ön plana çıkarmaktadır [93,280]. Bahsedilen özelleştirilebilir özelliklerinden dolayı bu çalışmada stokastik olmayan kafes yapıların mekanik davranışları ele alınmıştır.

3B kafes geometrilerinin oluşturulmasında daha önce ayrıntıları verilen üretken çekişmeli ağ (İng. Generative Adversarial Network, GAN) mimarisi kullanılmıştır. GAN teknolojisinin son derece karmaşık geometriler üretmedeki hünerine rağmen, üretilen 3B kafes modellerde süreksizlikler, yüzey hataları ve geometrik kusurlar görülebilmektedir. Bu tür tutarsızlıklar, analiz ve test evrelerinde istenmeyen hatalara ve yanılgılara sebep olabilir. Bu nedenle, oluşturulan kafes geometrileri, temel bir referans geometriye dayalı olarak Fusion 360 Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) yazılımında yeniden modellenmiştir. Şekil 6.5, Sentetik Yapı-4 (İng. Synthetic Structure, SS-5) için BDT modelini düzenleme adımlarını göstermektedir. Seçilen diğer sahte modeller de benzer işlemlerden geçirilerek nihai geometriye dönüştürülmüştür. Bu kritik adım, test ve doğrulama aşamalarında daha kesin ve güvenilir sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu yeniden modellenmiş 3B kafes geometrileri, öncüllerine kıyasla daha yüksek tutarlılık ve sürekliliğe sahiptirler.

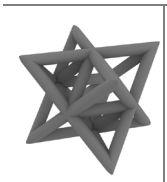
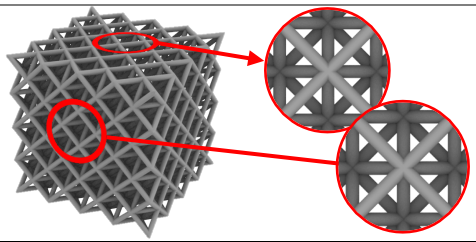
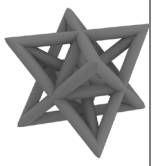
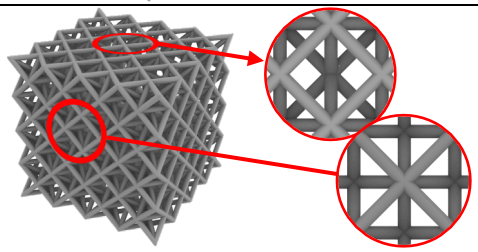
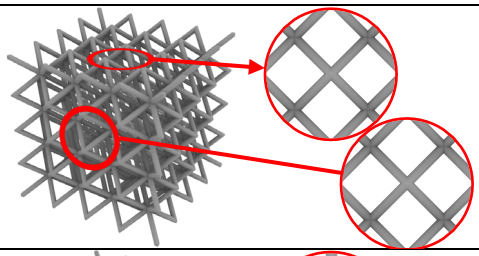
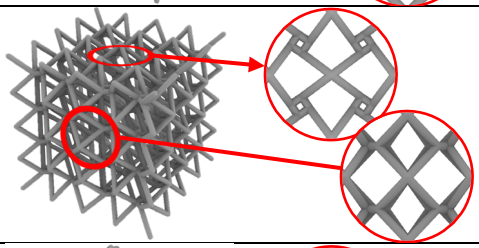
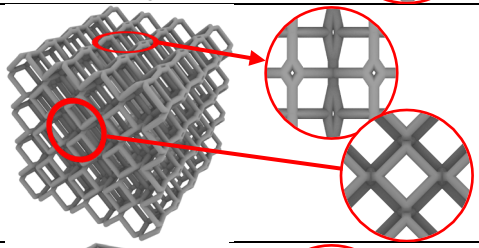
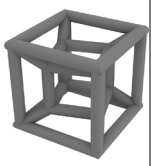
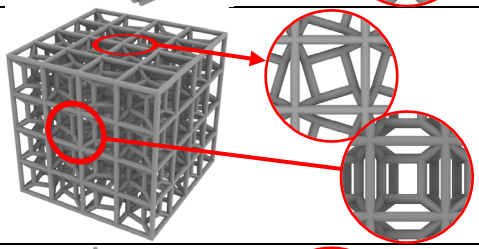
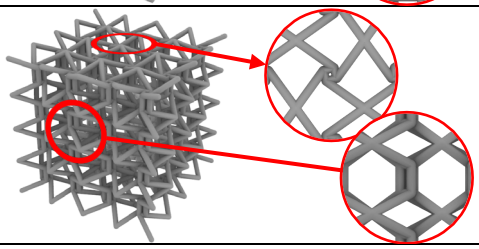


Şekil 6.5. GAN tarafından oluşturulan 3D modellerin düzenlenme süreci

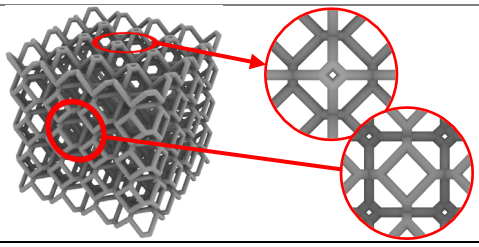
Mevcut çalışmada, üçü standart ve beşi GAN tarafından üretilmiş sekiz farklı birim hücre tasarımı ile oluşturulan kafes yapılar ele alınmıştır. Ayrıca iki farklı tip mekanik davranış (eğilme veya gerinme baskın) sergileyen bu birim hücreler kullanılarak standart basma ve darbe testi numuneleri tasarlanmıştır. Standart basma ve darbe testi numuneleri sırasıyla 24.8 x 24.8 x 24.8 mm^3 ve 12.4 x 12.4 x 55 mm^3 boyutlarına sahiptir [48]. Burada, farklı yönlerden gelen kuvvetlere aynı direnci sağlamak için kafes yapıları simetrik olarak tasarlanmıştır. Test numunelerindeki kafes hücrelere konumlandırmaları iki farklı bakış açısıyla Çizelge 6.1'de verilmiştir. Diğerlerinden farklı olarak, oktet ve diyagonal test numuneleri tüm bakış yönlerinden aynı görünüme sahiptir.

Kafes yapılarına ait fiziksel özellikler incelendiğinde ise (Çizelge 6.1), en düşük kütle ve en yüksek porozite değerleri diyagonal ve SS-1 hücrelerinde, en yüksek kütle ve en düşük porozite değerleri ise merkezi hücrede elde edilmiştir. Test numunelerinin porozitesi, kafes yapının yoğunluğunun referans materyalin katı yoğunluğuna oranı olarak tanımlanan bağıl yoğunluğa ters orantılıdır. Ek olarak, model geometrisinden kaynaklanan üretim kısıtlamalarının üstesinden gelmek için kafes geometrilerinde minimum unsur boyutu, Bölüm 4'te belirlenen optimum çubuk eleman çapı olan 0,8 mm olarak belirlenmiştir. Test numune tasarımları daha sonra yüzey geometrisinin üçgenler kullanılarak tanımlandığı STL dosya formatında kaydedilmiştir.

Çizelge 6.1. Kafes yapı BDT modellerine ait fiziksel özellikler

Hücre tipi	Kafes yapı	Unsur büyüklüğü (mm)	Ağırlık (gr.)	Bağıl yoğunluk	Gözenekli lik
 Oktet		0,80	8,07	0,2	80%
 Merkezi		0.80	9,71	0,24	76%
 Diyagonal		0.80	3,21	0,08	92%
 SS-1		0.80	3.23	0,08	92%
 SS-2		0.80	4,30	0,11	89%
 SS-3		0.80	6,47	0,16	84%
 SS-4		0.80	3,89	0,10	90%

Çizelge 6.1. (devam) Kafes yapı BDT modellerine ait fiziksel özellikler

Hücre tipi	Kafes yapı	Unsur büyüklüğü (mm)	Ağırlık (gr.)	Bağıl yoğunluk	Gözenekli lik
 SS-5		0.80	4,36	0.11	89%

6.2.4. Mekanik davranış tahmini

Mekanik tepki tahmininde kullanılan modeller ve eşitlikler Bölüm 2.4.2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çalışmada incelenen kafes yapılar için Maxwell kararlılık değerleri ve tahmini mekanik davranışları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

$$M = s - 3j + 6 \tag{6.2}$$

Bu bağlamda, "j" düğüm sayısını, "s" ise birim hücredeki çubuk eleman sayısını temsil etmektedir. Hesaplanan M değerinin sıfırın altında olması durumunda, hücre elemanlarının dış kuvvetleri dengelemede yetersiz kalarak eğilme baskın mekanik davranışa sahip olduğu belirtilir. Eğer M değeri sıfırın üzerindeyse, yükün çoğunlukla çubuk elemanlarının sıkışması ve gerilmesi ile taşındığı, düğümlerde ise önemli bir eğilme olmadığı söylenebilir. Bu yapılar gerinme baskın aşırı rijit kafes yapısı olarak adlandırılırlar. M = 0 durumunda ise, yapı rijittir ve dış kuvvetlere verilen tepki, çubuk elemanlarına gelen yüke bağlıdır.

Çizelge 6.2. Kafes yapı mekanik tepkilerinin Maxwell kararlılık kriteri kullanılarak analizi

Kafes yapısı	s	j	M	Mekanik davranış
Oktet	36	14	0	Gerinme
Merkezi	40	15	1	Gerinme
Diyagonal	8	5	-1	Gerinme
SS-1	12	8	-6	Gerinme
SS-2	36	16	-6	Eğilme
SS-3	20	8	2	Gerinme
SS-4	20	8	2	Gerinme
SS-5	36	28	-42	Eğilme

6.2.5. AlSi10Mg kafes yapılarının SLM yöntemiyle üretilmesi

Kafes yapıları, küresel şekilli AlSi10Mg tozları kullanılarak Seçici Lazer Eritme (SLM) tekniği kullanılarak üretilmiştir. Tozlara ait özellikler Bölüm 4'te (Resim 4.1 ve Çizege 4.1) verilmiştir. Kafes numuneleri, 245 x 245 x 280 mm³ baskı hacmine sahip Concept Laser M2 Cusing SLM makinesi kullanılarak üretilmiştir.

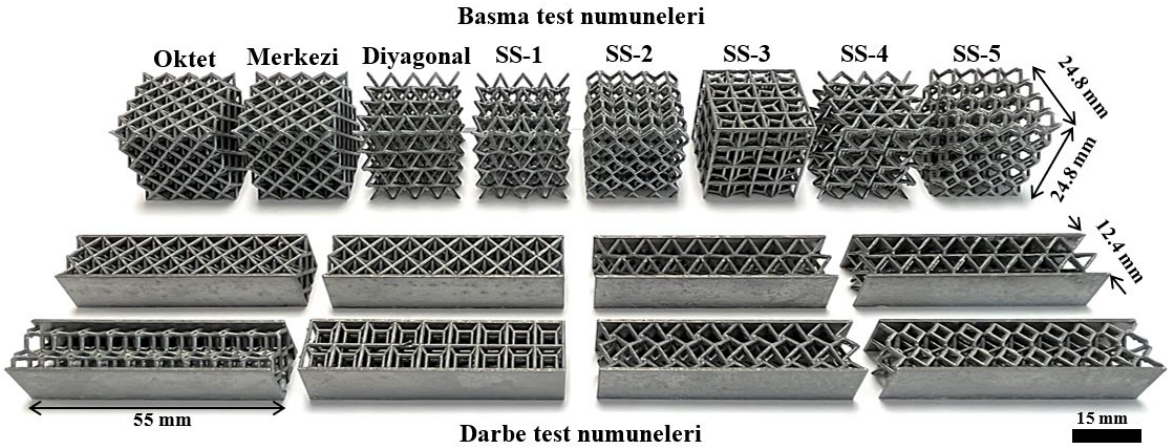
SLM sistemi, ayarlanabilir lazer odak boyutuna sahip 400 W Yb-fiber lazer kullanmaktadır. Optimum koşulları sağlamak için üretim odası sıcaklığı, baskı işlemi boyunca 110°C'de sabit tutulmuştur. Baskı ön işlemi olarak baskı hacmindeki oksijen seviyesi %0,8'in altına düşene kadar ortam argon gazı ile şartlandırılmıştır. Sericinin taşıdığı toz miktarı, tüm baskı tablasını bir katman kalınlığında doldurmaya yetecek toz miktarının iki katı olacak şekilde belirlenmiştir. Toz serme hızı 50 mm/s'dir. Her bir katman ise 25 µm kalınlığındadır. Bölüm 4 ve Bölüm 5'te çubuk elemanları üretmek için belirlenen optimum işlem parametreleri kullanılarak kafes yapılar üretilmiştir. Kafes numunelerin üretiminde kullanılan üretim parametreleri Çizelge 6.3'te verilmiştir. Her bir kafes yapılı basma ve darbe testi numunesinden üçer adet üretilmiştir. Üretim basma test numuneleri için 19 saat 23 dakika, darbe test numuneleri için 15 saat 38 dakika sürmüştür. Üretim sürecinin ardından kafes test numuneleri, tel erozyon ile yapı platformundan ayrılmıştır. Üretilen numuneler Resim 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Kafes yapıların üretiminde kullanılan SLM baskı parametreleri

Dolgu alanı	Birim	Değer	Kontur	Birim	Değer
Lazer gücü	W	180	Lazer gücü	W	200
Tarama hızı	mm/s	600	Tarama hızı	mm/s	1250
Lazer Öteleme	µm	250	Lazer Öteleme	µm	175
Spot çapı	µm	140	Spot çapı	µm	140
Tarama aralığı	µm	112			

Kafes yapıların hassas bir şekilde üretilebilmesi için kontur hattı boyunca lazer etkisinin sürekliliği sağlanmıştır. Ardından konturun çevrelediği dolgu alanı 67º açılı doğrusal desen kullanılarak taranmıştır. Bu süreç, 800 µm çaplı çubuk elemanlara sahip ince kafes yapılarının yüksek yoğunluk ve artırılmış boyutsal doğrulukla üretilmesine imkan

vermektedir. SLM ile üretilen karmaşık geometriye sahip ince unsurlu parçalardan destek yapılarının çıkarılması zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, 3D kafes yapılarının üretimi, destek yapıları kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Destek yapısı kullanılmadan üretilen çubuk elemanların alt yüzeylerinde nihai parçanın doğruluğunu ve yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkileyen arzu edilmeyen toz sinterlenmeleri görülmüştür. Sinterlenen toz miktarı çubuk elemanın baskı yüzeyi ile yaptığı açının azalmasıyla artmaktadır. Isıl birikmelerden kaynaklanan bu durumu minimize etmek için Bölüm 2.3.2'de ayrıntılı olarak açıklandığı gibi parçaların baskı platformuna doğru bir şekilde konumlandırılması gereklidir. Ayrıca, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen bileşenlerde tipik olarak tarama açısı ve yapı yönüne bağlı olarak anizotropik davranışlar gözlemlenebilir. Anizotropi, katmanlı imalat sürecinden kaynaklanmaktadır. Parçanın üretildiği yönde, genellikle z ekseni boyunca, kazanılan mekanik özellikler diğer yönlerdeki (x ve y eksenleri) özelliklere kıyasla genellikle daha üstündür. Bu etki SLM gibi toz yatağı füzyonuna dayalı sistemlerde ihmal edilebilir düzeyde [281] olmasına rağmen değerlendirmeler arasında tutarlılığı korumak ve sonuçlardaki farklılıkların oryantasyon kaynaklı mekanik özellik değişikliklerinden ziyade tasarım farklılıklarına atfedilebilmesini sağlamak için tüm kafes yapılar için tek tip hizalama kullanılmıştır. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg kafes yapıların baskı platformu üzerindeki konumlandırılmaları Resim 6.1'de verilmiştir.



Resim 6.1. Üretilmiş AlSi10Mg kafes yapı test numunelerinin baskı oryantasyonları

Eklemeli imalat için baskı süresi, malzeme tüketimi ve tahmini maliyet gibi temel tasarım hususları katı geometriler yerine kafes yapıların kullanılmasıyla önemli ölçüde azaltılabilir. Çalışmada kullanılan kafes yapı deney setlerinin üretim süresinde benzer boyutlardaki katı model setlerine nazaran yaklaşık %60 bir azalma görülmüştür. Bu bulgular, kafes geometrilerin yapısal malzemelere dahil edilmesiyle üretim verimliliğinin artırılabileceğini

göstermektedir. Üretim süresinin yanı sıra kullanılan sarf malzeme miktarındaki azalma ile birlikte katı yapıların kafes geometriler ile değiştirilmesiyle toplam üretim maliyeti yaklaşık %92 oranında azaltılmıştır. Test numunelerinin kafes konfigürasyonları içindeki tutarlı eksenel yükseklikleri nedeniyle, üretim süreleri katı hacimlerle orantılı olarak değişmektedir ve önemli bir farklılık görülmemektedir.

6.2.6. Basma testi

Kafes mimarisine özgü mekanik özelliklerin tespiti için basma testi yapılmıştır. Testler, 50kN kuvvet kapasitesine sahip 2580 serisi yük hücreli Instron 5969 evrensel test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Metalik hücresel malzemeler için basma testi standartlarına (DIN 50134) uygun olarak, Resim 6.1'de gösterilen kübik numunelerin (24,8 x 24,8 x 24,8 mm^3) en üst yüzeylerine basma kuvveti uygulanmıştır. İlerleme hızı 5 mm/dk olarak belirlenmiştir ve test yapı tamamen yoğunlaşana kadar devam etmiştir. Test numunelerinde herhangi bir gözlemlenebilir deformasyonu belirlemek için test esnasında eşzamanlı olarak video kaydı alınmıştır. Daha sonra, kırılma mekanizmasını anlamak için kırık yüzeyler bir stereo mikroskop (Leica DMC2900) kullanılarak incelenmiştir.

6.2.7. Charpy darbe testi

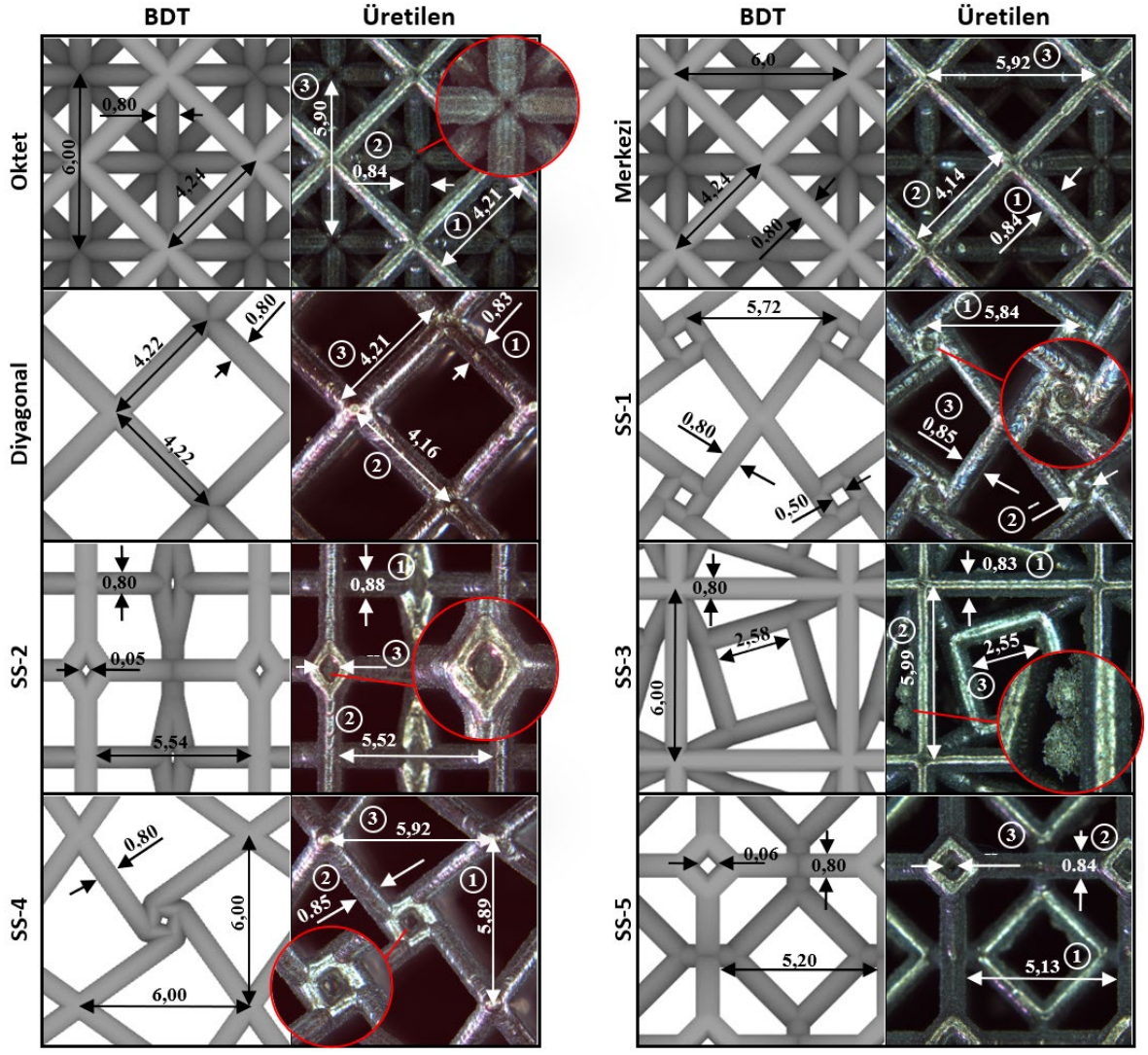
Charpy darbe testi, malzemenin yüksek gerilme oranları altında kırılmadan önce enerjiyi emme kapasitesini ölçmek için kullanılan standart bir test yöntemidir [282]. Bu emilen enerji değeri malzeme tokluğunun bir göstergesidir. Charpy darbe testleri, 50 J enerjili darbe çekici ve 1024 darbe/döngü döner kodlayıcı ünitesine sahip Alarge darbe test cihazı kullanılarak Resim 6.1'de gösterilen çentiksiz kafes yapılı numuneler (12,4 x 55 x 12,4 mm^3) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

6.3. Bulgular ve Tartışma

6.3.1. Boyutsal doğruluk ve kalite kontrol

Seçici Lazer Eritme (SLM) yöntemiyle üretilen parçaların geometrik doğruluğu; lazer işlem parametreleri, tarama stratejisi, sıcaklık dağılımı, katman kalınlığı ve parçanın geometrisi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, Leica DMC2900 mikroskop kullanılarak üretilen hücresel yapıların boyutsal varyasyonları ve baskı hataları tespit

edilmiştir. Şekil 6.6'da gösterildiği gibi, mikroskop görüntülerinden elde edilen ölçümler ile BDT verileri arasında derinlemesine bir karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 6.4'te ise, boyutsal doğruluk seviyesini belirlemek amacıyla çeşitli noktalardan alınan üç farklı ölçüme dayanarak hesaplanan yüzde sapma değerleri sunulmuştur. Üretilen unsur boyutlarının BDT verisinden daha küçük olduğu durumlar da sapma değerleri negatif olarak ifade edilmiştir.



Şekil 6.6. BDT verileri ve 3D baskılı modeller arasında boyutsal karşılaştırma. Tüm boyutlar mm cinsindendir.

SLM yüksek boyutsal doğruluğa sahip parçalar üretme kabiliyetine sahiptir. Ancak yüksek boyutsal doğruluğun elde edilmesi pratikte zorlu olan ideal koşulları gerektirmektedir. Kafes yapılar gibi ince unsurların üretiminde çubuk eleman oryantasyonlarına bağlı olarak yüksek boyutsal sapmalar görülebilir. Çalışmada SLM parçalarının detaylı ölçümleri için mikroskopi tekniği kullanılmıştır. Mikroskobik görüntülerden elde edilen ampirik veriler,

bazı tutarsızlıklar gösterse de boyutsal doğruluğun hedeflenen tolerans değerlerini sağladığı görülmüştür. Şekil 6.6 ve Çizelge 6.4'te gösterdiği gibi, çubuk eleman çapları BDT modelinden yaklaşık %3,75 ila %6,25 (0,03-0,05 mm) daha büyüktür. Bu duruma neden olan birincil faktör, sinterleme sırasında komşu toz parçacıklarının da çubuk eleman yapısına zayıf metalürjik bağ ile tutunmasıdır. Lazer işlem parametreleri ve çubuk eleman oryantasyonuna bağlı olarak değişen sinterlenmiş toz miktarı nihai ürün boyutunda artışa neden olmaktadır. Düğüm unsurlarında boyutsal sapma değeri yaklaşık ±%1,67 olarak belirlenmiştir. Bulgular geniş bir perspektifte incelendiğinde, test edilen tüm modellerde, eleman boyutları ve delik çaplarındaki azalmayla ilişkili olarak boyutsal sapmada artış eğilimi gözlenmiştir. Boyutsal doğruluktaki bu farklılıklar, SLM yazıcıların doğal kısıtlamalarına ve mevcut baskı teknolojisinin sınırlandırmalarına bağlıdır. Ayrıca ısıdan etkilenen bölgelerde oluşan kısmi erime gibi üretim süreci faktörleri, özellikle yakın mesafeli unsurların baskısı sırasında üretim hatalarına ve boyutsal sapmalara neden olmuştur.

Tüm kafes yapıları incelendiğinde, düğüm sınır katmanlarında belirgin bir ayrılma ya da çatlak ilerlemesi gözlemlenmemiştir. Bu durum, yapıların hedeflenen dayanıklılık özelliklerine ulaşması konusunda olumlu bir etki yaratmaktadır. Tüm modellerdeki dikey yapılar (baskı platformuna göre) oldukça hassas bir şekilde (sapma <%1) üretilirken, yatay elemanlarda boyutsal sapmalar daha belirgin hale gelmiştir. Ek olarak, Oktet, SS-1, SS-2, ve SS-4 modellerinde 0,5 mm'den küçük deliklerin oluşmadığı, bunun yerine bu alanlarda metal tozu biriktiği tespit edilmiştir. Buna karşın oktet test numunesinin düğüm noktalarında delik benzeri yapı ve çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Düğüm noktalarında boşluklu yapının oluşması genellikle hızlı ısı değişimleri, yetersiz toz füzyonu ve işlem parametrelerinin yanlış ayarlanmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.6'daki SS-3 kafes numunesinde açıkça görüldüğü üzere, baskı platformuna göre yatay konumlandırılmış çubuk elemanların alt yüzeylerinde yoğun metal tozu varlığı tespit edilmiştir. Sinterleme sırasındaki yüksek sıcaklıklar ve hızlı soğuma süreçleri, toz partiküllerinin ince çubukların alt yüzeylerine adhezyonunu kolaylaştırmakta ve bu da yoğun metal tozu birikimine neden olmaktadır. Buna ek olarak, lazerin etkisiyle eriyen malzeme sıvı haldeyken, yerçekimi ve kapilarite kuvvetlerin etkisiyle toz yatağına nüfuz ederek bağ yapılarının oluşmasına sebebiyet vermektedir.

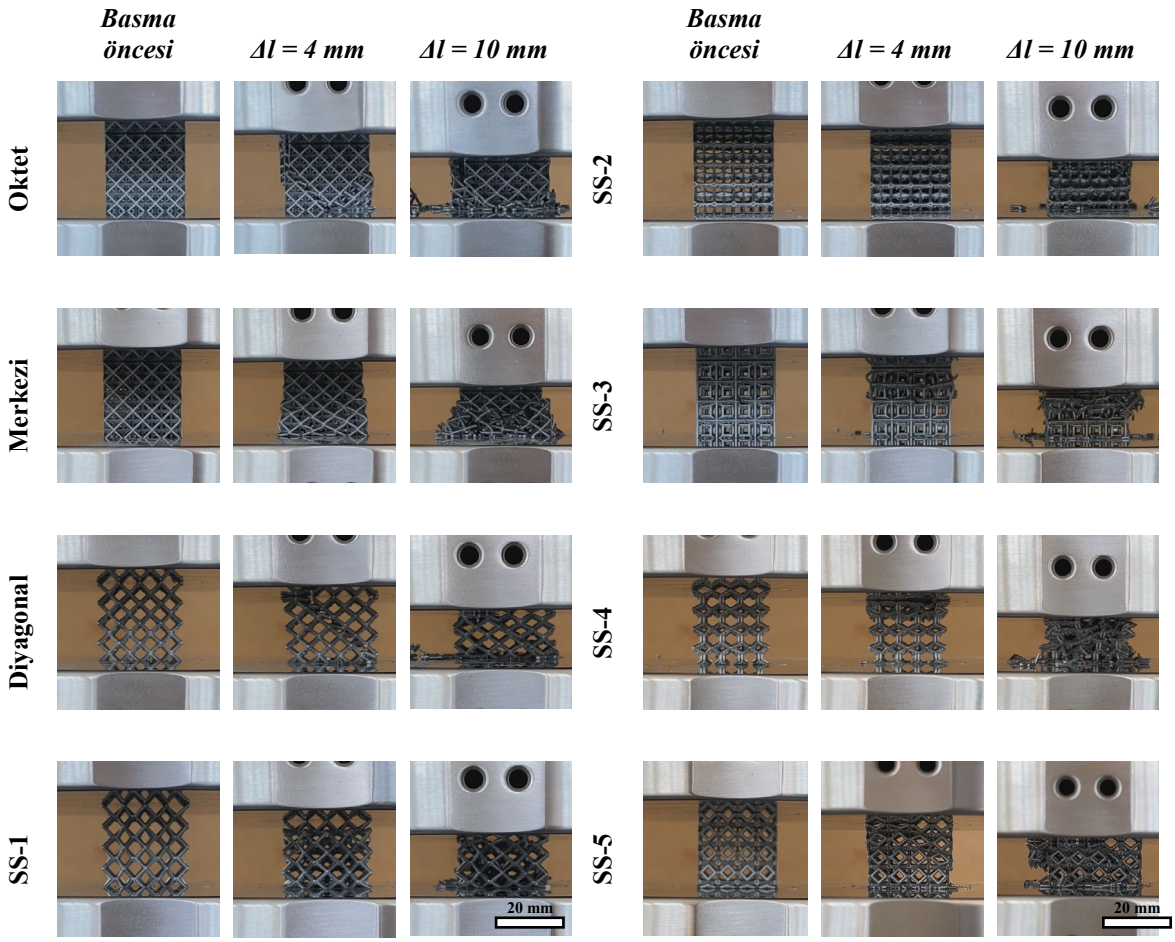
Çizelge 6.4. Kafes yapıya ait BDT verileri ve SLM ile üretilmiş numunelerin kritik noktalarındaki boyutsal farklılıklar. Tüm boyutlar mm cinsindendir.

		D (1)	D (2)	D (3)			D (1)	D (2)	D (3)
Oktet	BDT	4,24	0,80	6,00	Merkezi	BDT	0,80	4,24	6,00
	Üretilmiş (Ort.)	4,21	0,84	5,90		Üretilmiş (Ort.)	0,84	4,14	5,92
	Sapma (%)	-0,71	5	-1,67		Sapma (%)	5	-2,36	-1,33
		D (1)	D (2)	D (3)			D (1)	D (2)	D (3)
Diyagonal	BDT	0,8	4,22	4,22	SS-1	BDT	5,72	0,5	0,80
	Üretilmiş (Ort.)	0,83	4,16	4,21		Üretilmiş (Ort.)	5,84	-	0,84
	Sapma (%)	3,75	-1,42	-0,24		Sapma (%)	2,10	-	5
		D (1)	D (2)	D (3)			D (1)	D (2)	D (3)
SS-2	BDT	0,8	5,54	0,05	SS-3	BDT	0,80	6	2,58
	Üretilmiş (Ort.)	0,83	5,52	-		Üretilmiş (Ort.)	0,83	5,99	2,55
	Sapma (%)	3,75	-0,36	-		Sapma (%)	3,75	-0,17	-1,16
		D (1)	D (2)	D (3)			D (1)	D (2)	D (3)
SS-4	BDT	6,00	0,80	6,00	SS-5	BDT	5,20	0,80	0,06
	Üretilmiş (Ort.)	5,89	0,85	5,92		Üretilmiş (Ort.)	5,13	0,84	-
	Sapma (%)	-1,83	6,25	-1,33		Sapma (%)	-1,35	5	-

6.3.2. Basma testi

SLM ile üretilmiş AlSi10Mg kafes yapıların mekanik özellikleri basma testi ile belirlenmiştir. Resim 6.2'de, basma testi esnasında test numunelerinin 0,4 ve 10 mm deformasyon seviyelerindeki morfolojik değişimleri verilmiştir. Kayma ve basma gerilmesinin birleşik etkisi, kafes tasarımlarına bağlı olarak numunelerin kritik düğüm noktalarından veya çubuk eleman kesitlerinden kırılmasına neden olmuştur. Kafes numuneleri, mekanik davranışlarına göre farklı makroskobik kırılma mekanizmalarına sahiptir. Diyagonal, SS-1 ve SS-2 yapıları, belirgin bir kırılma olmadan tamamen yoğunlaşmıştır. Bu numuneler, yüksek gerinim değerleri ile karakterize edilen eğilme baskın mekanik davranış sergilemektedirler.

Bunun aksine, merkezi, SS-3 ve SS-4 numuneleri, belirli bir yük eşiğine ulaştıktan sonra kırılmalara maruz kalmıştır. Bu nedenle kırılgan yapılı bu numunelerin gerinme baskın mekanik davranışa sahip olduğu söylenebilir. Gerinme baskın kafes yapıların gerilme-gerinim eğrilerinde (Şekil 6.7) kırılgan deformasyon modlarına atfedilen önemli dalgalanmalar görülmemektedir. Bu yapılarda, en erken kırılma belirtileri 4 mm deformasyonda (Resim 6.2) yarı elastik bölgenin ötesindeki düşey çubuk elemanlarında gözlemlenmiştir. Basma kuvvetinin ilerlemesiyle zayıf alanlarda ortaya çıkan çatlaklar, yükün etkisiyle yayılarak hücresel kafes elemanların kırılmasına ve dolayısıyla gerilmede bir azalmaya sebep olmuştur. İlk kırılmanın ardından, kırılan bileşenler devam eden basma kuvveti altında sıkışarak bir sonraki kırılma gerçekleşene kadar gerilmede bir artışa neden olmaktadır.



Resim 6.2. Basma testi boyunca hücresel numunelerin deformasyon aşamaları

Diğer taraftan oktet, diyagonal ve SS-5 numuneleri, yük yönüne 45º açılı bir düzlem boyunca kayma deformasyonları göstermiştir (Resim 6.2). Bu kayma deformasyonunun mekanik etkileri, kafes yapısının basma gerilmesindeki ilk önemli düşüşü ile doğrudan bağlantılıdır.

Kayma gerilmelerinin azalmasının ardından sıkıştırma devam ettikçe basma gerilmeleri tekrar artmaya başlamaktadır (Şekil 6.7). Basmanın son aşamasında, sıkıştırılmış numuneler, homojen bir katı yapıya benzer özellikler göstermeye başlayarak, yoğunlaştırma aşamasına geçmektedirler. Bu aşamada gerilme değeri hızlı bir şekilde yükselmektedir.

Basma testi sırasında, kafes yapılar üç farklı kırılma modu sergilemektedir. Gözlemlenen kırılma mekanizmaları şu şekilde sıralanabilir: (1) Temas bölgesinde ezilme, (2) Kuvvet yönüne göre 45 açıyla yönlendirilmiş kayma oluşumu ve (3) Lokal burkulmanın takip ettiği plastik deformasyon. Kırılma modu (1) ile ilgili olarak, SS-2, SS-3 ve SS-4, basma testi sırasında birbirini izleyen kırılmaların oluşumunu örneklemektedir. Kırılma başlangıcının her ayrı örneği, gerilme-gerinim eğrisinde gösterildiği gibi (Şekil 6.7) gerilmedeki bir azalma ile ilişkilendirilmiştir. Kırılmaların bu aşamalı ilerlemesi, potansiyel olarak bu yapıların yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Kırılma modu (2) ile uyumlu olarak oktet ve SS-5 numunelerinde 45° açılı kayma gerilmelerine bağlı deformasyonlar gözlemlenebilir. Kayma kırılması veya burkulma, yüksek kayma gerilmelerinin gözlemlendiği lokalize bölgelerde meydana gelmektedir. Gerilme-gerinim eğrilerindeki uzun ve düz plato, diyagonal ve SS-1'de görülen plastik deformasyonu takiben lokalize burkulmaların bir sonucudur. Gerilme-gerinim eğrilerindeki plato, yapıların enerjiyi iyi dağıttığı ve bu kafeslerin enerji soğurma kapasitelerinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bu tür kırılma moduna sahip numuneler, iyileştirilmiş gerinim değerlerine sahiptir.

Basma testinde, kafes yapılar üç ana deformasyona maruz kalırlar. Bu deformasyon tipleri akma, burkulma ve kırılma olarak sıralanabilir. Doğrusal elastikiyet ve ideal plastiklik arasındaki doğrusal olmayan geçiş bölgesi ihmal edilerek metalik çubuk elemanlara ait deformasyon mekanizması basitleştirildiğinde, yüksek narinlik oranına sahip uzun ve ince çubuk elemanların elastik burkulma eğiliminde olduğu söylenebilir. Tersine, düşük narinliğe sahip kısa ve kalın çubuk elemanlar ise akma eğilimindedir [124,139]. Narinlik oranı bir çubuk elemanın uzunluğu ile minimum dönme yarıçapı arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir ve Eş. 6.2 kullanılarak belirlenebilir.

$$s = \frac{L_e}{r_{min}} \tag{6.2}$$

Bu bağlamda, minimum dönme yarıçapı, en küçük atalet momentine ve çubuk elemanın en küçük alanına bağlı olarak elde edilmektedir (Eş. 6.3).

$$r_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \tag{6.3}$$

Burkulma eğilimi çubuk elemanlarının narinlik oranına bağlı olarak artmaktadır [139]. Ayrıca, düşük bağıl yoğunluğa sahip kafes yapılar, belirgin bir elastik burkulma davranışı sergilemektedir [124]. Euler burkulma gerilme denklemi (Eş. 6.4), çubuk elemanların plastik akmadan önce elastik burkulma ile deforme olduğu kritik gerilme değerini belirlemede kullanılabilir. Euler burkulma teoremi, narinlik oranının bir fonksiyonu olarak maksimum burkulma gerilmesi değerini tahmin etmektedir. Ancak, Euler teoremi yalnızca idealize edilmiş koşullar altında geçerlidir ve gerçek malzemelerin davranışını tam olarak yansıtmayabilir.

$$\sigma_{krit} = \frac{\pi^2 E}{s^2} \tag{6.4}$$

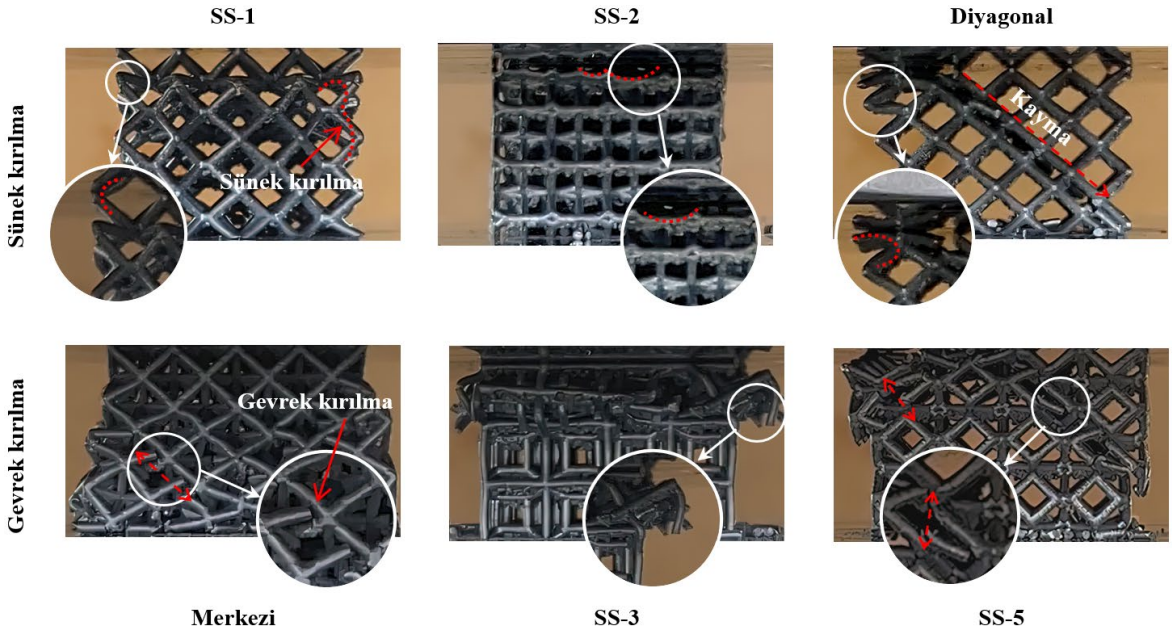
Çizelge 6.5'te, kafes yapılarının bağıl yoğunlukları, narinlik oranı ve Euler burkulma eşik gerilmeleri gibi önemli yapısal ve mekanik özellikleri verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere, maksimum narinlik oranına (18,48) ve minimum bağıl yoğunluğa (0,078) sahip SS-1 kafes yapısı, burkulma kaynaklı deformasyonlara daha fazla eğilim göstermektedir.

Çizelge 6.5. Kafes yapılarına ait yapısal ve mekanik özellikler

Hücre yapısı	Narinlik	Bağıl yoğunluk	Modül, E (MPa)	Euler kritik gerilme (MPa)
Octet	13,76	0,198	476	24,78
Centered	11,32	0,238	484	37,24
Diagonal	13,84	0,078	47	2,41
SS-1	18,48	0,078	67	1,93
SS-2	14,00	0,105	97	4,87
SS-3	17,20	0,158	297	9,89
SS-4	12,00	0,095	137	9,38
SS-5	11,40	0,107	101	7,66

Bu durum, Resim 6.3'te kırılmış numune görüntüsü aracılığıyla görsel olarak teyit edilmiştir. Diğer yandan, merkezi kafes yapısı, artan bağıl yoğunluğu ve azalan narinlik oranı sebebiyle burkulmaya bağlı deformasyonlara karşı daha dirençli hale gelmiştir (Çizelge 6.5). Bu

durum, Resim 6.3'te gösterildiği gibi, aşırı sert ve eğilme baskın yapıdaki gevrek kırılmayı beraberinde getirmektedir. Akma deformasyonuna maruz kalan SS-5'e benzer bağıl yoğunluğa sahip olan SS-2 kafes yapısında, yüksek narinlik oranının bir sonucu olarak burkulma deformasyonları görülmektedir. Son olarak, SS-3 ve SS-4 tasarımlarında, Maxwell stabilite kriterine (Eş. 6.2) göre gerinme baskın özelliklerle karakterize edilen gevrek kırılmalar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, eğilmenin baskın olduğu diyagonal hücre yapısında burkulmaya bağlı deformasyonlar görülmüştür.

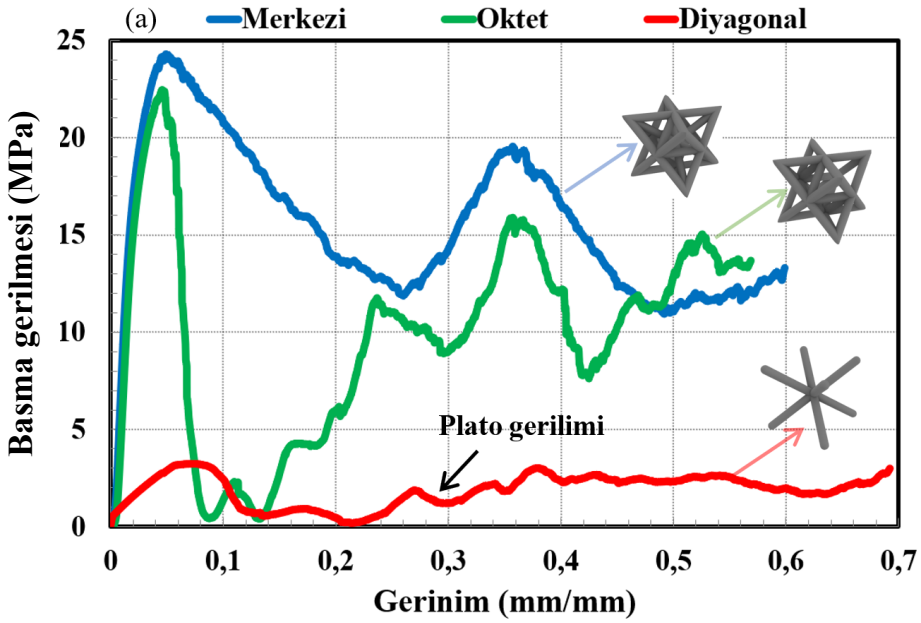


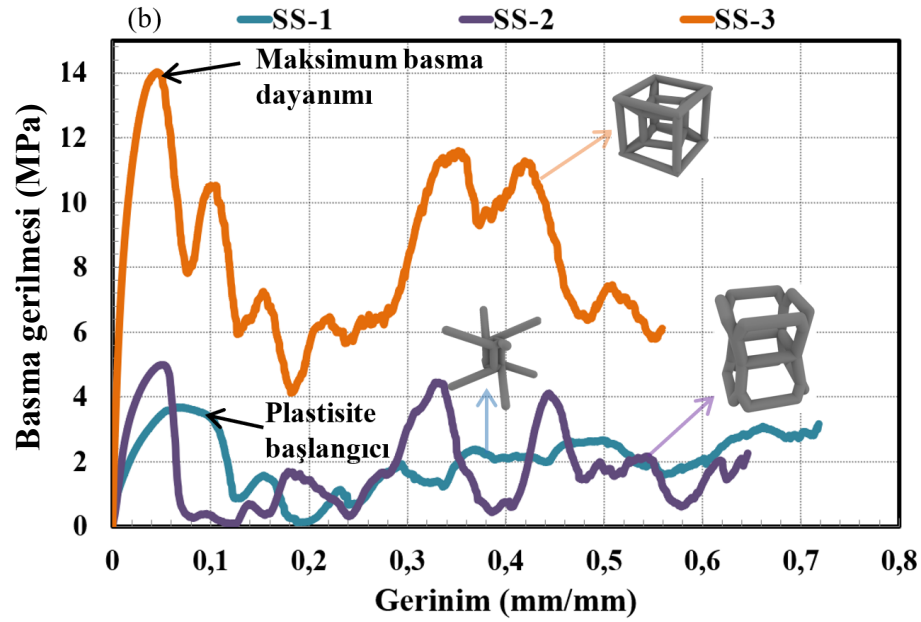
Resim 6.3. Basma testinin ardından çeşitli hücresel numunelerde çatlak oluşumları ve deformasyon türleri

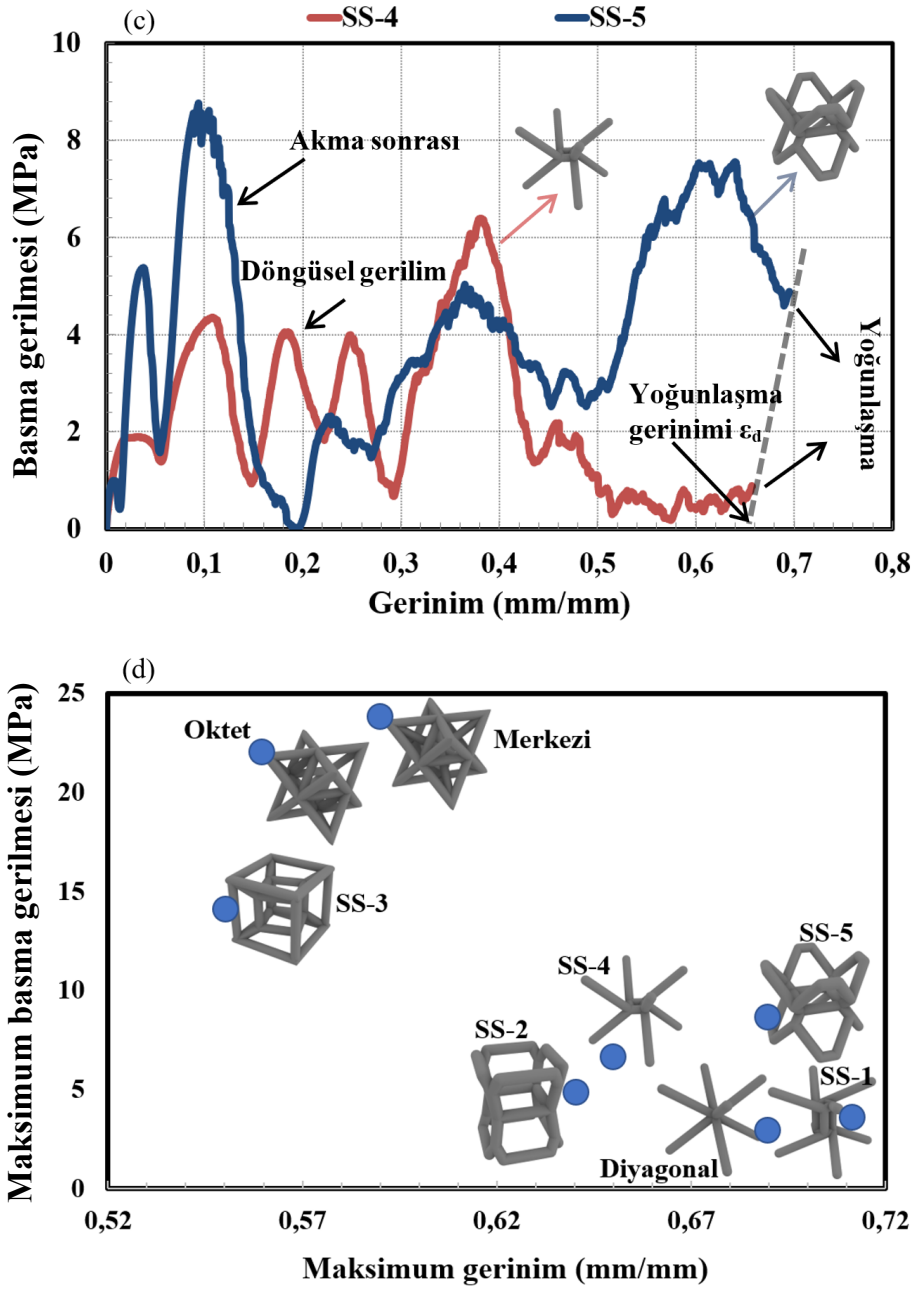
Resim 6.3'te alt bölümde yer alan kafes yapıları, belirgin bir burkulma kanıtı sergilememekte ve plastik deformasyon olmadan aniden kırılmaktadır. Bu tür gevrek kırılmalarla sonuçlanan yapılar tipik olarak rijittir. Ancak uygulanan yük altında deformasyona uğrama kapasiteleri zayıftır. Çizelge 6.5'te temsil edilen Euler burkulma gerilmesi tahmini değerleri, bu argümanı desteklemektedir. Euler kritik yükü, narin çubuk elemanının beklenmedik bir şekilde büküldüğü veya eğildiği basma kuvvetine karşılık gelmektedir. Yük bu kritik eşiği aşarsa, çubuk elemanda plastik deformasyonlar meydana gelir ve en nihayetinde yapı çöker. Euler burkulma gerilmesi değerlerinin akma mukavemetinin altında yer aldığı modellerde (Resim 6.3 üst bölümü), burkulma kaynaklı deformasyon gözlemlenmektedir. Ancak, bu değerlerin akma mukavemetini aştığı yapılarda (Resim 6.3 altı kısım), gevrek kırılmalar meydana gelmektedir.

Şekil 6.7, farklı kafes yapıların basma testiyle elde edilen gerilme-gerinim diyagramlarını göstermektedir. Oktet ve SS-5 kafes yapıları, maksimum gerilme değerlerine ulaştıktan sonra aniden kırılmışlardır. Artan yüklere maruz kalan bu numunelerin zayıf noktalarında ortaya çıkan çatlaklar artmış ve maksimum gerilme değerlerine ulaştığı anda yoğun ve ani kırılmalar başlamıştır. Dolayısıyla grafikte görüldüğü üzere maksimum gerilme değerinin ardından şiddetli bir düşüş görülmektedir. Benzer şekilde, merkezi ve SS-3 kafes yapılarında doğrusal olmayan elastik reaksiyon gözlemlenmiştir. Bu gerinme baskın kafes sistemleri, deformasyon modu yerel burkulma ve çatlak oluşumuna geçiş yaptığında, yük taşıma kapasitesinde önemli bir azalmayla sonuçlanan yıkıcı bir kırılmaya yol açmaktadır. Basma çenesi kapanmaya devam ettikçe parçalanmış hücresel unsurlar sıkışarak, bir sonraki kırılma olayı meydana gelene kadar gerilmede bir artışa neden olurlar. SS-2 ve SS-4 kafes yapıları, kritik hücre unsurlarının belirli aralıklarla kırılmasıyla bağlantılı olarak döngüsel bir grafik sergilemektedirler. Ardından kırılan unsurların sıkışmasıyla yoğunlaşma safhası başlamaktadır. Yoğunlaşma sürecinde kafes yapı, içi dolu bir katı hacim gibi davranmaya başlayarak gerilmenin yükselmesine neden olmaktadır.

Şekil 6.7a-c'de gösterilen gerilme-gerinim grafiklerinden elde edilen nihai mekanik özelliklere ilişkin veriler, kafes yapıların maksimum gerilme - maksimum deformasyon değerlerinin karşılaştırılabilmesi ve daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6.7d'de görsel olarak ifade edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, merkezi, oktet ve SS-3 kafes yapılarının diğer modellere kıyasla yüksek maksimum dayanım değerlerine (sırasıyla 24,16, 22,29 ve 14,02 MPa) ulaştığı görülmüştür. Gerinme baskın olarak tanımlanan bu yapılar yüksek rijitliğe sahiptir. Bu tür yapılar, uygulanan yükler karşısında minimal deformasyon gösterme eğilimindedirler. En düşük maksimum gerinim değeri (0,55 mm/mm) uzamanın baskın olduğu SS-3 yapısında elde edilmiştir. En yüksek gerinim değeri ise (0,71 mm/mm) SS-1 kafes yapısında görülmektedir. Eğilme baskın özellikleri ile karakterize edilen diyagonal ve SS-1 yapıları, nispeten düşük maksimum gerilme değerlerine sahipken, iyileştirilmiş gerinim özellikleri göstermektedirler. Bu yapılar dış kuvvetlere karşı koymak için yeterli çubuk elemana sahip olmadıkları için rijit değillerdir. Sonuç olarak, diyagonal yapı (yetersiz rijitlik – eğilme baskın) en düşük dayanımı gösterirken, bu durum, söz konusu yapının süneklik ve tokluk değerlerinde meydana gelen artışla telafi edilir.


(a)
Merkezi
Oktet
Diyagonal
Basma gerilmesi (MPa)
25
20
15
10
5
0
Plato gerilimi
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
Gerinim (mm/mm)


(b)
SS-1
SS-2
SS-3
Basma gerilmesi (MPa)
14
12
10
8
6
4
2
0
Maksimum basma dayanımı
Plastisite başlangıcı
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
Gerinim (mm/mm)

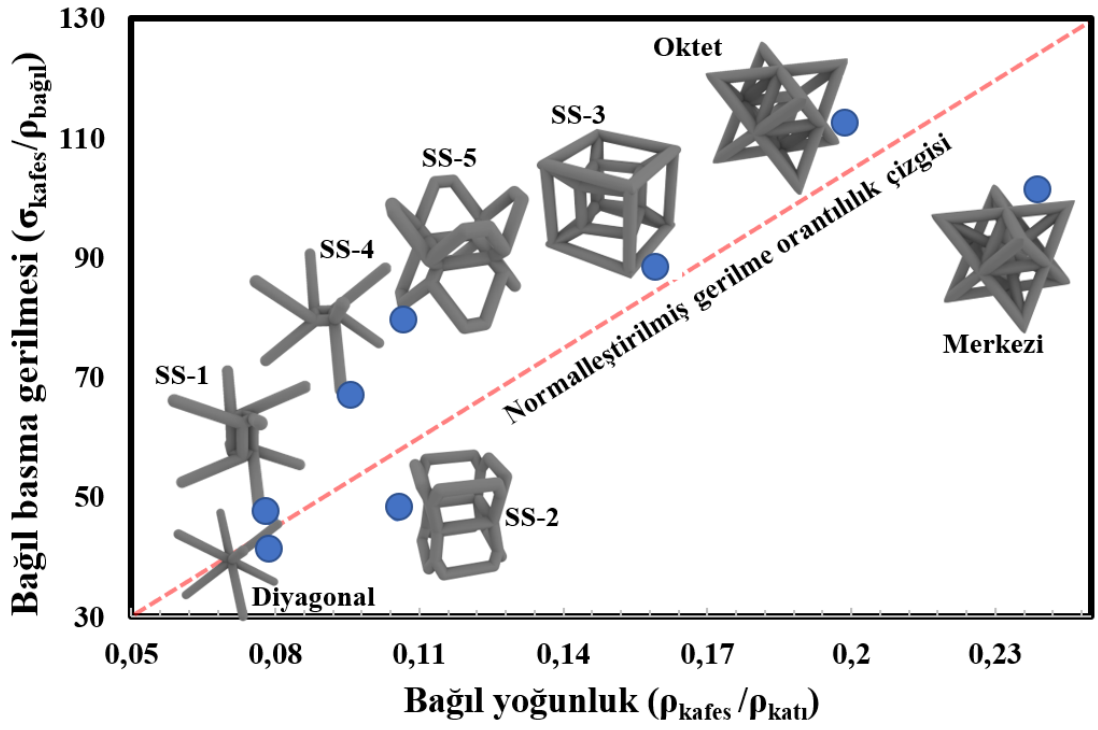


Şekil 6.7. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg kafes yapıları için basma testiyle elde edilen gerilme-gerinim grafiği

Şekil 6.8, bağıl yoğunluğa ($\rho_{bağıl}$) bağlı olarak hem geleneksel hem de yapay zeka destekli yöntemlerle geliştirilen kafes yapılarının bağıl mekanik performanslarını ($\sigma_{kafes}/\rho_{bağıl}$) göstermektedir. Grafiğin önemli bir özelliği, onu ikiye bölen normalleştirilmiş gerilme orantılılık çizgisidir. Bu çizgi, ideal koşullar altında tipik bir kafes yapısı için beklenen gerilme - yoğunluk ilişkisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere geleneksel kafes yapıları çoğunlukla orantılılık çizgisinin altında yer alırken, yapay zeka destekli modeller büyük ölçüde orantılılık çizgisinin üstündedir. Bu durum kafes yapı tasarımında derin

öğrenme temelli GAN algoritması kullanılarak gelişmiş mekanik performansa sahip kafes yapıların elde edilebileceğini kanıtlamaktadır.

Geleneksel kafes yapılarına bakıldığında, oktet model orantılılık eğrisinin hafifçe üzerinde konumlanırken, diyagonal model ise medyanın bir miktar altında yer almaktadır. Merkezi model ise düşük bağıl mekanik performans sergilemektedir. Diğer yandan, yapay zeka tabanlı modeller arasında SS-3'ün en iyi bağıl dayanım performansına sahip olduğu görülürken, en düşük mekanik performansa sahip yapay zeka temelli kafes yapısının ise SS-2 (orantılılık eğrisinin altında yer alan tek yapay zeka tabanlı model) olduğu tespit edilmiştir. Yapay zeka ile geliştirilen kafes yapılar, sadece belirli bir yoğunlukta daha yüksek bağıl basma dayanımı sergilemekle kalmayıp, aynı zamanda farklı yoğunluk seviyelerinde daha istikrarlı bir performans da göstermektedir. Bu eğilim, basma testlerinde üst düzey mekanik performans için kafes yapılarının optimizasyonunda makine öğrenimi algoritmalarının etkinliğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yapay zeka tabanlı modellerin tasarım parametrelerinin karmaşıklığını daha etkin bir şekilde ele almayı başardığını ve bu parametreleri SLM ile üretim koşulları altında daha verimli yapılar haline getirebildiğini göstermektedir.



Şekil 6.8. Kafes tasarımları için maksimum bağıl gerilme ve bağıl yoğunluk haritası

6.3.3. Darbe testi

Kafes yapılar, düşük ağırlık - yüksek darbe emme potansiyelleri ile tanınmaktadır. Kafes numunelerin ani kuvvetlere karşı tepkilerini anlamak için Charpy darbe testi uygulanmıştır. Bu testte, test numunelerinin maksimum darbe mukavemeti, potansiyel enerjisi 50 J ve darbe hızı 3,41 m/s olan bir sarkaç kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm örnekler için üç darbe testi yapılmıştır ve testlerden elde edilen asıl ve normalize edilmiş enerji emme değerleri Çizelge 6.6'da gösterilmektedir. Kafes yapıların darbe emme yetenekleri birim hücredeki unsur sayısı ve unsur konumlandırmalarına göre değişmektedir. Emilen enerjiler karşılaştırıldığında, beklenildiği gibi, daha yüksek bağıl yoğunluğa sahip oktet ve merkezi numunelerin diğerlerine göre daha yüksek enerji sönümlediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, darbe testi sonuçlarının kafes yapının doluluk oranından bağımsız olarak karşılaştırılabilmesi için asıl darbe test sonuçları bağıl yoğunluğa bölünerek normalize edilmiş enerji emme değerleri elde edilmiştir. Diyagonal ve SS-1, en düşük bağıl yoğunluğa sahip kafes yapıları olmalarına rağmen, çubuk eleman unsurları darbe yönüne eksenel olarak konumlandığı için yüksek enerji emme yeteneklerine sahiptirler. Birim hücreler arasındaki düğüm noktalarında meydana gelen yüksek kayma gerilmeleri nedeniyle SS-2 ve SS-3 modelleri ise en düşük darbe emme yeteneğine sahiptir.

Yoğunluğun yanı sıra, numunenin darbe emme yeteneği, doğrudan veya dolaylı olarak tokluk ve parça geometrisi ile ilişkilidir. Numunenin kırılmadan önce ne kadar enerji emebileceğinin ölçüsü olan tokluk değerleri dikkate alındığında, merkezi, oktet ve SS-5 kafes yapıların tokluk değerlerinin darbe testi ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak tokluk değeri ile darbe testi arasındaki korelasyon SS-3 modelinde görülmemektedir (Şekil 6.7). Bu durum, ilgili modelin yapısal özelliğinin (örneğin, kafes geometrisi veya birleşme noktalarındaki gerilme dağılımı gibi) bir sonucu olarak ortaya çıkmış olabilir. Ayrıca SS-3 modelinin tasarımındaki spesifik özellikler, tokluk ölçümünde ve darbe testindeki enerji emme yeteneğinde bir uyumsuzluk yaratabilir. Örneğin, modelin belirli bir tasarım özelliği (düğüm noktaları, çubuk eleman oryantasyonları vb.), enerjiyi emme şeklini ve dolayısıyla tokluk değerini etkileyebilir. Ancak bu özellik, darbe testindeki performansı doğrudan etkilemeyebilir.

Çizelge 6.6. Kafes yapıların Charpy darbe testi sonuçları

Kafes yapısı	Bağıl yoğunluk	β[°]	Emilen Enerji [J]	[kJ/m^2]	Normalleştirilmiş enerji emilimi [kJ/m^2]
Oktet	0,198	81.9	28	179,13	904,7
Merkezi	0,238	83.0	27	175,96	739,33
Diyagonal	0,078	116.7	12	78,67	1008,59
SS-1	0,078	112.5	14	90,53	1160,64
SS-2	0,105	126.6	8	53,66	511,05
SS-3	0,158	122.3	10	64,2	406,33
SS-4	0,095	113.9	13	86,19	907,26
SS-5	0,107	117.4	12	76,81	717,85

Kafes yapıların enerji emme kapasitesini gözeneklilik değerinden bağımsız olarak kıyaslayabilmek amacıyla, metrekare başına enerji sönümleme yeteneğini ifade eden normalize edilmiş enerji emme değeri göz önüne alınabilir (Çizelge 6.6). Bu ilave veriler, enerji absorpsiyonu gerektiren uygulamalar bağlamında her kafes konfigürasyonunun etkinliğini derinlemesine incelemek ve tartışmak için kritik öneme sahiptir. Çizelgede belirtildiği üzere, birim bağıl yoğunluk başına 1160,64 kJ/m² normalize edilmiş enerji emilimi değeri ile, SS-1 numunesi enerji emiliminde maksimum verimliliğe sahiptir. SS-1 numunesinin bu yüksek normalize enerji emilimi değeri, Şekil 6.8'de belirtildiği gibi, onun geometrik tasarımından kaynaklanan üstün deformasyon kapasitesine atfedilebilir. Diğer taraftan, nispeten yüksek bağıl yoğunluğuna rağmen, SS-3 kafes yapısı, birim bağıl yoğunluk başına 406,33 kJ/m² normalize edilmiş enerji emilimi değeri ile en düşük enerji emme verimliliğine sahiptir. Bu düşük verimlilik, kafes geometrisi ile ilgili çeşitli faktörlere bağlanabilir. İlk olarak, yapının tasarımı gerilme yığılmalarına neden olan unsurlar içerebilir. İkinci olarak, SS-3 kafes yapısının çubuk eleman konfigürasyonu ve hizalanması, optimum yük dağılımını sağlamıyor olabilir. Bu, belirli çubuk elemanların aşırı gerilmesine ve erken kırılmasına neden olmaktadır.

Sonuç olarak, GAN algoritmasının yüksek normalize enerji absorpsiyonuna sahip düşük yoğunluklu kafes tasarımları (SS-1 ve SS-4 gibi) oluşturma konusunda başarılı olduğu görünmektedir. Derin öğrenme temelli kafes yapıları azaltılmış ağırlıklarına rağmen standart kafes yapılarına benzer bir enerji emme aralığı sunmaktadır. Bu, derin öğrenme temelli kafes yapı modellerinin farklı uygulamalar için standart kafesler kadar güvenli olduğunu göstermektedir.

6.3.3. Elastik modülün belirlenmesi ve karşılaştırılması

Elastik modül, yapısal uygulamalarda önem arz eden malzemenin belirli bir yük altında uğrayacağı deformasyonun (gerinim) bir ölçüsüdür. Kafes yapılarda birim hücre tasarımı yapının elastik modülü üzerinde büyük etkiye sahiptir. Kafes yapıların elastik modülünün belirlenmesinde Hooke kanunu ve Gibson-Ashby teorisi gibi farklı bakış açıları mevcuttur. Hooke kanunu genellikle katı, uniform malzemeler için kullanılırken, Gibson-Ashby teorisi köpükler ve kafesler gibi karmaşık hücresel yapılar için geliştirilmiştir. Her iki yöntemin de uygulanması, genel teori ile yapıya özgü özelliklerin birleştirilmesi yoluyla malzemenin davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır [283].

Hooke elastik modülü, kafes numunelerin lineer elastik bölgesinde yer alan yük-deformasyon eğrilerinden türetilmiştir (Eş. 6.5). Belirgin bir akma noktasının bulunamadığı alüminyum alaşım kafes yapılarda, bu nokta gerilme-gerinim grafiğinin lineer kısmının %2 oranında kaydırılması ile belirlenmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{{}^{F}/_{A}}{{}^{\Delta l}/_{l_0}} \tag{6.5}$$

Burada F kuvvet (N), A kuvvetin uygulandığı yüzey alanıdır (mm^2), Δl (mm) numunedeki toplam deformasyon ve l_0 (mm) deforme olmamış numune uzunluğudur.

Gibson-Ashby ölçeklendirme teorisi, kafes yapıların elastik modülünü, katı yapı mekanik özelliklerinin ve kafes yapıların bağıl yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak tanımlamaktadır (Eş. 6.6). Bu teoriye göre, gözenekli yapıların mekanik özellikleri, mekanik davranış türlerine (eğilme veya gerinme baskın) bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

$$E_{kafes} = cE_{katı}\left(\frac{\rho_{hücre}}{\rho_{katı}}\right)^{n} \tag{6.6}$$

E_{kafes} ve $E_{katı}$ sırasıyla kafes yapının ve katı malzemenin elastik modülü, $\rho_{hücre}$ / $\rho_{katı}$ kafes yapısının bağıl yoğunluğu, n birim hücre mekanik davranış tipine (eğilme veya gerinme baskın) bağlı katsayı ve c birim hücre tipine bağlı katsayıdır. Bu doğrultuda Eş. 6.6'daki 'c' ve 'n' sabitlerini belirlemek için doğrusal olmayan bir regresyon yöntemi kullanılmıştır. Eş. 6.6'da yer alan bağıl elastik modül (E_{kafes} / $E_{katı}$) ve bağıl yoğunluk ($\rho_{hücre}$ / $\rho_{katı}$) ifadeleri

sırasıyla y ve x değişkenleri ile yeniden düzenlendiğinde denklem bir güç fonksiyonu halini almaktadır (Eş. 6.7).

$$y = cx^n \tag{6.7}$$

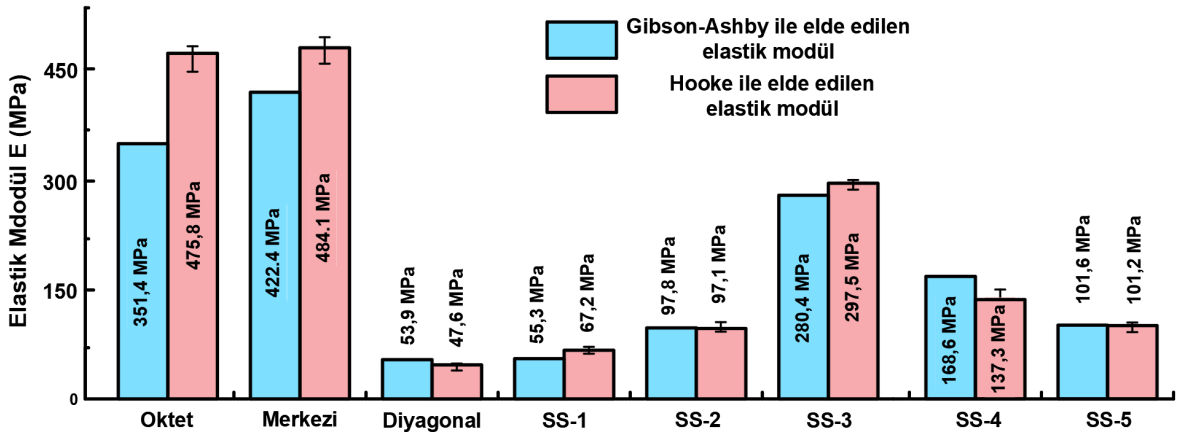
Eş. 6.7'deki c ve n değerleri daha sonra Gauss-Newton yineleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.7, kafes yapı tasarımlarına bağlı olarak hesaplanan Gibson-Ashby elastik modülünü ve ilgili sabitleri vermektedir.

Çizelge 6.7. Gibson-Ashby elastik modülünün belirlenmesinde kullanılan korelasyon katsayıları ve kafes yapılarına ait elastisite modülü

Kafes yapı	Bağıl yoğunluk	c	n	Gibson-Ashby elastik modülü
Oktet	0,198	0,025	1	351,45
Merkezi	0,238	0,025	1	422,45
Diyagonal	0,078	0,125	2	53,99
SS-1	0,079	0,125	2	55,38
SS-2	0,105	0,125	2	97,84
SS-3	0,158	0,025	1	280,45
SS-4	0,095	0,025	1	168,62
SS-5	0,107	0,125	2	101,60

Her iki yaklaşımla (Hooke ve Gibson-Ashby) elde edilen elastik modülleri Şekil 6.9'da karşılaştırılmıştır. Burada hesaplanan elastik modül değerlerinin, yapay zeka temelli kafes yapılarda oldukça yakın olduğu görülmüştür. Diğer yandan oktet (yüksek dayanım, 22,29 MPa) ve SS-1 (yüksek gerinim, 0,71 mm/mm) için hesaplanan elastik modül değerlerinde önemli bir sapma (sırasıyla %35 ve %20) gözlemlenmiştir. Bu durumun, bahsi geçen yapıların mekanik davranışlarındaki aşırılıklardan kaynaklanmaktadır. Yüksek dayanıma sahip gevrek oktet yapısı, yük altında çok az deformasyona uğrar ve ardından kırılır. Bu, ani değişimlerin Gibson-Ashby teorisi ile tahmin edilmesi zordur ve bu durum elastik modül değerlerindeki tutarsızlığı açıklamaktadır. Benzer şekilde, en yüksek gerinim değerlerine sahip SS-1 yapısı, birim yük başına çok fazla deformasyon gösterir ve bu durum, iki farklı metot ile hesaplanan elastik modül değerleri arasında sapmalar oluşmasına neden olmaktadır. Bu gözlemler, Gibson-Ashby yaklaşımının mekanik özelliklerin belirlenmesi noktasında oldukça etkili olduğunu, ancak kafes geometrine bağlı ekstrem durumları tahmin etmede yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, Gibson-Ashby modeli anlamlı

veriler sunabilse de, özellikle mekanik özelliklerinin standart varsayımlardan ayrıldığı yapılar söz konusu olduğunda dikkatli yorumlamalar gerekmektedir.



Şekil 6.9. Hooke yasası ve Gibson-Ashby denklemleri ile belirlenen elastik modülün karşılaştırılması

Merkezi yapının modülü, diyagonal yapının yaklaşık beş katıdır. Yapay zeka tabanlı kafes yapılar arasında en yüksek modül değeri SS-3 modelinde elde edilmiştir. Bu geliştirilmiş modül, malzemenin plastik (kalıcı) deformasyona uğramadan daha büyük kuvvetlere dayanmasını (yüksek rijitlik) anlamına gelmektedir. Sonuç itibariyle, oktet ve SS-3 gibi gerinme baskın modeller, eğilme baskın modellere göre daha düşük elastik uzama oranlarına sahip olsalar da daha yüksek gerilmelere direnç gösterebilmektedirler. Gelişmiş elastik modül değerine sahip olan bu modeller, yüksek mukavemet-ağırlık oranının talep edildiği uygulamalar için uygundurlar.

6.4. Sonuç

Derin öğrenme yöntemlerinin eklemeli imalata uygulanması, gelişmiş mekanik özelliklere sahip parçaların hızlı ve düşük maliyetli üretimine olanak sağlamaktadır. Bu, yüksek mukavemet-ağırlık oranları ve özelleştirilmiş işlevsellik gereksinimlerini karşılamak için çığır açan bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmada, derin öğrenme temelli üretken çekişmeli ağ (GAN) algoritması ve parametrik tasarım yöntemleri bir arada kullanılarak yüksek performanslı kafes yapıların tasarlanması ve üretimi için yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Bilinen kafes yapıları ve GAN algoritmasıyla tasarlanan karmaşık kafes yapı modelleri SLM eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Alüminyum alaşım (AlSi10Mg) kafes yapıların SLM ile üretiminde Bölüm 4'te belirlenen ve Bölüm 5'te simüle edilen optimum işlem parametreleri kullanılmıştır. Bu araştırma, GAN algoritması ve

parametrik tasarım yöntemlerinin kullanılmasıyla elde edilen özelleştirilmiş kafes yapı tasarımlarının metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilme sürecini ayrıntılı bir şekilde ele alarak, malzeme bilimi ve mühendislik alanına önemli bir katkıda bulunmaktadır.

Bu bölümde, Bölüm 3'te ön çalışması yapılan geleneksel kafes yapıları ile derin öğrenme temelli GAN algoritmasıyla elde edilen kafes yapı tasarımları AlSi10Mg alüminyum alaşım tozu kullanılarak SLM yöntemiyle üretilmiştir. Daha sonra deney numuneleri bir dizi kalite kontrol süreçlerine ve mekanik testlere tabi tutulmuştur. Sonuçlar, GAN ile üretilen yapıların üstün mekanik performans sergilediğini göstermiştir. Bu, parametrik tasarım aşamasında gerçekleştirilen yapısal analiz ile yüksek mukavemetli parçalara odaklanılmış olmasının sonucudur. GAN eğitim veri setinin yalnızca ağırlığa göre yüksek performanslı kafes yapıları içermesi sağlanmış ve bu da gelişmiş mukavemet özellikleri sergileyen kafeslerin üretilmesiyle sonuçlanmıştır. Ayrıca, GAN ve parametrik tasarımın kombinasyonu, kafes yapılar için minimum tasarımcı müdahalesi gerektiren dayanıklılık, rijitlik ve ağırlık gibi belirli performans kriterlerinin karşılanmasını ve optimizasyonunu kolaylaştırmıştır.

Bu çalışmada, derin öğrenmenin eklemeli imalat ile üretilen 3B kafes yapılarının mekanik özelliklerine katkısını ayrıntılı olarak incelemek üzere kapsamlı bir tasarım, üretim, kalite kontrol ve test süreci sunulmuştur. Standart ve GAN ile oluşturulan sekiz farklı hücresel yapı, SLM Eİ tekniği kullanılarak üretilmiştir. Mekanik performansları, basma ve Charpy darbe testleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel olarak doğrulanan sonuçlar, hücre konfigürasyonunun kafes yapıların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ve çeşitli mekanik davranışa sahip hücrelerin veya kombinasyonlarının, çok amaçlı uygulamalar ve yükleme senaryoları için kullanılabileceğini göstermiştir.

Çalışma, GAN modelinin mekanik performansı geliştirilmiş kafes yapılar oluşturmak için etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir. GAN modeli ile oluşturulan kafes yapılar, yüksek dayanım ve uzamanın özelliklerinin yanı sıra artırılmış şok emme kabiliyetine sahiptirler. Ayrıca, tüm kafes yapı tasarımları için, malzeme tüketimi ve üretim maliyeti katı modellere kıyasla önemli ölçüde azaltmıştır. Böylece kafes yapıların eklemeli imalatı, geleneksel tekniklere kıyasla daha verimli ve düşük maliyetli bir yöntem haline gelmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tezi, kafes yapılarının tasarımı ve üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımı üzerine metodolojik bir yaklaşım sunmuştur. Araştırma genel olarak, kafes yapıların mekanik performansını iyileştirmek için tasarım ve imalat parametrelerinin optimize edilmesini hedeflemiştir. Sonuçlar, kafes yapıların eklemeli imalat süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına, kafes yapı performansının artırılmasına ve makine öğrenmesi ile yenilikçi tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Kafes yapıların eklemeli imalat sürecindeki önemli faktörleri ele alan altı ayrı bölümden oluşan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Tezin ilk bölümünde incelenen konunun önemini, araştırma amaçları ve hedefleri, çalışmanın özgün yönleri ve genel araştırma planı detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Bölüm 2 - Eklemeli imalat ve kafes yapıların temelleri:

Bu bölümde, eklemeli imalatın genel ilkeleri, tasarım stratejileri, hücresel kafes yapıları ve lazer malzeme etkileşim mekanizması gibi eklemeli imalat ve kafes yapıların temelleri incelemiştir. Bölümün başlıca sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Eklemeli imalat teknolojileri, tarihinden bugüne kadar önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bu teknolojilerin, çeşitli sektörlerde geniş çaplı kabul görmesinin ardındaki itici güç, sürekli geliştirilen yöntemler ve uygulama alanlarının genişlemesi olmuştur.
- Eklemeli imalat, talaşlı imalattan farklı bir dizi avantaj sunmaktadır. Ancak, bu teknolojilerin en verimli şekilde kullanılabilmesi için belirli tasarım prensiplerine uyulması gerekmektedir.
- Hücresel kafes yapılar, eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğünün ve malzeme verimliliğinin mükemmel bir örneğidir. Bu yapıların çeşitli sınıflandırmaları ve teorileri, geniş bir uygulama yelpazesi için adapte edilebileceklerini göstermektedir.
- Lazer malzeme etkileşim mekanizması, eklemeli imalat teknolojilerinin başarısında önemli bir role sahiptir. Lazer ışını kalitesi, elektromanyetik radyasyonun malzemeyle etkileşimi ve malzeme yansıma ve absorpsiyon mekanizmaları, bu teknolojilerin daha fazla geliştirilmesi ve optimize edilmesi için kritik unsurlardır.

Bölüm 3 - Kafes yapı tasarım parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi:

Bu bölüm, kafes yapıların tasarım detaylarına ve uygulama yöntemlerine odaklanmıştır. Ayrıca polimer temelli Polyjet Eİ teknolojisi kullanılarak kafes yapı tasarım parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Dikkate alınan başlıca bulgular aşağıdaki gibidir:

- Nispeten daha esnek çalışma prensibi sunan ve proses parametre optimizasyonu gerektirmeyen fotopolimer esaslı MutiJet baskı yöntemleriyle polimerik kafes yapılar hızlı ve etkin bir biçimde üretilebilmektedir.
- Üç farklı hücresel tasarımın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için 3B basma test numuneleri, Polyjet Eİ teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Bu tasarımlar aşırı rijit, rijit ve rijit olmayan mekanik davranışları temsil etmiştir.
- Maksimum gerilme, maksimum gerinme ve elastik modülün, birim hücre boyutları küçültülerek artırıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, gerilme dayanımından bir miktar taviz verilerek süneklikte artış sağlanmıştır.
- Hücresel yapıların eklemeli imalatıyla, üretim maliyeti katı modele göre %30, ağırlık ise %72 oranında azaltılmıştır.
- Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların boyutsal doğruluğu, hücre tipine ve özellikle unsur boyutuna bağlı olarak %0,1 ile %8 arasında değişmiştir.
- Dairesel çubuk elemanların doğruluğu, altıgen elemanlardan daha fazladır. Ayrıca, açılı çubuk elemanlar, dik olanlara kıyasla %10'a kadar daha fazla sapma göstermiştir.

Bölüm 4 - Kafes yapı çubuk elemanları tasarım ve SLM imalat parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi:

Bu bölüm, seçici lazer eritme (Selective Laser Melting - SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg çubuk elemanların karakteristiklerinin ve işlem parametrelerinin belirlenmesine odaklanmaktadır. Bu kapsamda, lazer enerji yoğunluğunun çubuk elemanların üretim performansı, boyutsal doğruluk, mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırma sonuçları aşağıdaki maddeler halinde özetlenmiştir:

- Genel olarak lazer enerji yoğunluğunun artması, çubuk elemanların üretilebilirliğini artırmaktadır.

- Lazer enerji yoğunluğunun artması, çubuk elemanların boyutsal doğruluğunu etkilemektedir.
- Tek yollu kontur taramanın araştırılması, küçük çaplı (Ø 0,2 mm'ye kadar) çubuk elemanların üretim sürecinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.
- AlSi10Mg çubuk elemanların mikroyapıları, işlem parametrelerine ve baskı yönüne bağlı olarak farklılık göstermektedir.
- SLM ile üretilen AlSi10Mg çubuk elemanlar, geleneksel yöntemlerle üretilen benzer yapılara kıyasla daha yüksek mikrosertlik değerlerine sahiptir.
- Optimum mikroyapı, 48 ile 79 J/mm3 lazer enerji yoğunluğu ile üretilen dik açılı çubuk elemanda elde edilmiştir.

Bölüm 5 - Kafes yapı çubuk elemanlarının SLM imalat prosesinin nümerik modellenmesi:

Bu tez bölümü, SLM sürecinin sayısal simülasyonunu ve bu süreçte enerji ve kütle denklemlerinin çözümünü, ayrıca süreç parametrelerinin ve AlSi10Mg alaşımının termofiziksel özelliklerinin SLM sürecinin başarısı ve üretilen parçaların kalitesi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Bölümde elde edilen sonuç ve bulgular şu şekilde sıralanabilir:

- Sayısal analizler, SLM sürecinin kontrolü ve optimizasyonu konusunda büyük kolaylık sağlamaktadır ve deneysel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve düşük maliyetli sonuçlar vermektedir.
- SLM işlem parametreleri, özellikle hacimsel enerji yoğunluğu ve lazer güç yoğunluğu, termal dağılım üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.
- Eriyik havuz boyunca sıcaklık gradyanının değişimi, lazer gücü ve tarama hızı gibi işlem parametrelerine bağlıdır.
- Optimum eriyik havuz boyutlarını (140-160 μm genişlik ve 70-75 μm derinlik) elde etmek için gereken spesifik hacimsel enerji yoğunluğu 71 J/mm^3 olarak belirlenmiştir.

Bölüm 6 - Optimum SLM tasarım ve imalat parametreleriyle yapay zeka tabanlı kafes yapı tasarımı ve mekanik performansının değerlendirilmesi:

Bu tez bölümünde, derin öğrenme tabanlı üretken çekişmeli ağ (GAN) algoritması ve parametrik tasarım yöntemlerinin birleştirilmesiyle yüksek performanslı kafes yapılarının tasarım ve üretim süreçleri incelenmiştir. AlSi10Mg alüminyum alaşım tozu kullanılarak

SLM yöntemiyle üretilen kafes yapılarının kalite kontrol süreçleri ve mekanik testler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Derin öğrenme ve parametrik tasarım yöntemlerinin birleşimi, yüksek mekanik özelliklere sahip kafes yapıların tasarım ve üretimine olanak sağlamıştır.
- Kafes yapıların üretiminde eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılması, malzeme tüketimi ve üretim maliyetini önemli ölçüde azaltmış, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha verimli ve düşük maliyetli bir alternatif sunmuştur.
- Geleneksel kafes yapıları ile GAN algoritmasıyla tasarlanan kafes yapıları arasında karşılaştırma yapılmış, GAN ile üretilen yapıların üstün mekanik performans sergilediği gözlemlenmiştir.
- Çubuk eleman çaplarının, BDT modeline nazaran %3,75 ila %6,25 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, lazer ile eritme esnasında, lazer işlem parametreleri ile çubuk eleman oryantasyonuna bağlı olarak değişen miktarda komşu toz parçacığının çubuk eleman yapısına zayıf metalürjik bir bağ ile bağlanması nedeniyle oluşmaktadır.
- GAN derin öğrenme modeli kullanılarak üretilen kafes yapıların standart kafes yapılarına kıyasla gerilme ve gerinim değerlerinin sırasıyla %110 ve %27'ye kadar geliştirilebileceği saptanmıştır.
- Geleneksel kafes yapıları arasında, oktet modeli orantılılık eğrisinin hafifçe üzerinde konumlanırken, diyagonal model ise medyanın bir miktar altında yer almaktadır. Merkezi model ise düşük bağıl mekanik performans sergilemektedir.
- Yapay zeka tabanlı modeller arasında, SS-3 modeli en iyi bağıl dayanım performansına sahipken, en düşük mekanik performansa sahip modelin SS-2 olduğu görülmüştür. SS-2, aynı zamanda orantılılık eğrisinin altında yer alan tek yapay zeka tabanlı modeldir.
- Yapay zeka ile geliştirilen kafes yapılar, belirli bir yoğunlukta daha yüksek bağıl basma dayanımı sergilemekle kalmayıp, aynı zamanda farklı yoğunluk seviyelerinde daha istikrarlı bir performans da göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. International Standard. (2012). *Standard terminology for additive manufacturing technologies*, in ASTM International F2792-12a, 1-9.

2. Parandoush, P., and Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36-53.

3. Lyons, B. (2014). Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook. *The Bridge*, 44(3).

4. Vilaro, T., Abed, S., and Knapp, W. (2008). *Direct manufacturing of technical parts using selective laser melting: example of automotive application*. Proc. of 12th European Forum on Rapid Prototyping, 2.

5. Melchels, F. P., Domingos, M. A., Klein, T. J., Malda, J., Bartolo, P. J., and Hutmacher, D. W. (2012). Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, 37(8), 1079-1104.

6. Rengier, F., Mehndiratta, A., Von Tengg-Kobligk, H., Zechmann, C. M., Unterhinninghofen, R., Kauczor, H. U., and Giesel, F. L. (2010). 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5, 335-341.

7. Kolarevic, B. (2001). Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age. *Proceedings of the twenty first annual conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*, 268-278.

8. Schelly, C., Anzalone, G., Wijnen, B., and Pearce, J. M. (2015). Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom. *Journal of Visual Languages & Computing*, 28, 226-237.

9. Gürcüm, B., Börklü, H., Sezer, K., and Eren, O. (2018). Implementing 3D printed structures as the newest textile form. *J Fashion Technol Textile Eng*. S4: 019.

10. Gibson, L. (1989). Modelling the mechanical behavior of cellular materials. *Materials Science and Engineering: A*, 110, 1-36.

11. Kaufmann, M., Zenkert, D., and Wennhage, P. (2010). Integrated cost/weight optimization of aircraft structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41, 325-334.

12. Stephani, G., Andersen, O., Quadbeck, P., and Kieback, B. (2010). *Cellular metals for functional applications-An overview*. Proc. World Powder Metall. Congr. Exhib. World PM, 2010(4), 95.

13. Lee, Y.-H., Lee, B.-K., Jeon, I., and Kang, K.-J. (2007). Wire-woven bulk Kagome truss cores. *Acta Materialia*, 55(18), 6084-6094.

14. Gibson, L. J. (2003). Cellular solids. *Mrs Bulletin*, 28(4), 270-274.

15. Ashby, M. F., and Gibson, L. J. (1997). Cellular solids: structure and properties. *Press Syndicate of the University of Cambridge,* UK, 175-231.

16. Liu, F., Zhang, D. Z., Zhang, P., Zhao, M., and Jafar, S. (2018). Mechanical properties of optimized diamond lattice structure for bone scaffolds fabricated via selective laser melting. *Materials*, 11(3), 374.

17. Roque, R., Barbosa, G. F., and Guastaldi, A. C. (2021). Design and 3D bioprinting of interconnected porous scaffolds for bone regeneration. An additive manufacturing approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 655-663.

18. İnternet: Group, S. S. Case Study Monolithic Thrust Chamber. URL: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Case_Studies/CaseStudy_CellCore_ThrustChamber_web.pdf, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

19. Wadley, H. N. (2002). Cellular metals manufacturing. *Advanced engineering materials*, 4(10), 726-733.

20. Salmi, A., Atzeni, E., Iuliano, L., and Galati, M. (2017). Experimental analysis of residual stresses on AlSi10Mg parts produced by means of selective laser melting (SLM). *Procedia Cirp*, 62, 458-463.

21. Nagesha, B., Dhinakaran, V., Shree, M. V., Kumar, K. M., Chalawadi, D., and Sathish, T. (2020). Review on characterization and impacts of the lattice structure in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 21, 916-919.

22. Tang, Y., Dong, G., Zhou, Q., and Zhao, Y. F. (2018). Lattice Structure Design and Optimization With Additive Manufacturing Constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(4), 1546-1562.

23. Wang, Y., Zhang, L., Daynes, S., Zhang, H., Feih, S., and Wang, M. Y. (2018). Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing. *Materials & Design*, 142, 114-123.

24. Seharing, A., Azman, A. H., and Abdullah, S. (2020). A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6), 1687814020916951.

25. Kumar, A., Collini, L., Daurel, A., and Jeng, J.-Y. (2020). Design and additive manufacturing of closed cells from supportless lattice structure. *Additive Manufacturing*, 33, 101168.

26. Wan, H. Y., Zhou, Z. J., Li, C. P., Chen, G. F., and Zhang, G. P. (2019). Effect of scanning strategy on mechanical properties of selective laser melted Inconel 718. *Materials Science and Engineering: A*, 753, 42-48.

27. Abd-Elaziem, W., Elkatatny, S., Abd-Elaziem, A.-E., Khedr, M., Abd El-baky, M. A., Hassan, M. A., Abu-Okail, M., Mohammed, M., Järvenpää, A., Allam, T., and Hamada, A. (2022). On the current research progress of metallic materials fabricated by laser powder bed fusion process: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 681-707.

28. Mazur, M., Leary, M., Sun, S., Vcelka, M., Shidid, D., and Brandt, M. (2016). Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5), 1391-1411.

29. Płatek, P., Sienkiewicz, J., Janiszewski, J., and Jiang, F. (2020). Investigations on mechanical properties of lattice structures with different values of relative density made from 316L by selective laser melting (SLM). *Materials*, 13(9), 2204.

30. Zhong, T., He, K., Li, H., and Yang, L. (2019). Mechanical properties of lightweight 316L stainless steel lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 181, 108076.

31. Mäkikangas, J., Rautio, T., Mustakangas, A., and Mäntyjärvi, K. (2019). Laser welding of AlSi10Mg aluminium-based alloy produced by selective laser melting (SLM). *Procedia Manufacturing*, 36, 88-94.

32. Leary, M., Mazur, M., Elambasseril, J., McMillan, M., Chirent, T., Sun, Y., Qian, M., Easton, M., and Brandt, M. (2016). Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials & Design*, 98, 344-357.

33. Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., and Ponnusamy, P. (2018). Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Materials & Design*, 144, 32-44.

34. Sienkiewicz, J., Płatek, P., Jiang, F., Sun, X., and Rusinek, A. (2020). Investigations on the mechanical response of gradient lattice structures manufactured via SLM. *Metals*, 10(2), 213.

35. Liu, Y. J., Li, S. J., Wang, H. L., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., Sercombe, T. B., and Zhang, L. C. (2016). Microstructure, defects and mechanical behavior of beta-type titanium porous structures manufactured by electron beam melting and selective laser melting. *Acta Materialia*, 113, 56-67.

36. Dallago, M., Zanini, F., Carmignato, S., Pasini, D., and Benedetti, M. (2018). Effect of the geometrical defectiveness on the mechanical properties of SLM biomedical Ti6Al4V lattices. *Procedia Structural Integrity*, 13, 161-167.

37. Diegel, O., Nordin, A., and Motte, D. (2019), *A practical guide to design for additive manufacturing*. Springer.

38. Bourell, D. L. (2016). Perspectives on additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46.

39. Wohlers, T., and Gornet, T. (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24(2014), 118.

40. Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of scientific instruments*, 52(11), 1770-1773.

41. Hull, C. W. (1984). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, United States Patent, Appl., No. 638905.

42. Lipson, H., and Kurman, M. (2013), *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.

43. Bikas, H., Stavropoulos, P., and Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389-405.

44. Gibson, I. (2015). *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.

45. Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., and Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 753.

46. Thomas, D. S., and Gilbert, S. W. (2014). Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. *NIST special publication*, 1176, 12.

47. Baumers, M., and Holweg, M. (2019). On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. *Journal of Operations Management*, 65(8), 794-809.

48. Ding, J., Baumers, M., Clark, E. A., and Wildman, R. D. (2021). The economics of additive manufacturing: Towards a general cost model including process failure. *International Journal of Production Economics*, 237, 108087.

49. Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M., and Akil, H. (2019). Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polymer Reviews*, 59(4), 589-624.

50. İnternet: Printspace3d. Stereolithography. URL: https://www.printspace3d.com/wp-content/uploads/2014/03/Stereolithography_illustration1.jpg, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

51. Eren, O., Sezer, H. K., and Yalçın, N. (2022). Effect of lattice design on mechanical response of PolyJet additively manufactured cellular structures. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 1175-1188.

52. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23, 1917-1928.

53. Popovich, A., and Sufiiarov, V. (2016), *Metal powder additive manufacturing*. IntechOpen.

54. Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting-a review. *International Materials Reviews*, 61(5), 361-377.

55. Arnold, C., Pobel, C., Osmanlic, F., and Körner, C. (2018). Layerwise monitoring of electron beam melting via backscatter electron detection. *Rapid Prototyping Journal*, 24(8), 1401-1406.

56. Ahn, D.-G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 703-742.

57. Sing, S., Tey, C., Tan, J., Huang, S., and Yeong, W. Y. (2020), *3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing*. Elsevier. 17-40.

58. İnternet: Renishaw. Data sheet: AlSi10Mg-0403 (400 W) powder for additive manufacturing. URL: https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/data-sheet-alsi10mg-0403-400-w-powder-for-additive-manufacturing--73122, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

59. İnternet: EOS. Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet. URL: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

60. Jiao, L., Chua, Z. Y., Moon, S. K., Song, J., Bi, G., and Zheng, H. (2018). Femtosecond laser produced hydrophobic hierarchical structures on additive manufacturing parts. *Nanomaterials*, 8(8), 601.

61. Hamidi Nasab, M., Giussani, A., Gastaldi, D., Tirelli, V., and Vedani, M. (2019). Effect of surface and subsurface defects on fatigue behavior of AlSi10Mg alloy processed by laser powder bed fusion (L-PBF). *Metals*, 9(10), 1063.

62. Delroisse, P., Jacques, P. J., Maire, E., Rigo, O., and Simar, A. (2017). Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting. *Scripta Materialia*, 141, 32-35.

63. Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., and 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.

64. Feng, Z., Tan, H., Fang, Y., Lin, X., and Huang, W. (2022). Selective laser melting of TiB2/AlSi10Mg composite: Processability, microstructure and fracture behavior. *Journal of Materials Processing Technology*, 299, 117386.

65. Pelevin, I. A., Nalivaiko, A. Y., Ozherelkov, D. Y., Shinkaryov, A. S., Chernyshikhin, S. V., Arnautov, A. N., Zmanovsky, S. V., and Gromov, A. A. (2021). Selective laser melting of Al-based matrix composites with Al2O3 reinforcement: Features and advantages. *Materials*, 14(10), 2648.

66. Ahuja, B., Karg, M., and Schmidt, M. (2015). Additive manufacturing in production: challenges and opportunities. *Laser 3D Manufacturing II*, 9353, 11-20.

67. Wang, Y., Blache, R., and Xu, X. (2017). Selection of additive manufacturing processes. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 434-447.

68. Börklü, H. R., Yıldırım K., ve Sezer, H. K. (2016). Hızlı prototip oluşturmada karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 4(4), 309-319.

69. Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., and Dolen, M. (2021). Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 623-648.

70. İnternet: Research, P. Metal Additive Manufacturing Market. 2022 URL: https://www.precedenceresearch.com/metal-additive-manufacturing-market, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

71. İnternet: Grandviewresearch. Additive Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report. 12.04]. URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

72. Kleer, R., and Piller, F. T. (2019). Local manufacturing and structural shifts in competition: Market dynamics of additive manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 216, 23-34.

73. Vaneker, T., Bernard, A., Moroni, G., Gibson, I., and Zhang, Y. (2020). Design for additive manufacturing: Framework and methodology. *CIRP Annals*, 69(2), 578-599.

74. Rosso, S., Uriati, F., Grigolato, L., Meneghello, R., Concheri, G., and Savio, G. (2021). An optimization workflow in design for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 11(6), 2572.

75. Ribeiro, T. P., Bernardo, L. F., and Andrade, J. M. (2021). Topology optimisation in structural steel design for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 11(5), 2112.

76. Wang, H., Du, W., Zhao, Y., Wang, Y., Hao, R., and Yang, M. (2021). Joints for treelike column structures based on generative design and additive manufacturing. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106794.

77. İnternet: Varotsis, A., B. . How to design parts for CNC machining. 3D Hubs Design Guidelines URL: https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-cnc-machining/#intro, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

78. Leary, M. (2019), *Design for additive manufacturing*. Elsevier.

79. Maamoun, A. H., Xue, Y. F., Elbestawi, M. A., and Veldhuis, S. C. (2018). Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy. *Materials*, 11(12), 2343.

80. Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P., and Salmi, A. (2010). Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), 308-317.

81. Asnafi, N., Rajalampi, J., Aspenberg, D., and Alveflo, A. (2020). Production tools made by additive manufacturing through laser-based powder bed fusion. *Berg-und Huttenmännische Monatshefte (BHM)*, 165(3)), 125-136.

82. Liu, Y., Yang, Y., and Wang, D. (2016). A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 647-656.

83. Voicu, A. D., Hadăr, A., and Vlăsceanu, D. (2021). Benefits of 3D printing technologies for aerospace lattice structures. *Scientific Bulletin "Mircea cel Batran" Naval Academy*, 24(1), 8-16.

84. Chu, C., Graf, G., and Rosen, D. W. (2008). Design for additive manufacturing of cellular structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 5(5), 686-696.

85. Jin, X., Li, G. X., and Zhang, M. (2018). Optimal design of three-dimensional non-uniform nylon lattice structures for selective laser sintering manufacturing. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(7), 1687814018790833.

86. McGregor, D. J., Tawfick, S., and King, W. P. (2019). Automated metrology and geometric analysis of additively manufactured lattice structures. *Additive Manufacturing*, 28, 535-545.

87. Masood, S. H., and Alamara, K. (2010). Development of scaffold building units and assembly for tissue engineering using fused deposition modelling. *Advanced Materials Research*, 83, 269-274.

88. Wang, M. O., Piard, C. M., Melchiorri, A., Dreher, M. L., and Fisher, J. P. (2015). Evaluating changes in structure and cytotoxicity during in vitro degradation of three-dimensional printed scaffolds. *Tissue Engineering Part A*, 21(9-10), 1642-1653.

89. Yu, T., Zhao, Y., Bi, X., Song, B., and Chen, Y. (2020). Mechanical properties of porous structure 3D printed with Vero White photosensitive resin. *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), 539-548.

90. Vrána, R., Červinek, O., Maňas, P., Koutný, D., and Paloušek, D. (2018). Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting-numerical model with substitution of geometrical imperfections. *Materials*, 11(11), 2129.

91. Mu, X., Bertron, T., Dunn, C., Qiao, H., Wu, J., Zhao, Z., Saldana, C., and Qi, H. (2017). Porous polymeric materials by 3D printing of photocurable resin. *Materials Horizons*, 4(3), 442-449.

92. Brackett, D., Ashcroft, I., and Hague, R. (2011). *Topology optimization for additive manufacturing*. International Solid Freeform Fabrication Symposium.

93. Zhang, L., Song, B., Fu, J. J., Wei, S. S., Yang, L., Yan, C. Z., Li, H., Gao, L., and Shi, Y. S. (2020). Topology-optimized lattice structures with simultaneously high stiffness and light weight fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and characterization. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1166-1177.

94. Liu, C., Du, Z., Zhang, W., Zhu, Y., and Guo, X. (2017). Additive manufacturing-oriented design of graded lattice structures through explicit topology optimization. *Journal of Applied Mechanics*, 84(8).

95. Alzahrani, M., Choi, S.-K., and Rosen, D. W. (2015). Design of truss-like cellular structures using relative density mapping method. *Materials & Design*, 85, 349-360.

96. Cheng, L., Zhang, P., Biyikli, E., Bai, J., Robbins, J., and To, A. (2017). Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation. *Rapid Prototyping Journal*.

97. Li, D., Liao, W., Dai, N., Dong, G., Tang, Y., and Xie, Y. M. (2018). Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 104, 87-99.

98. Park, K.-M., Min, K.-S., and Roh, Y.-S. (2022). Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements. *Materials*, 15(1), 97.

99. Lin, Y., Yang, C., Zhang, W., Fukumoto, K., Saito, Y., Machida, H., and Norinaga, K. (2023). Estimation of effective thermal conductivity in open-cell foam with hierarchical pore structure using lattice Boltzmann method. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119314.

100. Wang, H., Chen, Y., and Rosen, D. W. (2005). *A hybrid geometric modeling method for large scale conformal cellular structures.* International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 47403, 421-427.

101. Gibson, I., and Ashby, M. F. (1982). The mechanics of three-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 382(1782), 43-59.

102. Maxwell, J. C. (1864). L. on the calculation of the equilibrium and stiffness of frames. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 27(182), 294-299.

103. Leary, M. (2020), *Design of lattice and zero-mean curvature structures*. Elsevier. 123-163.

104. Goodno, B. J., and Gere, J. M. (2020), *Mechanics of materials*. Cengage learning.

105. Wang, C. M. (1995). Timoshenko beam-bending solutions in terms of Euler-Bernoulli solutions. *Journal of Engineering Mechanics*, 121(6), 763-765.

106. Levinson, M. (1981). A new rectangular beam theory. *Journal of Sound and Vibration*, 74(1), 81-87.

107. İnternet: Bbanerje. Deformation of a timoshenko beam and coordinate system. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:TimoshenkoBeam.svg, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

108. Mahmoud, D., and Elbestawi, M. A. (2017). Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(2), 13.

109. Haken, H. (1970) *Laser theory light and matter Ic/Licht und materie Ic*. Springer.

110. Maiman, T. H. (1960). *Stimulated optical radiation in ruby*. 493-494.

111. Einstein, A. (1916). *Zur quantentheorie der strahlung*. 121-128.

112. Feymann, R., Leighton, R., and Sands, M. (1966). The Feynman lectures on physics Vol 2 Addison Wesley. *Reading Massachusets*.

113. Hill, N. R. (1990). Gaussian beam migration. *Geophysics*, 55(11), 1416-1428.

114. Sezer, H. K. (2007). *Laser drilling of thermal barrier coated jet-engine components*, Ph. D. Thesis, Manchester University Mechanical Engineering Depertmant.

115. İnternet: Cohen, R. How to Calculate your Laser Beam Power Density Using our Power Density Calculator. URL: https://blog.ophiropt.com/calculate-laser-beam-power-density-using-power-density-calculator/, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

116. Steen, W. M., and Mazumder, J. (2010), *Laser material processing*. Springer Science & Business Media.

117. Oane, M., Mahmood, M. A., and Popescu, A. C. (2021). A state-of-the-art review on integral transform technique in laser–material interaction: Fourier and non-Fourier heat equations. *Materials*, 14(16), 4733.

118. Higgins, T. V. (1994). Nonlinear optical effects are revolutionizing electro-optics. *Laser focus world*, 30(8), 67-74.

119. Tureci, H. E., and Stone, A. D. (2002). Deviation from Snell's law for beams transmitted near the critical angle: application to microcavity lasers. *Optics letters*, 27(1), 7-9.

120. Kent, N. (1903). The theory of optics by Paul Drude. *Astrophysical Journal, vol. 18, p. 75*, 18, 75.

121. Meisel, N. A., and Williams, C. B. (2014). Design for Additive Manufacturing: an investigation of key manufacturing considerations in multi-material PolyJet 3D printing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*.

122. Lucklum, F., and Vellekoop, M. J. (2015). Rapid prototyping of 3D phononic crystals using high-resolution stereolithography fabrication. *Procedia Engineering*, 120, 1095-1098.

123. Uribe-Lam, E., Treviño-Quintanilla, C. D., Cuan-Urquizo, E., and Olvera-Silva, O. (2021). Use of additive manufacturing for the fabrication of cellular and lattice materials: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(3), 257-280.

124. Liu, W., Song, H., and Huang, C. (2020). Maximizing mechanical properties and minimizing support material of PolyJet fabricated 3D lattice structures. *Additive Manufacturing*, 35, 101257.

125. Weeger, O., Boddeti, N., Yeung, S. K., Kaijima, S., and Dunn, M. L. (2019). Digital design and nonlinear simulation for additive manufacturing of soft lattice structures. *Additive Manufacturing*, 25, 39-49.

126. Chang, P. S., and Rosen, D. W. (2013). The size matching and scaling method: a synthesis method for the design of mesoscale cellular structures. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(10), 907-927.

127. Egan, P., Wang, X., Greutert, H., Shea, K., Wuertz-Kozak, K., and Ferguson, S. (2019). Mechanical and biological characterization of 3D printed lattices. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(2), 73-81.

128. Mueller, J., and Shea, K. (2018). Stepwise graded struts for maximizing energy absorption in lattices. *Extreme Mechanics Letters*, 25, 7-15.

129. Yang, X., Barrett, R. A., Tong, M., Harrison, N. M., and Leen, S. B. (2021). Towards a process-structure model for Ti-6Al-4V during additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 428-439.

130. International Standard. (2000). *ASTM D1621 Standard test method for compressive properties of rigid cellular plastics*. ASTM International.

131. Deshpande, V. S., Fleck, N. A., and Ashby, M. F. (2001). Effective properties of the octet-truss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747-1769.

132. İnternet: Stratasys. RGD720 Rigid Translucent Photosensitive Resin Data Sheet. URL: https://www.stratasys.com/materials/search/rgd720, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

133. Udroiu, R., and Mihail, L. (2009). *Experimental determination of surface roughness of parts obtained by rapid prototyping*. *CSECS*, 9, 283-286.

134. Nguyen, C. H. P., Kim, Y., and Choi, Y. (2021). Design for Additive Manufacturing of Functionally Graded Lattice Structures: A Design Method with Process Induced Anisotropy Consideration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(1), 29-45.

135. Zohdi, N., and Yang, R. (2021). Material anisotropy in additively manufactured polymers and polymer composites: A review. *Polymers*, 13(19), 3368.

136. Dar, U. A., Mian, H. H., Abid, M., Topa, A., Sheikh, M. Z., and Bilal, M. (2020). Experimental and numerical investigation of compressive behavior of lattice structures manufactured through projection micro stereolithography. *Materials Today Communications*, 25, 101563.

137. Lindberg, A., Alfthan, J., Pettersson, H., Flodberg, G., and Yang, L. (2018). Mechanical performance of polymer powder bed fused objects – FEM simulation and verification. *Additive Manufacturing*, 24, 577-586.

138. İnternet: Stratasys. Objet 30 Prime Specification Sheet. URL: https://www.stratasys.com/3d-printers/objet30, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

139. Mueller, J., and Shea, K. (2018). Buckling, build orientation, and scaling effects in 3D printed lattices. *Materials Today Communications*, 17, 69-75.

140. Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G., and Robertson, C. (1982). The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 382(1782), 25-42.

141. Bandyopadhyay, A., and Bose, S. (2019), *Additive Manufacturing*. CRC press.

142. Top, N., Şahin, İ., Gökçe, H., and Gökçe, H. (2021). Computer-aided design and additive manufacturing of bone scaffolds for tissue engineering: state of the art. *Journal of Materials Research*, 36(19), 3725-3745.

143. Beyer, C., and Figueroa, D. (2016). Design and analysis of lattice structures for additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(12).

144. Vrána, R., Jaroš, J., Koutný, D., Nosek, J., Zikmund, T., Kaiser, J., and Paloušek, D. (2022). Contour laser strategy and its benefits for lattice structure manufacturing by selective laser melting technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 640-657.

145. Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., and Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401-477.

146. Wei, P., Wei, Z., Chen, Z., Du, J., He, Y., Li, J., and Zhou, Y. (2017). The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior. *Applied Surface Science*, 408, 38-50.

147. Tradowsky, U., White, J., Ward, R. M., Read, N., Reimers, W., and Attallah, M. M. (2016). Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development. *Materials & Design*, 105, 212-222.

148. Thijs, L., Kempen, K., Kruth, J.-P., and Van Humbeeck, J. (2013). Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia*, 61(5), 1809-1819.

149. Read, N., Wang, W., Essa, K., and Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 417-424.

150. Galy, C., Le Guen, E., Lacoste, E., and Arvieu, C. (2018). Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences. *Additive Manufacturing*, 22, 165-175.

151. Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., and Kruth, J. P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 39, 439-446.

152. Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., and Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 1-4, 77-86.

153. Hitzler, L., Janousch, C., Schanz, J., Merkel, M., Heine, B., Mack, F., Hall, W., and Öchsner, A. (2017). Direction and location dependency of selective laser melted AlSi10Mg specimens. *Journal of Materials Processing Technology*, 243, 48-61.

154. Li, Z., Li, B.-Q., Bai, P., Liu, B., and Wang, Y. (2018). Research on the thermal behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: Simulation and experiment. *Materials*, 11(7), 1172.

155. Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., Odeshi, A., and Mohammadi, M. (2018). Dynamic loading of direct metal laser sintered AlSi10Mg alloy: Strengthening behavior in different building directions. *Materials & Design*, 159, 201-211.

156. Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J. E., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., Withers, P. J., and Attallah, M. M. (2015). Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 628, 188-197.

157. Vrána, R., Koutný, D., Paloušek, D., Pantělejev, L., Jaroš, J., Zikmund, T., and Kaiser, J. (2018). Selective laser melting strategy for fabrication of thin struts usable in lattice structures. *Materials*, 11(9), 1763.

158. Dong, Z., Zhang, X., Shi, W., Zhou, H., Lei, H., and Liang, J. (2018). Study of size effect on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg samples made by selective laser melting. *Materials*, 11(12), 2463.

159. Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., and Bültmann, J. (2011). High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts. *Physics Procedia*, 12, 271-278.

160. Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., and Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design*, 34, 159-169.

161. Großmann, A., Gosmann, J., and Mittelstedt, C. (2019). Lightweight lattice structures in selective laser melting: Design, fabrication and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 766, 138356.

162. Zhu, H. H., Fuh, J. Y. H., and Lu, L. (2007). The influence of powder apparent density on the density in direct laser-sintered metallic parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2), 294-298.

163. Yuan, L., Gu, D., Lin, K., Ge, Q., Shi, X., Wang, H., and Hu, K. (2020). Influence of structural features on processability, microstructures, chemical compositions, and hardness of selective laser melted complex thin-walled components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(5), 1643-1654.

164. Zyguła, K., Nosek, B., Pasiowiec, H., and Szysiak, N. (2018). Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique. *World Scientific News*(104), 456-466.

165. Datasheet. (2023). *M2 Series 5 Aluminum Al-Si10-Mg*. GE Additive.

166. Prashanth, K. G., Scudino, S., Maity, T., Das, J., and Eckert, J. (2017). Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting? *Materials Research Letters*, 5(6), 386-390.

167. Liu, F., Zhou, T., Zhang, T., Xie, H., Tang, Y., and Zhang, P. (2022). Shell offset enhances mechanical and energy absorption properties of SLM-made lattices with controllable separated voids. *Materials & Design*, 217, 110630.

168. Kamarudin, K., Wahab, M. S., Shayfull, Z., Ahmed, A., and Raus, A. A. (2016). *Dimensional accuracy and surface roughness analysis for AlSi10Mg produced by selective laser melting (SLM)*. MATEC Web Conference, 78, 01077.

169. Xiong, Z. H., Liu, S. L., Li, S. F., Shi, Y., Yang, Y. F., and Misra, R. D. K. (2019). Role of melt pool boundary condition in determining the mechanical properties of selective laser melting AlSi10Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 740-741, 148-156.

170. Ren, Y., and Wang, Q. (2022). Gaussian-process based modeling and optimal control of melt-pool geometry in laser powder bed fusion. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(8), 2239-2256.

171. Karthik, G. M., and Kim, H. S. (2021). Heterogeneous aspects of additive manufactured metallic parts: A review. *Metals and Materials International*, 27(1), 1-39.

172. Praneeth, J., Venkatesh, S., and Sivarama Krishna, L. (2023). Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM. *Materials Today: Proceedings*.

173. Pharr, G. (1998). Measurement of mechanical properties by ultra-low load indentation. *Materials Science and Engineering: A*, 253(1-2), 151-159.

174. Zhang, S. (2017). *Design, analysis, and application of a cellular material/structure model for metal based additive manufacturing process*. Ph. D. Thesis, Louisville University Industrial Engineering Depertmant.

175. Maeshima, T., and Oh-ishi, K. (2019). Solute clustering and supersaturated solid solution of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Heliyon*, 5(2), e01186.

176. Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., and Everitt, N. M. (2016). The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 667, 139-146.

177. Dong, Z., Liu, Y., Li, W., and Liang, J. (2019). Orientation dependency for microstructure, geometric accuracy and mechanical properties of selective laser melting AlSi10Mg lattices. *Journal of Alloys and Compounds*, 791, 490-500.

178. Tang, M., Pistorius, P. C., and Beuth, J. L. (2017). Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 14, 39-48.

179. Trevisan, F., Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Aversa, A., Ambrosio, E. P., Lombardi, M., Fino, P., and Manfredi, D. (2017). On the selective laser melting (SLM) of the Alsi10mg alloy: Process, microstructure, and mechanical properties. *Materials*, 10(1), 76.

180. Oliveira, J. P., LaLonde, A. D., and Ma, J. (2020). Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 193, 108762.

181. Wu, H., Li, J., Wei, Z., and Wei, P. (2020). Effect of processing parameters on forming defects during selective laser melting of AlSi10Mg powder. *Rapid Prototyping Journal*, 26(5), 871-879.

182. Gu, D., and Shen, Y. (2009). Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design*, 30(8), 2903-2910.

183. Yang, L. (2011). *Structural Design, Optimization and Application of 3D Re-entrant Auxetic Structures*, Ph. D. Thesis, North Carolina State University Industrial Engineering Depertmant.

184. Gümrük, R., and Mines, R. A. W. (2013). Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, 125-139.

185. Beuth, J., and Klingbeil, N. (2001). The role of process variables in laser-based direct metal solid freeform fabrication. *JOM*, 53(9), 36-39.

186. King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., Kamath, C., and Rubenchik, A. M. (2014). Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2915-2925.

187. Siao, Y.-H., and Wen, C.-D. (2021). Examination of molten pool with Marangoni flow and evaporation effect by simulation and experiment in selective laser melting. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 125, 105325.

188. Metel, A. S., Stebulyanin, M. M., Fedorov, S. V., and Okunkova, A. A. (2019). Power density distribution for laser additive manufacturing (SLM): Potential, Fundamentals and Advanced Applications. *Technologies*, 7(1), 5.

189. Mertens, A., Delahaye, J., Dedry, O., Vertruyen, B., Tchuindjang, J. T., and Habraken, A. M. (2020). Microstructure and oroperties of SLM AlSi10Mg: Understanding the influence of the local thermal history. *Procedia Manufacturing*, 47, 1089-1095.

190. Ion, J. (2005), *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Elsevier.

191. Liu, S., Liu, J., Chen, J., and Liu, X. (2019). Influence of surface tension on the molten pool morphology in laser melting. *International Journal of Thermal Sciences*, 146, 106075.

192. Chen, B., Yao, Y., Song, X., Tan, C., Cao, L., and Feng, J. (2018). Microstructure and mechanical properties of additive manufacturing AlSi10Mg alloy using direct metal deposition. *Ferroelectrics*, 523(1), 153-166.

193. Goldenshtein, A., Gold, Y. I., and Chayet, H. (1998). Measuring the size and intensity distribution of SEM beam spot. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XII*, 3332, 132-137.

194. Aboulkhair, N. T., Tuck, C., Ashcroft, I., Maskery, I., and Everitt, N. M. (2015). On the precipitation hardening of selective laser melted AlSi10Mg. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(8), 3337-3341.

195. Ghio, E., and Cerri, E. (2022). Additive manufacturing of AlSi10Mg and Ti6Al4V lightweight alloys via laser powder bed fusion: A review of heat treatments effects. *Materials*, 15(6), 2047.

196. Zhao, L., Song, L., Santos Macías, J. G., Zhu, Y., Huang, M., Simar, A., and Li, Z. (2022). Review on the correlation between microstructure and mechanical performance for laser powder bed fusion AlSi10Mg. *Additive Manufacturing*, 56, 102914.

197. Alghamdi, F., and Haghshenas, M. (2019). Microstructural and small-scale characterization of additive manufactured AlSi10Mg alloy. *SN Applied Sciences*, 1(3), 255.

198. Yang, K. V., Rometsch, P., Davies, C. H. J., Huang, A., and Wu, X. (2018). Effect of heat treatment on the microstructure and anisotropy in mechanical properties of A357 alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 154, 275-290.

199. Caceres, C. H., Davidson, C. J., Griffiths, J. R., and Wang, Q. G. (1999). The effect of Mg on the microstructure and mechanical behavior of Al-Si-Mg casting alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(10), 2611-2618.

200. Beretta, S., Patriarca, L., Gargourimotlagh, M., Hardaker, A., Brackett, D., Salimian, M., Gumpinger, J., and Ghidini, T. (2022). A benchmark activity on the fatigue life assessment of AlSi10Mg components manufactured by L-PBF. *Materials & Design*, 218, 110713.

201. Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., Li, J., and Mohammadi, M. (2018). Columnar to equiaxed transition during direct metal laser sintering of AlSi10Mg alloy: Effect of building direction. *Additive Manufacturing*, 23, 121-131.

202. Lam, T.-N., Lee, A., Chiu, Y.-R., Kuo, H.-F., Kawasaki, T., Harjo, S., Jain, J., Lee, S. Y., and Huang, E. W. (2022). Estimating fine melt pool, coarse melt pool, and heat affected zone effects on the strengths of additive manufactured AlSi10Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 856, 143961.

203. Liu, B., Li, B.-Q., and Li, Z. (2019). Selective laser remelting of an additive layer manufacturing process on AlSi10Mg. *Results in Physics*, 12, 982-988.

204. Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., and Kruth, J. P. (2015). Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology*, 31(8), 917-923.

205. Yasa, E., Deckers, J., and Kruth, J. P. (2011). The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 312-327.

206. Lam, L. P., Zhang, D. Q., Liu, Z. H., and Chua, C. K. (2015). Phase analysis and microstructure characterisation of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), 207-215.

207. Liu, X., Zhao, C., Zhou, X., Shen, Z., and Liu, W. (2019). Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Materials & Design*, 168, 107677.

208. Kan, W. H., Nadot, Y., Foley, M., Ridosz, L., Proust, G., and Cairney, J. M. (2019). Factors that affect the properties of additively-manufactured AlSi10Mg: Porosity versus microstructure. *Additive Manufacturing*, 29, 100805.

209. Tang, M., Pistorius, P. C., Narra, S., and Beuth, J. L. (2016). Rapid solidification: Selective laser melting of AlSi10Mg. *JOM*, 68(3), 960-966.

210. Maamoun, A. H., Xue, Y. F., Elbestawi, M. A., and Veldhuis, S. C. (2019). The effect of selective laser melting process parameters on the microstructure and mechanical properties of Al6061 and AlSi10Mg alloys. *Materials*, 12(1), 12.

211. Liu, Y., Liu, Z., Jiang, Y., Wang, G., Yang, Y., and Zhang, L. (2018). Gradient in microstructure and mechanical property of selective laser melted AlSi10Mg. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 1414-1421.

212. Yusuf, S. M., Hoegden, M., and Gao, N. (2020). Effect of sample orientation on the microstructure and microhardness of additively manufactured AlSi10Mg processed by high-pressure torsion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9), 4321-4337.

213. Li, X., Yi, D., Wu, X., Zhang, J., Yang, X., Zhao, Z., Feng, Y., Wang, J., Bai, P., Liu, B., and Liu, Y. (2021). Effect of construction angles on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 881, 160459.

214. Deng, D., Peng, R. L., Brodin, H., and Moverare, J. (2018). Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: Sample orientation dependence and effects of post heat treatments. *Materials Science and Engineering: A*, 713, 294-306.

215. Zhang, B., Han, X., Chen, C., Zhang, W., Liao, H., and Chen, B. (2021). Effect of the strut size and tilt angle on the geometric characteristics of selective laser melting AlSi10Mg. *Rapid Prototyping Journal*, 27(5), 879-889.

216. Ibrahim, Y., Li, Z., Davies, C., Maharaj, C., Dear, J., and Hooper, P. (2018). Acoustic resonance testing of additive manufactured lattice structures. *Additive Manufacturing*, 24, 566-576.

217. Rosa, F., Manzoni, S., and Casati, R. (2018). Damping behavior of 316L lattice structures produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 160, 1010-1018.

218. Leitz, K.-H., Singer, P., Plankensteiner, A., Tabernig, B., Kestler, H., and Sigl, L. (2017). Multi-physical simulation of selective laser melting. *Metal Powder Report*, 72(5), 331-338.

219. Mukherjee, T., Wei, H., De, A., and DebRoy, T. (2018). Heat and fluid flow in additive manufacturing—Part I: Modeling of powder bed fusion. *Computational Materials Science*, 150, 304-313.

220. Mukherjee, T., Wei, H., De, A., and DebRoy, T. (2018). Heat and fluid flow in additive manufacturing–Part II: Powder bed fusion of stainless steel, and titanium, nickel and aluminum base alloys. *Computational Materials Science*, 150, 369-380.

221. Liu, S., Chang, S., Zhu, H., Yin, J., Wang, T., and Zeng, X. (2019). Effect of substrate material on the molten pool characteristics in selective laser melting of thin wall parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 3221-3231.

222. Dai, D., and Gu, D. (2015). Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi10Mg powder. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 88, 95-107.

223. Ding, X., and Wang, L. (2017). Heat transfer and fluid flow of molten pool during selective laser melting of AlSi10Mg powder: Simulation and experiment. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 280-289.

224. Bajaj, P., Wright, J., Todd, I., and Jägle, E. A. (2019). Predictive process parameter selection for selective laser melting manufacturing: applications to high thermal conductivity alloys. *Additive Manufacturing*, 27, 246-258.

225. Liu, S., Zhu, H., Peng, G., Yin, J., and Zeng, X. (2018). Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis. *Materials & Design*, 142, 319-328.

226. Lee, Y.-T., Zhuang, J.-R., Hsieh, W.-H., and Yang, A.-S. (2017). FEM simulations to study the effects of laser power and scan speed on molten pool size in additive manufacturing. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 11(7), 1298-1302.

227. Weingarten, C., Buchbinder, D., Pirch, N., Meiners, W., Wissenbach, K., and Poprawe, R. (2015). Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology*, 221, 112-120.

228. Han, Q., Setchi, R., Lacan, F., Gu, D., and Evans, S. L. (2017). Selective laser melting of advanced Al-Al2O3 nanocomposites: simulation, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 698, 162-173.

229. Liu, B., Li, B. Q., Li, Z., Bai, P., Wang, Y., and Kuai, Z. (2019). Numerical investigation on heat transfer of multi-laser processing during selective laser melting of AlSi10Mg. *Results in Physics*, 12, 454-459.

230. Siao, Y.-H., and Wen, C.-D. (2021). Influence of process parameters on heat transfer of molten pool for selective laser melting. *Computational Materials Science*, 193, 110388.

231. Körner, C., Attar, E., and Heinl, P. (2011). Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 978-987.

232. Lee, Y., and Zhang, W. (2016). Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 12, 178-188.

233. Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Zhong, C., Lin, X., and Huang, W. (2019). A novel method for the molten pool and porosity formation modelling in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 1091-1105.

234. Li, Y., Zhou, K., Tor, S. B., Chua, C. K., and Leong, K. F. (2017). Heat transfer and phase transition in the selective laser melting process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2408-2416.

235. Li, Z., Xu, R., Zhang, Z., and Kucukkoc, I. (2018). The influence of scan length on fabricating thin-walled components in selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 126, 1-12.

236. Makinde, O., Moitsheki, R., Jana, R., Bradshaw-Hajek, B., and Khan, W. (2014). *Nonlinear fluid flow and heat transfer*. Hindawi.

237. Ning, J., Sievers, D. E., Garmestani, H., and Liang, S. Y. (2020). Analytical modeling of in-process temperature in powder feed metal additive manufacturing considering heat transfer boundary condition. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 585-593.

238. Groulx, D., and Ogoh, W. (2009). *Solid-liquid phase change simulation applied to a cylindrical latent heat energy storage system*. COMSOL Conference.

239. İnternet: COMSOL. Heat Transfer Module User's Guide. URL: https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

240. İnternet: COMSOL. Theory for Heat Transfer with Phase Change. COMSOL Multiphysics Reference Manual URL: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/heat_ug_theory.07.16.html, Son Erişim Tarihi: 21.06.2023

241. Majeed, M., Khan, H., and Rasheed, I. (2019). Finite element analysis of melt pool thermal characteristics with passing laser in SLM process. *Optic*, 194, 163068.

242. Gu, D. (2015), *Laser additive manufacturing of high-performance materials*. Springer.

243. Wei, P., Wei, Z., Chen, Z., He, Y., and Du, J. (2017). Thermal behavior in single track during selective laser melting of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A*, 123, 1-13.

244. Du, Y., You, X., Qiao, F., Guo, L., and Liu, Z. (2019). A model for predicting the temperature field during selective laser melting. *Results in Physics*, 12, 52-60.

245. Maliaris, G., and Sarafis, E. (2017). Mechanical behavior of 3D printed stochastic lattice structures. *Solid State Phenomena*, 258, 225-228.

246. Siegkas, P. (2022). Generating 3D porous structures using machine learning and additive manufacturing. *Materials & Design*, 220, 110858.

247. Grasso, M., Laguzza, V., Semeraro, Q., and Colosimo, B. M. (2016). In-Process monitoring of selective laser melting: spatial detection of defects via image data analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(5).

248. Tao, W., and Leu, M. C. (2016). *Design of lattice structure for additive manufacturing*. International Symposium on Flexible Automation (ISFA), 325-332.

249. Kaufmann, M., Zenkert, D., and Wennhage, P. (2010). Integrated cost/weight optimization of aircraft structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(2), 325-334.

250. Gibson, L. J. (1989). Modelling the mechanical behavior of cellular materials. *Materials Science and Engineering: A*, 110, 1-36.

251. Li, Z.-h., Nie, Y.-f., Liu, B., Kuai, Z.-z., Zhao, M., and Liu, F. (2020). Mechanical properties of AlSi10Mg lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 192, 108709.

252. Wang, S., Wang, J., Xu, Y., Zhang, W., and Zhu, J. (2020). Compressive behavior and energy absorption of polymeric lattice structures made by additive manufacturing. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 15, 319-327.

253. Yu, T., Hyer, H., Sohn, Y., Bai, Y., and Wu, D. (2019). Structure-property relationship in high strength and lightweight AlSi10Mg microlattices fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 182, 108062.

254. Pirinu, A., Primo, T., Del Prete, A., Panella, F. W., and De Pascalis, F. (2023). Mechanical behaviour of AlSi10Mg lattice structures manufactured by the Selective Laser Melting (SLM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(5-6), 1651-1680.

255. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Bubb, S. L., Young, P., and Raymont, D. (2014). Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 856-864.

256. Maconachie, T., Leary, M., Tran, P., Harris, J., Liu, Q., Lu, G., Ruan, D., Faruque, O., and Brandt, M. (2022). The effect of topology on the quasi-static and dynamic behaviour of SLM AlSi10Mg lattice structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-20.

257. Mantovani, S., Giacalone, M., Merulla, A., Bassoli, E., and Defanti, S. (2022). Effective mechanical properties of AlSi7Mg additively manufactured cubic lattice structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(4), 326-336.

258. Zhang, H., Zhou, H., Zhou, Z., Zeng, H., Zhang, X., Yang, J., Lei, H., and Han, F. (2021). Energy absorption diagram characteristic of metallic self-supporting 3D lattices fabricated by additive manufacturing and design method of energy absorption structure. *International Journal of Solids and Structures*, 226, 111082.

259. Mao, Y., He, Q., and Zhao, X. (2020). Designing complex architectured materials with generative adversarial networks. *Science Advances*, 6(17), eaaz4169.

260. Hassanin, H., Alkendi, Y., Elsayed, M., Essa, K., and Zweiri, Y. (2020). Controlling the properties of additively manufactured cellular structures using machine learning approaches. *Advanced Engineering Materials*, 22(3), 1901338.

261. Yu, G., Xiao, L., and Song, W. (2022). Deep learning-based heterogeneous strategy for customizing responses of lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 229, 107531.

262. Challapalli, A., Patel, D., and Li, G. (2021). Inverse machine learning framework for optimizing lightweight metamaterials. *Materials & Design*, 208, 109937.

263. Nguyen, L. C., and Nguyen-Xuan, H. (2020). Deep learning for computational structural optimization. *ISA Transactions*, 103, 177-191.

264. Gerber, D. (2009). *The Parametric Affect: Computation, Innovation and Models for Design Exploration in Contemporary Architectural Practice*. GSD

265. Gerber, D., and Lin, S. H. (2012). *Designing-in performance through parameterization, automation, and evolutionary algorithms.* Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, Hong Kong.

266. Figueira, A., and Vaz, B. (2022). Survey on synthetic data generation, evaluation methods and GANs. *Mathematics*, 10(15), 2733.

267. Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.

268. Huiyong, W., Shuchun, J., and Zhu, J. (2022). Simulation model and fault analysis of air circulation system of the aircraft based on grasshopper optimization algorithm: support vector machine. *Soft Computing,* 1-16.

269. Rebala, G., Ravi, A., and Churiwala, S. (2019), *An Introduction to Machine Learning*. Springer: Cham.

270. Salehi, H., and Burgueño, R. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering Structures*, 171, 170-189.

271. Gal, Y., and Ghahramani, Z. (2016). *Dropout as a bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning*, International Conference on Machine Learning, 1050-1059.

272. Oh, S., Jung, Y., Kim, S., Lee, I., and Kang, N. (2019). Deep generative design: integration of topology optimization and generative models. *Journal of Mechanical Design*, 141(11).

273. Wu, J., Zhang, C., Xue, T., Freeman, W. T., and Tenenbaum, J. B. (2016). *Learning a probabilistic latent space of object shapes via 3d generative-adversarial modeling.* Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems, 82-90.

274. Bello, S. A., Yu, S., Wang, C., Adam, J. M., and Li, J. (2020). Review: Deep learning on 3D point clouds. *Remote Sensing*, 12(11), 1729.

275. Gao, Z., Li, Y., and Wan, S. (2020). Exploring deep learning for view-based 3D model retrieval. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 16(1), Article 18.

276. Houssein, E. H., Emam, M. M., Ali, A. A., and Suganthan, P. N. (2021). Deep and machine learning techniques for medical imaging-based breast cancer: A comprehensive review. *Expert Systems with Applications*, 167, 114161.

277. Singh, R. D., Mittal, A., and Bhatia, R. K. (2019). 3D convolutional neural network for object recognition: a review. *Multimedia Tools and Applications*, 78(12), 15951-15995.

278. Yi, X., Walia, E., and Babyn, P. (2019). Generative adversarial network in medical imaging: A review. *Medical Image Analysis*, 58, 101552.

279. Rahman, R. (2020). *Using Generative Adversarial Networks for Content Generation in Games*. MSc Thesis, Abertay University Computer Games Technology.

280. Wallach, J. C., and Gibson, L. J. (2001). Mechanical behavior of a three-dimensional truss material. *International Journal of Solids and Structures*, 38(40), 7181-7196.

281. Wang, C., Zhu, J., Wang, G., Qin, Y., Sun, M., Yang, J., Shen, X., and Huang, S. (2022). Effect of building orientation and heat treatment on the anisotropic tensile properties of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 895, 162665.

282. Larson, E. R. (2015). *Material Selection Based on Performance*, William Andrew Publishing. 145-205.

283. Liverani, E., and Fortunato, A. (2021). Stiffness prediction and deformation analysis of Cobalt-Chromium lattice structures: From periodic to functionally graded structures produced by additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 104-114.



Gazili olmak ayrıcalıktır