

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT İÇİN EŞ ZAMANLI PROSES PARAMETRE VE
TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İstemihan GÖKDAĞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem ACAR

Ağustos 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

İstemihan Gökdağ

ÖZET

Yüksek Lisans

EKLEMELİ İMALAT İÇİN EŞ ZAMANLI TOPOLOJİ VE PROSES

PARAMETRE OPTİMİZASYONU

İstemihan Gökdağ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erdem Acar

Tarih: Ağustos 2021

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisinin gelişmesi ile topoloji optimizasyonu (TO) kullanılarak tasarlanan karmaşık geometriler üretilebilmektedir. Havacılık endüstrisi gibi ağırlığın kritik olduğu sektörlerde, tasarımların mekanik isterleri sağlaması ve ağırlığının optimize edilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi kullanılarak 9 farklı proses parametre seti ile AlSi10Mg malzemesine sahip numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapı görselleri taramalı elektron mikroskobu (TEM) yardımı ile elde edilmiştir. Mikroyapı görüntüleri kullanılarak, eriyik havuz boyutları, ötektik Si hücre boyutları ve Si çökelti boyutları ölçülmüştür. Ölçülen sonuçlar kullanılarak proses parametreleri ile hücre boyutları ve Si çökelti boyutları arasında parametrik ilişkiler kurulmuştur. Oluşturulan parametrik denklemler, Hall-Petch ve Orowan mukavemetlendirme mekanizmalarına entegre edilerek AlSi10Mg malzemesinin akma dayanımı ile proses parametreleri arasında bir ilişki kurulmuştur. Oluşturulan denklemler ile hesaplanan akma dayanımı sonuçları, nano-indentasyon testleri ile elde edilen akma dayanımı sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Deneyisel sonuçlar ile doğrulanan parametrik akma dayanımı modeli, tasarım problemlerine entegre edilmiştir. Tasarım uygulama problemleri olarak ankastre kiriş, MBB kirişi ve L braket tasarımı problemleri çözülmüştür. Her bir tasarım problemi, geleneksel topoloji optimizasyonu (GTO), yapısal topoloji optimizasyonu (YTO), ardışık proses parametre ve topoloji optimizasyonu (APPTO) ve son olarak eş zamanlı proses parametre ve topoloji optimizasyonu (EPPTO) olmak üzere 4 farklı yöntem ile çözülmüştür. Geliştirilen EPPTO yöntemi ile lazer gücü, tarama hızı ve topoloji aynı anda minimum maliyet amaçlanarak optimize edilmiştir. Ankastre kiriş ve MBB kiriş tasarım problemlerinin çözülmesi ile orta ölçekli tasarım problemlerine başarılı bir şekilde uygulanabilirliği kanıtlanan EPPTO yöntemi, son olarak havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan L braket tasarımına uygulanmıştır. EPPTO yöntemi ile elde edilen sonuçlar, GTO sonuçları ile kıyaslandığında, ankastre kiriş, MBB kirişi ve L braket tasarımları için sırasıyla %18, %20 ve % 17 oranında toplam maliyetin azaltıldığı belirlenmiştir. Tüm tasarım problemlerinin sonuçları incelendiğinde, EPPTO yöntemi ile ağırlık, yapısal ve enerji yoğunluğu isterlerini sağlayan optimum üretim parametreleri ve topoloji elde edilerek, diğer TO yöntemlerine göre en düşük maliyet değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Topoloji optimizasyonu, Proses parametre optimizasyonu, mikroyapı analizi, eklemeli imalat.

ABSTRACT

Master of Science

CONCURRENT TOPOLOGY AND PROCESS PARAMETERS OPTIMIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING

İstemihan Gökdağ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Erdem Acar

Date: August 2021

Owing to the development of additive manufacturing (AM) technology, complex geometries designed with topology optimization (TO) can be easily produced without any additional cost. In sectors where the weight is critical, such as the aviation industry, it is significant that the designs meet the mechanical requirements and are optimized for minimum weight. In this study, AlSi10Mg specimens are manufactured using Selective Laser Melting (SLM) method with 9 different process parameter sets. Microstructure images of the manufactured specimens are obtained by scanning electron microscope (SEM). Sizes of melt pools, eutectic Si cells and Si precipitates are measured using the images. Parametric equations are generated between process parameters and eutectic Si cell size and Si precipitate size. Thus, a relationship is established between the yield strength of AlSi10Mg material and the process parameters by integrating the generated parametric equations into Hall-Petch and Orowan strengthening mechanisms. The yield strength results calculated with the parametric equations are compared with the yield strength results obtained by nano-indentation.

The parametric yield strength model, validated by the experimental results, is integrated into the design problems. Cantilever beam, MBB beam and L bracket design problems are solved as design application problems. Each design problem is solved by using 4 different methods: conventional TO, structural TO, sequential process parameters and TO, and finally, concurrent process parameters and TO (CPPTO). Laser power, scanning speed and topology of the structure are optimized simultaneously to minimize cost by using the developed concurrent process parameters and TO method. The CPPTO method, which has been successfully proven to be applicable to medium-sized design problems by solving the cantilever beam and MBB beam design problems, is finally applied to the L bracket design, which is frequently used in the aviation industry. It is found that the CPPTO method leads to 18%, 20% and 17% more total cost reduction compared to the GTO method. When the results of all design problems are investigated, it is observed that the optimum process parameters and topology that met the weight, structural and energy density requirements are obtained with the CPPTO method, and thereby the lowest cost values are obtained (compared to other TO methods).

Keywords: Topology optimization, process parameters optimization, microstructure analysis, additive manufacturing.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımları ile ortaya kaliteli bir çalışma çıkarmamı sağlayan ve derin bilgi birikimi beni yönlendiren saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Erdem Acar'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve sağladığı burs için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında yardım ve katkıları ile beni yönlendiren kıymetli çalışma arkadaşlarım Hakan Yavaş'a, Akın Dağkolu'na, Burcu Arslan Hamat'a, Gülten Kafadar'a, Alptuğ Tanrıkulu'na ve Sertaç Altınok'a teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde bana destek olan ve hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, sevgilerini ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen annem Şöhret Aysun, babam Bilgehan Atsız ve kardeşlerim İlteriş Kutluk ve Bumin Gökdağ'a teşekkür ederim.

Tanıştığımız günden itibaren her konuda beni destekleyen ve yanımda olan sevgili eşim Serra İdil Gökdağ'a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Tez İçeriği.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. Eklemeli İmalat	3
2.2. Topoloji Optimizasyonu	5
2.2.1. Topoloji Optimizasyonunun Temel Formülasyonu	5
2.2.2. Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri.....	6
2.2.2.1. Yoğunluk Tabanlı Yöntemler	6
2.2.2.2. Ayrıklaştırılmış Yöntemler	6
2.2.3. Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları.....	7
2.2.3.1. Eklemeli İmalata Yönelik Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları 9	
2.3. Proses Parametre Optimizasyonu	11
2.4. AlSi10Mg Malzemesinin Mukavementlendirme Mekanizmaları	15
3. METODOLOJİ	19
3.1. Eklemeli İmalat ile Üretim	19
3.2. Mikroyapı ve Mekanik Özellik Analizleri	22
3.2.1. Eriyik Havuz Ölçümleri	22
3.2.2. Hücre Boyutu Ölçümleri	25
3.2.3. Si Çökelti Ölçümleri.....	27
3.2.4. Nano-İndentasyon Testleri	29
3.2.5. Sertlik-Akma Dayanımı İlişkisi.....	30
3.3. Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO) Probleminin Oluşturulması.....	31
3.3.1. Maliyet Modelinin Oluşturulması	31
3.3.2. Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO) Probleminin Formülasyonu 33	
3.3.3. Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO) Probleminin Formülasyonu .35	
3.3.4. Ardışık (Sequential) Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO) Probleminin Formülasyonu	39
3.3.4.1. KS (Kreisselmeier–Steinhsauser) Fonksiyonu ile Enerji Yoğunluğu Kısıt Fonksiyonunun Hesaplanması	41

3.3.5.	Eş Zamanlı (Concurrent) Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO) Probleminin Oluşturulması.....	44
3.3.6.	Çalışma Kapsamında Ele Alınan Farklı TO Formülasyonlarının Kıyaslanması.....	46
4.	DENEYSEL ve SAYISAL ÇALIŞMALAR	49
4.1.	Deneysel Sonuçlar	49
4.1.1.	Eriyik Havuz Sonuçları.....	49
4.1.2.	Hücre Boyutu Sonuçları.....	50
4.1.3.	Si Çökelti Sonuçları	52
4.1.4.	Nano-İndentasyon Test Sonuçları.....	53
4.1.5.	Akma Dayanımı Sonuçları.....	55
4.2.	Malzeme Seviyesi Sonuçların Entegrasyonu.....	56
4.2.1.	Eriyik Havuz Sonuçlarının Entegrasyonu.....	56
4.2.2.	Hücre Boyutu Sonuçlarının Entegrasyonu.....	58
4.2.3.	Si Çökelti Sonuçlarının Entegrasyonu	59
4.2.4.	AlSi10Mg malzemesinin Akma Dayanımı Modelinin Oluşturulması. 60	
4.2.4.1.	Hall Petch Mukavemetlendirme Mekanizması.....	61
4.2.4.2.	Orowan Mukavemetlendirme Mekanizması.....	62
4.2.4.3.	Dislokasyon Sertleştirme Mekanizması	63
4.2.4.4.	Test Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	64
4.3.	Tasarım Uygulama Problemleri	65
4.3.1.	Doğrulama Çalışmaları	66
4.3.2.	Ankastre Kiriş Tasarımı	70
4.3.2.1.	Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO)	71
4.3.2.2.	Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO).....	71
4.3.2.3.	Ardışık Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO) 72	
4.3.2.4.	Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO) 75	
4.3.2.5.	Ankastre Kiriş Tasarımlarının Karşılaştırılması.....	78
4.3.3.	MBB Kiriş Tasarımı	81
4.3.3.1.	Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO)	82
4.3.3.2.	Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO).....	82
4.3.3.3.	Ardışık Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO) 83	
4.3.3.4.	Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO) 86	
4.3.3.5.	MBB Kiriş Tasarımlarının Karşılaştırılması	89
4.3.4.	L Braket Tasarımı	91
4.3.4.1.	Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO)	92
4.3.4.2.	Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO).....	92
4.3.4.3.	Ardışık Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO) 93	
4.3.4.4.	Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO) 97	
4.3.4.5.	L Braket Tasarımlarının Karşılaştırılması	101
5.	SONUÇ ve ÖNERİLER	105
	KAYNAKLAR	109

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: a) lazer b) elektron demeti kullanılan direkt enerji yığılmalı sistemler [7], c) elektron demeti [8] d) lazer kullanılan toz yataklı sistemlerin şematik gösterimleri [9]	4
Şekil 2.2: TO ile elde edilen a) Airbus A350 pylon tasarımı, b) Airbus A320 Nasel braketi.....	8
Şekil 2.3: Eklemeli imalat ile üretilecek tasarımların akış şeması [32]	10
Şekil 2.4: TO ile yeniden tasarlanan a) RUAG Space firmasının anten braketi b) TUSAŞ firmasının uydu braketi.....	11
Şekil 2.5: Lazer gücü ve tarama hızı değişkenleri ile oluşturulan vekil model grafikleri [39]	12
Şekil 2.6: Enerji yoğunluğu gözeneklilik grafiği [39].....	13
Şekil 2.7: Dikey (sol) ve Yatay (sağ) olarak üretilen numunelerin mikroyapı görüntüleri ve EDS elemental analiz sonuçları [65]	16
Şekil 2.8: Numunenin mikroyapı görüntüsü ve elemental analiz sonucu [65]	17
Şekil 2.9: Deforme olmuş AlSi10Mg yapısının mikroyapı görüntüsü ve karşılık gelen Si ve Mg elemental analizleri [69]	18
Şekil 3.1: Üretim esnasında kullanılan lazer tarama yolu	20
Şekil 3.2: a) Üretim öncesi b) Üretim sonrası numunelerin gösterimi.....	21
Şekil 3.3: Eriyik havuz büyüklüğüne göre değişen tarama sayısının jenerik gösterimi	23
Şekil 3.4:a) 500x yakınlaştırma ile numunenin en üst katmanından alınan görüntü b)alınan görüntünün filtrelenmesi ve ölçüm alınması	23
Şekil 3.5: En üst katmandan alınan optik mikroskop görüntüleri a)100x b)200x c)500x	24
Şekil 3.6: TEM ile farklı büyütmelemlerle elde edilmiş mikroyapı görüntüleri a) 15kX b) 30kX c) 60kX ve d) 80kX	27
Şekil 3.7: a, c) TEM ile alınan görüntüler ve b, d) ölçülen Si çökelteleri	29
Şekil 3.8: GTO yönteminin akış şeması	35
Şekil 3.9: YTO yönteminin akış şeması	39
Şekil 3.10: APPTO yönteminin akış şeması	43
Şekil 3.11: EPPTO yönteminin çalışma prensibi	44
Şekil 3.12: EPPTO yönteminin akış şeması	46
Şekil 4.1: Eriyik havuz genişliğinin a) tarama hızına göre b) lazer gücüne göre değişimi	49
Şekil 4.2: Eriyik havuz genişliğinin enerji yoğunluğuna göre değişimi	50
Şekil 4.3: Hücre boyutunun a) tarama hızına göre b) lazer gücüne göre değişimi ...	51
Şekil 4.4: Hücre boyutunun enerji yoğunluğuna göre değişimi	52
Şekil 4.5: Si çökelti boyutunun a) tarama hızına b) lazer gücüne göre değişimi	53
Şekil 4.6: Si çökelti boyutunun enerji yoğunluğuna göre değişimi	53
Şekil 4.7: Enerji yoğunluğuna göre sertlik değerlerinin değişimi.....	54
Şekil 4.8: Enerji yoğunluğuna göre numunelerin akma dayanımı değerlerinin değişimi	55

Şekil 4.9: Akma dayanımının a)tarama hızına göre değişimi b)lazer gücüne göre değişimi.....	56
Şekil 4.10: Oluşturulan eriyik havuz alanı fonksiyonunun a) yüzey görüntüsü b) kontur görüntüsü.....	58
Şekil 4.11: Oluşturulan hücre boyutu fonksiyonunun a) yüzey görüntüsü b) kontur görüntüsü.....	59
Şekil 4.12: Oluşturulan Si çökelti çapı fonksiyonunun a) yüzey görüntüsü b) kontur görüntüsü.....	60
Şekil 4.13: Hesaplanan ve ölçülen akma dayanımlarının enerji yoğunluklarına göre değişimi.....	65
Şekil 4.14: Maliyet fonksiyonu bileşenlerinin yapay yoğunluk ve lazer gücü parametrelerine göre değişimi a, b) literatür sonuçları [70] c, d) bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar.....	67
Şekil 4.15: Ankastre giriş tasarımı probleminin sonuçları a, b) literatür sonuçları [70] c, d) bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar	68
Şekil 4.16: L braket tasarımı probleminin sonuçları a, b) literatür sonuçları [70] c, d) bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar	69
Şekil 4.17: Ankastre giriş tasarımı probleminin a) tasarım uzayı, yükleme ve sınır koşulları b) sonlu elemanlar ağı	70
Şekil 4.18: GTO ile elde edilen optimum ankastre giriş tasarımı	71
Şekil 4.19: YTO ile elde edilen optimum ankastre giriş tasarımı	72
Şekil 4.20: Ankastre giriş problemi için APPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı	73
Şekil 4.21: Ankastre giriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı	73
Şekil 4.22: Ankastre giriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı.....	74
Şekil 4.23: Ankastre giriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm ³) dağılımı	75
Şekil 4.24: EPPTO ile elde edilen optimum ankastre giriş tasarımı	76
Şekil 4.25: EPPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı	76
Şekil 4.26: Ankastre giriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı	76
Şekil 4.27: Ankastre giriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı.....	77
Şekil 4.28: Ankastre giriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm ³) dağılımı	78
Şekil 4.29: Elde edilen ankastre giriş tasarımları a) GTO, b) YTO (APPTO'da kullanılan tasarım) ve c) EPPTO	79
Şekil 4.30: MBB giriş tasarımı probleminin a) tasarım uzayı, yükleme ve sınır koşulları b) sonlu elemanlar ağı	81
Şekil 4.31: GTO ile elde edilen optimum MBB giriş tasarımı	82
Şekil 4.32: YTO ile elde edilen optimum MBB giriş tasarımı	83
Şekil 4.33: MBB giriş problemi için APPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı	84
Şekil 4.34: MBB giriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı	84

Şekil 4.35: MBB kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı	85
Şekil 4.36: MBB kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı.....	86
Şekil 4.37: EPPTO ile elde edilen optimum MBB kiriş tasarımı.....	87
Şekil 4.38: EPPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı.....	87
Şekil 4.39: MBB kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı	87
Şekil 4.40: MBB kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı	88
Şekil 4.41: MBB kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı.....	89
Şekil 4.42: Elde edilen MBB kiriş tasarımları a) GTO, b) YTO (APPTO'da kullanılan tasarım) ve c) EPPTO	89
Şekil 4.43: L braket tasarım probleminin a) tasarım uzayı, yükleme ve sınır koşulları b) sonlu elemanlar ağı	91
Şekil 4.44: GTO ile elde edilen optimum L braket tasarımı	92
Şekil 4.45: YTO ile elde edilen optimum L braket tasarımı	93
Şekil 4.46: APPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı.....	94
Şekil 4.47: L braket problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı.....	95
Şekil 4.48: L braket problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı	96
Şekil 4.49: L braket problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı.....	97
Şekil 4.50: EPPTO ile elde edilen optimum L braket tasarımı	98
Şekil 4.51: EPPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı.....	98
Şekil 4.52: L braket problemi için EPPTO yöntemi ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı	99
Şekil 4.53: L braket problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı	100
Şekil 4.54: L braket problemi için EPPTO yöntemi ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı.....	101
Şekil 4.55: Elde edilen L braket tasarımları a) GTO, b) YTO (APPTO'da kullanılan tasarım) ve c) EPPTO.....	102

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Eİ teknolojisinde kullanılan alaşımlar ve sektörler	3
Tablo 2.2: Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde tamamlanan proses parametre çalışmaları	15
Tablo 3.1: Üretimde kullanılan AlSi10Mg tozunun kimyasal içeriği.....	19
Tablo 3.2: Üretilen numunelerin proses parametre setleri.....	19
Tablo 3.3: Üretimde kullanılan diğer parametreler.....	20
Tablo 3.4: Numunelerin enerji yoğunluk değerleri.....	21
Tablo 3.5: Çalışma kapsamında incelenen numunelerin proses parametre ve enerji yoğunluğu değerleri	22
Tablo 3.6: Maliyet fonksiyonu unsurlarının formülleri	31
Tablo 3.7: Farklı topoloji optimizasyonu formülasyonlarının karşılaştırılması	47
Tablo 4.1: Numunelerin sertlik değerleri.....	54
Tablo 4.2: Oluşturulan eriyik havuz alanı fonksiyonunun bilgileri.....	57
Tablo 4.3: Oluşturulan hücre boyutu fonksiyonunun bilgileri.....	58
Tablo 4.4: Oluşturulan Si çökelti çapı fonksiyonunun bilgileri.....	60
Tablo 4.5: Hesaplanan Hall-Petch gerilmeleri.....	62
Tablo 4.6: Hesaplanan Orowan gerilmeleri	62
Tablo 4.7: AlSi10Mg malzemesinin deneysel olarak ve parametrik olarak hesaplanan akma dayanımlarının karşılaştırması	65
Tablo 4.8: Tasarım problemlerinde kullanılan katsayılar	66
Tablo 4.9: Ankastre giriş tasarımlarının üretim ve maliyet bilgileri	79
Tablo 4.10: MBB giriş tasarımlarının üretim ve maliyet bilgileri	90
Tablo 4.11: L braket tasarımlarının üretim ve maliyet bilgileri.....	103

KISALTMALAR

APPTO	: Ardışık proses parametre ve topoloji optimizasyonu
BJ	: Bağlayıcı püskürtme (Binder jetting)
CT	: Bilgisayarlı tomografi (Computed tomography)
Eİ	: Eklemeli imalat
EPPTO	: Eş zamanlı proses parametre ve topoloji optimizasyonu
ESO	: Evrimsel yapısal optimizasyon (Evolutionary structural optimization)
FDM	: Eriyik yığıma modellemesi (Fused Deposition Modelling)
FFD	: Tam faktöriyel tasarım (Full Factorial Design)
GTO	: Geleneksel topoloji optimizasyonu
KS	: Kreisselmeier–Steinhsauser
MBB	: Messerschmitt–Bölkow–Blohm
MMA	: Hareketli asimptotlar yöntemi (Method of moving asymptotes)
SIMP	: Solid Isotropic Material with Penalization
SLA	: Stereolithografi
SLE	: Seçici lazer ergitme (selective laser melting)
SLS	: Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering)
TO	: Topoloji optimizasyonu
YTO	: Yapısal topoloji optimizasyonu

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a_1	Eriyik havuz katsayısı
a_2	Eriyik havuz katsayısı
a_3	Hücre boyutu katsayısı
a_4	Hücre boyutu katsayısı
a_5	Si çökelti boyutu katsayısı
a_6	Si çökelti boyutu katsayısı
c_b	Bakım maliyeti
c_e	Elektrik maliyeti
c_i	İşçilik maliyeti
c_m	Birim malzeme maliyeti
c_y	Yatırım maliyeti
E_0	Elastik modül
E_{mn}	Minimum elastik modül
h	Tarama aralığı
H	Yıllık çalışma süresi
k	Emniyet faktörü
K	Mantık fonksiyonu katsayısı
L	Çalışma ömrü
p	Penaltı faktörü
P_0	Üretim öncesi lazer gücü
P_i	İlk iterasyondaki lazer gücü değeri
R	Red edilme oranı
t	Katman kalınlığı
V_i	İlk iterasyondaki tarama hızı değeri
Y_{mn}	Minimum akma dayanımı
ρ_i	İlk iterasyondaki yapay yoğunluk değeri
ρ_{KS}	KS fonksiyonu birleştirme katsayısı
ρ_m	Malzeme özkütlesi
α	Soğurma katsayısı
η	Hurda oranı

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Eklemeli imalat teknolojisinin tasarım süreçlerinde sunduğu avantajlar sayesinde topoloji optimizasyonu (TO) ile elde edilen karmaşık geometriler üretilebilmektedir. Eklemeli imalat yönteminde, üretim esnasında kullanılan parametrelerden en önemlileri şunlardır: lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı. Üretim parametrelerinin yapının mekanik özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir. Mühendislik tasarım uygulama süreçlerinde, ana amaç tasarımın mekanik dayanım isteklerini sağlayacak minimum ağırlıkta olması ve aynı zamanda üretilebilir olmasıdır. Tasarlanan parçanın üretim sürecinde ise ana amaç, yapının dayanımını artıracak şekilde optimum proses parametreleri kullanılarak minimum maliyet ile üretimin başarılı bir şekilde tamamlanmasıdır. Mühendislik uygulamalarında genellikle, tasarım optimizasyonu ile üretim parametrelerinin optimizasyonu ayrı problemler olarak değerlendirilmektedir. Ancak, tasarım ve üretim problemleri tek bir problem olarak değerlendirildiğinde sonuçlar iyileştirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi ile üretilmiş ve üretildikten sonra işlem görmemiş (ing. as-built) AlSi10Mg malzemesine sahip yapılar için mikroyapıyı kontrol ederek mekanik istekleri sağlayacak şekilde minimum maliyetin amaçlandığı optimum üretim koşullarının ve yapısal tasarımın belirlenme süreçlerinin aynı anda gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Tez İçeriği

Tez kapsamında yapılan çalışmada, SLE ile üretilen ve üretildikten sonra işlem görmemiş AlSi10Mg yapıları için bir tasarım yönteminin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, birinci bölümde, eklemeli imalat teknolojisi, AlSi10Mg malzemesinin mikroyapısı, akma dayanım modeli, topoloji optimizasyonu, proses parametre optimizasyonu ve maliyet modelleri ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Metodoloji bölümünde, AlSi10Mg yapılarının SLE ile üretimi esnasında kullanılan farklı proses parametre koşulları, proses parametrelerinin

etkilerini gözlemek adına gerçekleştirilen eriyik havuz, hücre boyutu, Si çökelti ölçümlerinin ve nano seviyede gerçekleştirilen nano-indentasyon testlerinin yöntemleri belirtilmiştir. Aynı zamanda, tasarım sürecinde kullanılan dört farklı topoloji optimizasyonu probleminin detayları açıklanmıştır. Deneysel ve Sayısal Çalışmalar bölümünde ise eriyik havuz, hücre boyutu, Si çökelti ölçüm sonuçları verilip tartışılmıştır. Proses parametrelerine göre değişiklik gösteren deneysel sonuçlar ile proses parametrelerine bağlı fonksiyonlar oluşturulmuştur. Ek olarak, oluşturulan mikroyapı denklemleri tasarım problemlerine entegre edilerek, problem boyutu giderek artacak şekilde sırasıyla ankastre kiriş, Messerschmitt–Bölkow–Blohm (MBB) kirişi ve L braket tasarım süreçlerine uygulanmış ve elde edilen sonuçlara göre dört farklı topoloji optimizasyonu yönteminin performansları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Son olarak, Sonuç ve Öneriler bölümünde, tez kapsamında elde edilen sonuçlar verilmiş ve ileriye yönelik çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat (Eİ), ince katmanların devamlı olarak birbirlerine eklenmesi ile dijital bir modelin üç boyutlu bir yapı haline getirilmesini sağlayan prosestir. Karmaşık veya özel parçaların pahalı kalıp ve dövme gibi şekil verme operasyonlarına ihtiyaç duymadan üretilmesini sağlaması eklemeli imalatın en önemli özelliklerinden bir tanesidir. Üretim kapasitesinden kaynaklı tasarımda sunduğu avantajlar aynı zamanda, temin süresinin kısalığı ve ihtiyaca göre hızlı prototipleme gibi avantajları sayesinde Eİ teknolojisi oldukça ilgi görmektedir [1].

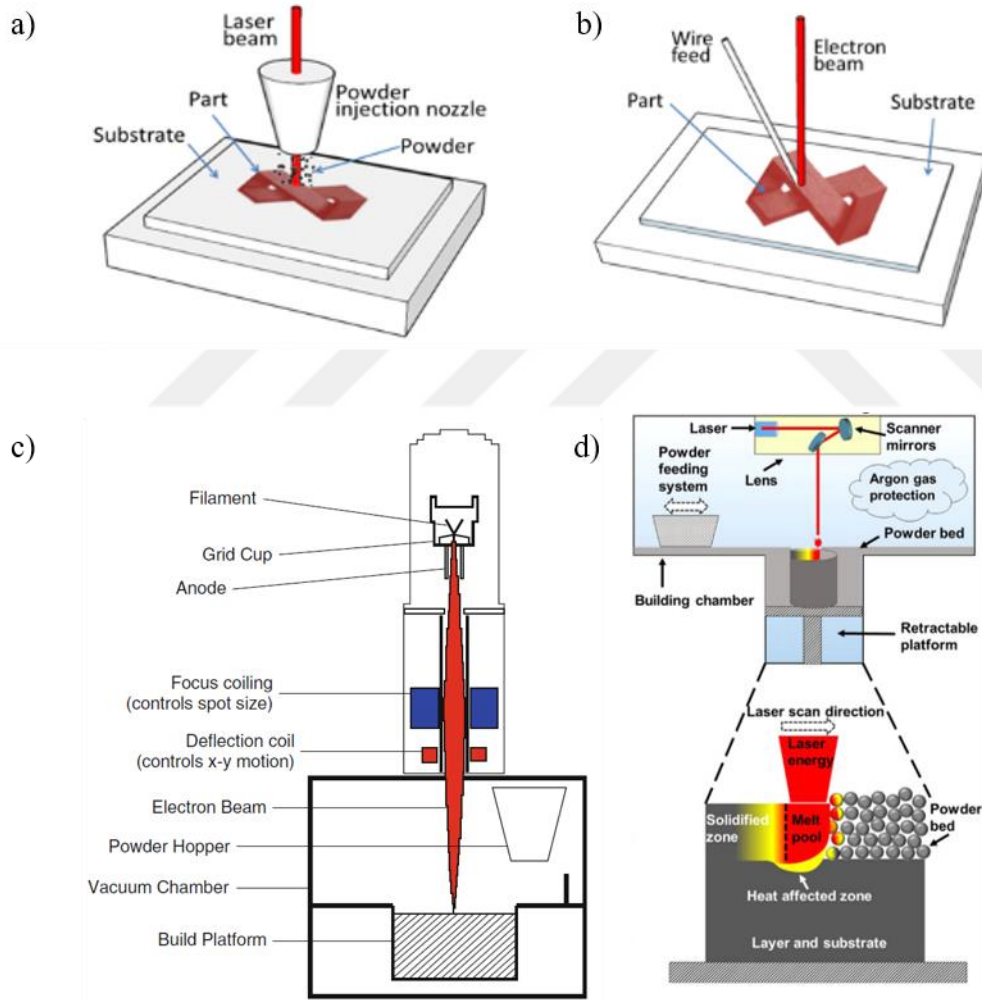
Eİ prosesi, tozların, telin veya levha yapılarının lazer, elektron demeti veya elektrik arki gibi bir enerji kaynağı ile eritilerek ve soğutulularak ham maddenin konsolide edilmesi temeline dayanır. Eİ prosesinde sıklıkla kullanılan alaşımlar ve kullanıldığı endüstriler Tablo 2.1’de belirtilmiştir.

Tablo 2.1: Eİ teknolojisinde kullanılan alaşımlar ve sektörler

	Alüminyum	Paslanmaz Çelik	Titanyum	Nikel süper alaşımları
Havacılık	X	X	X	X
Medikal	-	X	X	-
Otomotiv	X	X	X	-
Enerji	-	X	-	-
Denizcilik	-	X	X	X

Metal malzeme kullanan Eİ yöntemleri, toz yataklı ve direkt enerji yığılı sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [2]. Direkt enerji yığılı sistemlerde, ham madde olarak toz veya tel kullanılmaktadır. Enerji kaynağı olarak lazer kullanılan direkt enerji yığılı sistemlerde, tel veya toz formundaki ham madde erime yolu boyunca lazerle eritilerek yapı inşa edilir ve argon gazı gibi bir koruyucu gaz ile üretim esnasında oluşabilecek oksidasyon engellenir. Aynı zamanda, elektron demeti kullanılan direkt enerji yığılı prosesinde, üretim ortamının yüksek saflığını sağlamak adına yığılı ve soğuma vakumlu bir üretim hacminde yapılmaktadır (bkz. Şekil 2.1-a,b) [3]. Öte yandan, toz yataklı sistemler, üretim esnasında kullanılan enerji kaynağına göre

ayrılmaktadır. Lazer kullanılan toz yataklı sistemler, 2B veya 3B yapıların bir üretim hacmi içerisinde katmanlara ayrılarak, tarama ve üretim parametre konfigürasyonları ile üretilmesini sağlar. Galvanometre yardımıyla odaklanan lazerin katman katman serilen malzeme tozlarını inert gazlarla dolu bir üretim hacmi içerisinde eritilmesi ile birleşme sağlanmaktadır [4,5]. Elektron demeti kullanılan toz yataklı sistemlerde ise, lazerli sistemlerin aksine vakumlu bir üretim hacmi kullanılmaktadır. Elektron demeti kullanılan sistemlerde üretim esnasında, katmanlar öncelikle elektro-statik yüklenmeyi önlemek adına az miktarda sinterlenir ve sinterlenen katmanlar, elektromanyetik lensler ile odaklanan elektron demeti yardımıyla eritilerek birleştirilir (bkz. Şekil 2.1-c,d) [6].



Şekil 2.1: a) lazer b) elektron demeti kullanılan direkt enerji yığılı sistemler [7], c) elektron demeti [8] d) lazer kullanılan toz yataklı sistemlerin şematik gösterimleri [9]

2.2. Topoloji Optimizasyonu

Yapısal optimizasyon çeşitleri olan boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu (TO) yöntemleri yapısal tasarım sürecini farklı şekillerde ele almaktadır. Standart bir boyut optimizasyonu probleminde, bir plakanın optimum kalınlığı veya kafes elemanlarının optimum kesit alanı bulunabilir. Örneğin, plaka tasarımında minimum deformasyon amacı ile tasarım değişkeni olarak plakanın kalınlığı seçilebilir ve tasarım değişkeni sayısı görece olarak düşüktür. Şekil optimizasyonu problemlerinde, belirlenen tasarım unsurlarının geometrik değişkenleri optimum tasarımı belirleyen unsurlar olarak görülmektedir. TO ise tasarım uzayında belirtilen deliklerin sayısı, konumu, şekli ayrıca tasarım uzayıyla bağlantısı gibi özelliklerin belirlenmesi için kullanılmaktadır. TO tasarım uzayında bir amaç fonksiyonu değerini en aza indiren optimum malzeme dağılımını bulduğundan, boyut ve şekil optimizasyonunun ön koşulu olarak düşünülmektedir [10].

2.2.1. Topoloji Optimizasyonunun Temel Formülasyonu

TO problemini oluşturan amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonları Denklem (2.1)'deki gibi tanımlanabilmektedir [11].

$$\begin{aligned} \text{Minimum} \quad & f(\rho) \\ \text{Koşullar} \quad & \int_{\Omega} \rho \, dv \leq \bar{V} \\ & \rho(v) = 0 \text{ veya } 1, \forall v \in \Omega \end{aligned} \tag{2.1}$$

Burada, tasarım değişkeni olarak tanımlanan ρ , her elemanın yapay yoğunluk değeri ve \bar{V} tasarım uzayının kısıtlanan hacim değeridir. Yapay yoğunluk değeri, 0 ila 1 arasında değişmekte olup; 0 değeri sonlu elemanın boşluk olması gerektiği ve 1 değeri de tamamen dolu katı malzeme anlamına gelmektedir. $f(\rho)$ fonksiyonu problemin amaç fonksiyonudur. Kısıt fonksiyonları olarak ise, hacim kısıtı ve tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri tanımlanabilir.

2.2.2. Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri

2.2.2.1. Yoğunluk Tabanlı Yöntemler

TO probleminin tasarım değişkeni olan yapay yoğunluk vektörünün 0-1 değerleri arasında yakınsama performansını iyileştiren ve çözümün karmaşıklığını azaltan SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yöntemi geliştirilmiştir [12–14]. SIMP yönteminde, malzeme özellikleri ile tasarım değişkeni arasındaki kuvvet yasasına (ing. power law) bağlı ilişki Denklem (2.2)'deki gibidir.

$$E_i = E(\rho_i) = \rho_i^p E_0 \quad (2.2)$$

Burada, E_0 katı malzemenin elastik modülü ve p penaltı faktörüdür. Tasarım değişkeni 1 olduğunda sonlu elemanın elastik modülü direkt olarak malzemenin özelliklerine eşit olurken kalan diğer tasarım değişkeni değerleri için mekanik özellikler, penaltı faktörünün değerine göre üstel olarak değişmektedir. Yapılan çalışmalar, penaltı faktörünün 3'e eşit alındığında optimizasyon probleminin yakınsama performansının en yüksek olduğunu göstermektedir [15].

SIMP yönteminde kullanılan interpolasyon şemasının içbükey olmama durumunu azaltmak ve yakınsama koşulunu iyileştirmek adına RAMP (Rational Approximation of Material Properties) yöntemi geliştirilmiştir ve malzeme özellikleri Denklem (2.3) ile hesaplanmaktadır [16].

$$E_i = E(\rho_i) = \frac{\rho_i}{1+q(1-\rho_i)} E_0 \quad (2.3)$$

Burada, q penaltı faktörüdür. RAMP yönteminin asıl avantajı tasarım değişkeni değerinin 0 olduğu durumlarda türevinin sıfır olmamasıdır ve bu özelliğin yakınsama performansına etkisi olduğu düşünülmektedir.

2.2.2.2. Ayrıklaştırılmış Yöntemler

TO problemindeki değişkenler ayrık değişkenler olduğu için problemi ayrıklaştırılmış yöntemlerle çözmek mantıklıdır. Ayrıklaştırılmış yöntemlerle global optimuma ulaşmak ancak küçük boyutlu problemlerde verimli olmaktadır ve topoloji optimizasyonu problemi tasarım değişkeni sayısı açısından oldukça büyük bir problemdir [17]. Geliştirilen bazı global optimuma ulaşma kısıtları iyileştirilse dahi hala problem boyutları konusunda istenen iyileştirmeler sağlanamamıştır. Gradyan bilgisi kullanmayan genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu gibi doğadan

esinlenen yöntemlerin TO problemlerinde kullanılması verimlilik açısından büyük dezavantajları vardır [18].

Ayrıklaştırılmış TO yöntemlerinden en sık kullanılanı evrimsel yapısal optimizasyon (ESO) yöntemleridir. Düşük gerinim enerjisine sahip elemanların tasarımdan çıkarıldığı yöntemler olan evrimsel yöntemlere sonuçların daha stabil olması adına eklenik (ing. adjoint) yöntemi ve filtreleme yöntemleri entegre edilmiştir [19,20]. Bu yöntemlerin, ayırık yapay yoğunlukların iteratif olarak hesaplanması konusunda belirli örneklerle denenerek başarısız olduğu anlaşılmıştır ve çoklu lineer olmayan kısıt fonksiyonlarının sistematik olarak probleme entegre edilmesinin zor olması nedeniyle literatürde eleştirilmektedir [15].

TO yöntemlerinde yoğunluk tabanlı ve ayrıklaştırılmış yöntemler haricinde, Level Set yöntemler, Phase Field yöntemleri, Lagrangian yöntemleri ile şekil ve topoloji optimizasyonunun birleştirildiği yöntemler bulunmaktadır.

2.2.3. Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları

Havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan TO yöntemi, hem var olan bir tasarımın ağırlığının azaltılması hem de direkt olarak optimum malzeme dağılımını hesaplayarak tasarımın elde edilmesini sağlamaktadır. Sekiz farklı yükleme koşulu dikkate alınarak, direkt olarak optimum malzeme dağılımının elde edilmesi ile tasarlanan Airbus A350 uçağının pylon parçasının TO ile elde edilen tasarımı Şekil 2.2-a'da verilmiştir ve şekilde solda bulunan tasarım uzayı %10'luk malzeme kullanımı ile kısıtlandırılarak sağda bulunan tasarım elde edilmiştir [21]. Aynı zamanda, var olan tasarımların ağırlığının hafifletilmesi amacı ile TO yöntemi kullanılarak yeniden tasarlanan Airbus A320 Nasil braketini ilk tasarıma göre %64 oranında hafifliğe sahiptir (bkz. Şekil 2.2-b) [22].



Şekil 2.2: TO ile elde edilen a) Airbus A350 pylon tasarımı, b) Airbus A320 Nacelle braketi

Tasarım sürecinde sıklıkla kullanılan TO yöntemi, havacılık uygulamalarında birçok yükleme koşulunda kullanılabilir. Hava araçları servis süreleri boyunca hem statik hem de dinamik yüklemelere maruz kalırlar. TO problemine, statik ve dinamik yükler entegre edilerek bir seyahat uçağı koltuğunun tasarımı yapılmıştır ve %32 oranında ağırlık hafifliği sağlanmıştır. Aynı zamanda, koltuk tasarımının optimizasyonu ile işleme maliyeti %24 oranında azaltılmıştır [23]. Harmonik yüklemelere maruz kalan yapıların tasarım sürecinde kullanılmak adına geliştirilen harmonik yüklemelerin dikkate alındığı TO formülasyonu iki ve üç boyutlu jenerik yapılara uygulanarak başarılı bir şekilde çalıştığı kanıtlanmıştır [24]. Mekanik yüklemelere ek olarak, termo-elastik yüklemeler de TO problemine entegre edilebilir. Termo-elastik yüklemelere maruz kalan bir havacılık braketi geliştirilen TO problem formülasyonu kullanılarak tekrar tasarlanarak %18 oranında hafifletilmiştir. Optimize edilen tasarım SLE yöntemi ile üretilerek test edilmiştir ve termo-elastik yüklemeleri dikkate alarak geliştirilen TO formülasyonu deneysel çalışmaların sonuçları ile doğrulanmıştır [25]. Ek olarak, tasarımlarda oluşturduğu ürünün servis ömrü boyunca hata oluşmadan görevini sürdürmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, geliştirilen yüksek çevrim yorulmasının entegre edildiği TO yöntemi ile iki

ve üç boyutlu tasarımlar yapılabilmektedir. Geliştirilen yöntem, endüstride sıklıkla kullanılan L braket tasarımına da uygulanmıştır ve oluşabilecek herhangi bir kusura karşı tasarım başarılı bir şekilde tamamlanmıştır [26]. Tasarım üzerinde oluşacak asal gerilmelerin kısıt fonksiyonu olarak TO problemine entegre edildiği ve servis ömrü boyunca maruz kalacağı yüklemelere göre çözümlerinin yapıldığı çalışmada, yüksek çevrim yorulmasına karşı L braket tasarımı yapılmıştır [27].

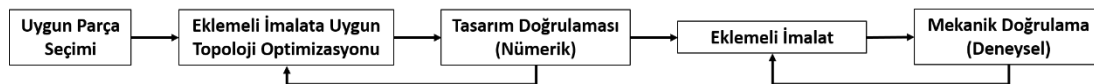
Tasarım sürecinde, yapının hangi üretim metodu ile üretileceği tasarımı etkilemektedir. Üretim kısıtı olarak, minimum unsur boyutu, minimum delik boyutu, simetri, ekstrüzyon desen tekrarlılığı TO formülasyonuna entegre edilmiştir. Üretim kısıtlarının dikkate alındığı TO formülasyonu farklı büyüklükte tasarım süreçlerine uygulanmıştır ve kısıtların optimizasyon yakınsama performansına ve minimize edilen amaç fonksiyonu değerine farklı derecelerde etkilediği belirlenmiştir [28].

2.2.3.1. Eklemeli İmalata Yönelik Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilecek yapıların tasarım sürecinde üretim açısı mekanik özellikleri etkilemektedir. Mekanik özelliklerin değişmesi, belirli yüklemelere maruz kalan tasarımın performansını etkilemektedir. Tasarımların mekanik performansını maksimize etmek adına, ortotropik malzeme özelliklerine sahip yapıların deneysel olarak mekanik özellikleri elde edilmiştir. Elde edilen mekanik özellikler kullanılarak belirli üretim açıları yapısal analizler yapılarak tasarımların güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Vekil model ile belirlenen tasarım uzayı içerisinde tasarımların mekanik performansları modellenmiş ve güvenlik katsayısını maksimize edecek şekilde üretim açısı optimize edilmiştir [29]. Mekanik özellikleri daha da iyileştirmek adına üretim açısı ile birlikte topoloji optimizasyonu da yapılabilmektedir. Böylelikle, öncelikle topoloji ardından üretim açısı optimizasyonu gibi ardışık optimizasyon süreci yerine eş zamanlı optimizasyon ile tüm değişkenler aynı anda hesaplanarak tasarımın performansı daha da artırılmaktadır. Aynı zamanda, eklemeli imalat yönteminde belirli üretim açıları üzerindeki yapılar, üretilirken hatalar oluşmaması adına destek yapılar ile üretilmektedir. Destek yapıların oluşumunun da göz önünde bulundurulduğu geliştirilen eş zamanlı topoloji ve üretim açısı optimizasyonu formülasyonu iki ve üç boyutlu jenerik tasarım problemlerine uygulandıktan sonra anten braketini tasarımına uygulanarak kullanılabilirliğini göstermiştir [30]. Ek olarak, eklemeli imalat yönteminde üretim açısı, destek

yapılarının kullanılması gibi üretim kısıtlarına ek olarak tasarımın içerisinde bulunan boşluklar da üretim kısıtı olarak değerlendirilmektedir. Toz yataklı sistemlerle üretilmesi planlanan tasarımın içerisinde bulunan kapalı boşluklar, tozların tahliye edilememesine neden olmaktadır. İki yönlü evrimsel yapısal optimizasyon yöntemi kullanarak geliştirilen TO formülasyonu ile yapılar, içerisinde bulunan boşlukların tünel benzeri yapılar ile bağlantı kurmak zorunda kalacak şekilde sınırlandırılıp tasarlanabilmektedir. Geliştirilen TO formülasyonu iki adet üç boyutlu tasarım problemine uygulanmıştır ve elde edilen tasarımların prototipleri üretilerek, yöntemin başarılı şekilde çalıştığı belirtilmiştir [31].

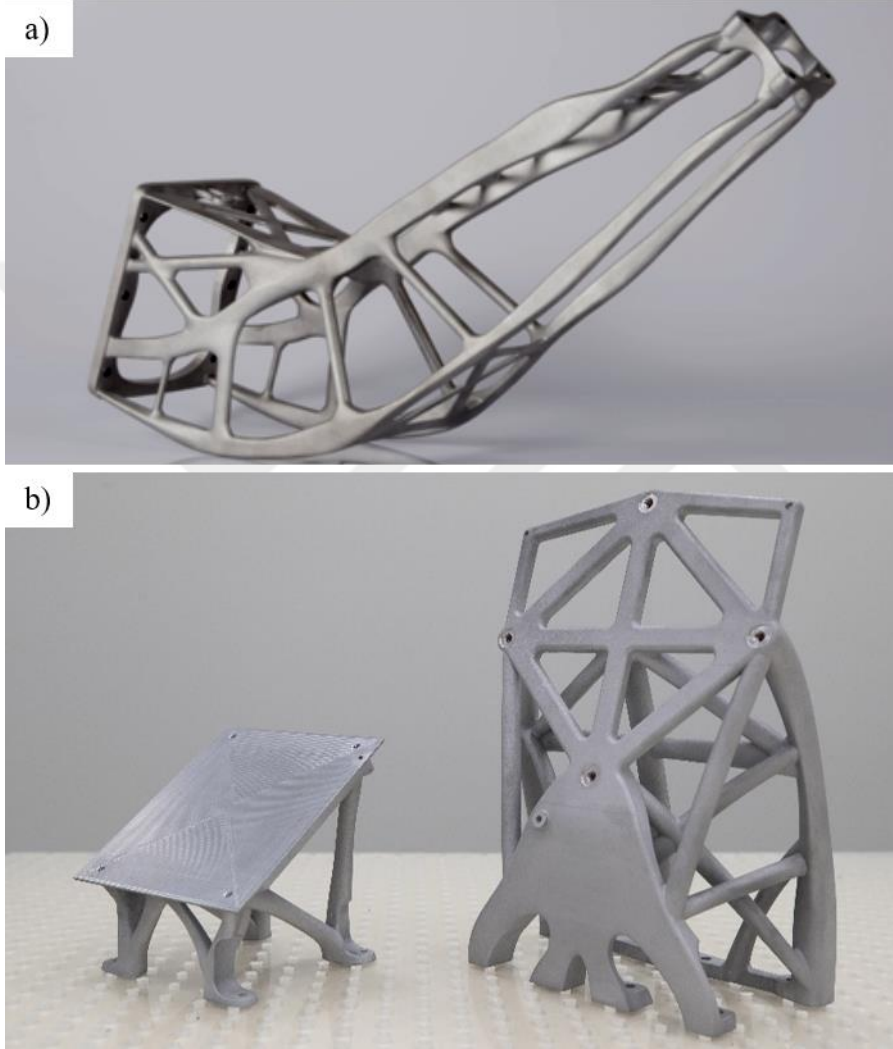
Eklemeli imalata yönelik olarak, tüm tasarım, üretim ve test proseslerini kapsayan iteratif tasarım süreci geliştirilmiştir. Eklemeli imalata yönelik bütün süreçlerin akış şeması Şekil 2.3'te belirtilmiştir. Akış şeması incelendiğinde, ilk olarak ağırlık olarak azaltılabilecek ve/veya eklemeli imalatın sunduğu tasarım avantajlarının kullanılabileceği aday parçalar seçilir. Seçilen parçalar, eklemeli imalat kısıtları göz önünde bulundurularak TO yöntemi ile tasarlanır. Tasarımların mekanik performansları, nümerik olarak simülasyonlar ile doğrulanır. Doğrulama esnasında, eklemeli imalat, konvansiyonel bir yöntem olmadığından dolayı, emniyet katsayısı diğer yöntemlere göre daha büyük olacak şekilde seçilerek hesaplamalar yapılır. Nümerik olarak isterleri sağladığı kanıtlanan tasarımlar, uygun eklemeli imalat teknolojisi ile üretilir. Üretilen parçaların içerisinde, Bilgisayarlı Tomografi (CT) kullanılarak çatlak oluşumu, var ise kusurun boyutu ve konumu, gözenek boyutları ve konumları incelenir. Ardından, parçanın üretimi esnasında çarpılma ve deformasyon durumunu incelemek adına, CT tarama bilgisi kullanılarak orijinal parçanın tasarımı ile karşılaştırılır. Son olarak, nümerik olarak hesaplamaları yapılan yapının performansı gerçek testler ile doğrulanır. İlgili akış şeması kullanılarak, 3 ayrı tasarım, üretim ve test işlemleri gerçekleştirilerek uygulanabilirliği kanıtlanmıştır [32,33].



Şekil 2.3: Eklemeli imalat ile üretilen tasarımların akış şeması [32]

TO yöntemi ile eklemeli imalata yönelik tasarım ve üretim çalışmaları, akademik çalışmaların yanı sıra direkt olarak ürün odaklı uzay uygulamaları için de gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4-a'da RUAG Space firmasının anten braketinin TO ile tekrar tasarlanması sonucunda elde edilen optimize braket verilmektedir ve yaklaşık

%40 oranında ağırlık hafifliği sağlanmıştır [34]. Şekil 2.4-b’de ise TUSAŞ firmasının gerçekleştirdiği, uydularda yer alan iki adet braketin TO ile yeniden tasarlanması ile elde edilen optimize braket çalışmaları verilmektedir ve optimizasyon sonucunda %30 oranında ağırlık hafifliği sağlandığı kaydedilmiştir. Aynı zamanda, ağırlık kazancı elde edilen parçaların, tüm kalifikasyon testlerinin gerçekleştirildiği ve testlerin sonucunda, tüm isterleri başarılı bir şekilde karşıladığı belirtilmiştir [35].



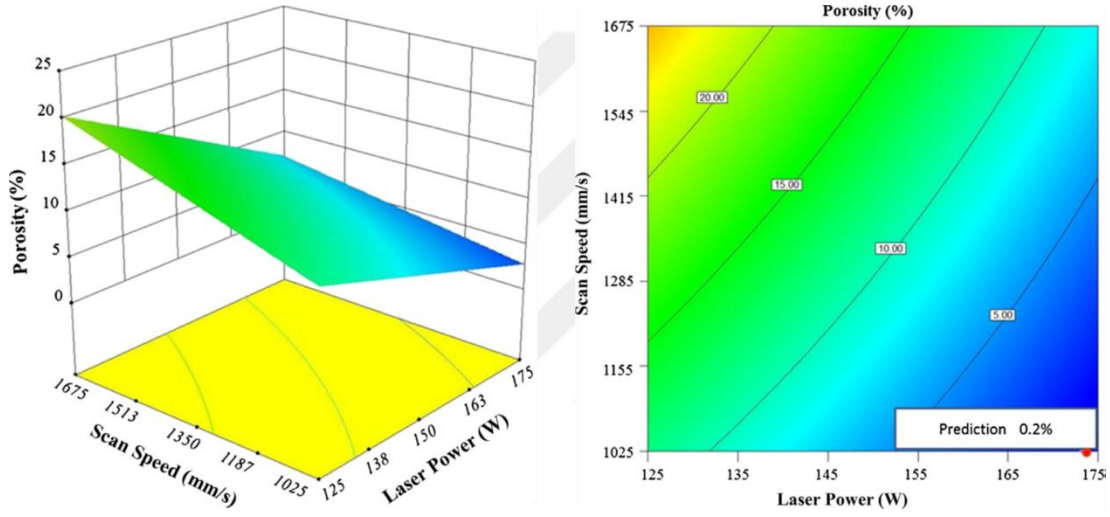
Şekil 2.4: TO ile yeniden tasarlanan a) RUAG Space firmasının anten braketleri
b) TUSAŞ firmasının uydu braketleri

2.3. Proses Parametre Optimizasyonu

Toz yataklı eklemeli imalat sistemleri üretilen yapıların kalitesini, ham madde karakteristiği (toz boyutu, morfolojisi ve boyut dağılımı), lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı, tarama aralığı, tarama stratejisi, üretim açısı ve tabla ön ısıtma sıcaklığı gibi birçok parametre etkilemektedir [36,37]. Ek olarak bazı çalışmalar, yapı

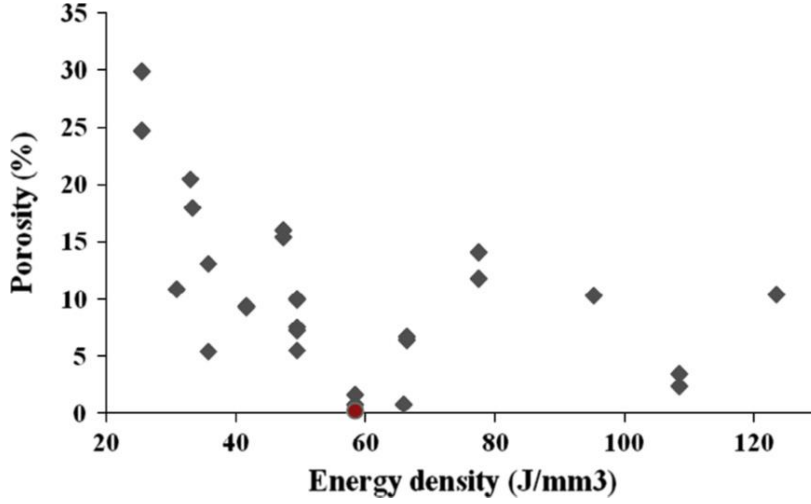
içerisinde oluşan gözenekliliği ayrı ayrı parametrelerle ilişkilendirmektense, enerji yoğunluğu konsepti ile açıklamaya çalışır [38].

Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve taranan adacık boyutu olarak dört parametrenin tasarım değişkenleri olduğu optimizasyon problemi için deney tasarımı ile 27 noktada SLE ile AlSi10Mg numuneleri üretilmiştir ve gözeneklilik ölçümleri yapılmıştır. Tasarım değişkenleri ile minimize edilmesi amaçlanan gözeneklilik arasında vekil model (ing. surrogate model) yöntemi ile ikinci dereceden bir polinom oluşturulmuştur (bkz. Şekil 2.5). Oluşturulan vekil model kullanılarak gözeneklilik minimize edilmiştir ve hesaplanan optimum parametrelerle üretim yapıp gözeneklilik ölçümü yapılarak sonuç doğrulanmıştır [39].



Şekil 2.5: Lazer gücü ve tarama hızı değişkenleri ile oluşturulan vekil model grafikleri [39]

Ek olarak, enerji girişi ile gözeneklilik arasında bir ilişki kurmak adına farklı enerji yoğunluklarında gözeneklilik ölçümleri yapılmıştır (bkz. Şekil 2.6). Sonuçlar incelendiğinde, aynı enerji yoğunluğunda farklı gözeneklilik değerlerinin olduğu gözlemlenmiştir ve stabil bir sonuç elde edilememiştir [39].



Şekil 2.6: Enerji yoğunluğu gözeneklilik grafiği [39]

SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapılarında proses parametrelerinin doluluk oranı, yüzey kalitesi ve verimlilik parametrelerine etkileri incelemek adına, farklı tarama hızlarında ve lazer güçlerinde tek hatlı taramalar ile üretimler yapıp proses haritası çıkarılmıştır. Optimizasyon sırasında, proses haritasından yararlanarak yüksek yüzey kalitesinin düşük tarama hızlarında görüldüğü, yüksek tarama hızlarının ise yüksek doluluk/verimlilik oranı için kullanılması gerektiği ve yaklaşık 4.4 mm³/s tarama verimliliğinde %99.4 oranında doluluk elde edildiği belirtilmiştir [40].

Sadece tarama hızı ve lazer gücünün tasarım değişkeni olarak tanımlanıp SLE ile üretilen Ti6Al4V malzemeli numunelerde yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliğe etkisi incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğünün tarama hızı ile doğru orantılı ve lazer gücü ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Gözeneklilik ise düşük lazer gücü bölgesinde (50-150 W) doğru orantılı iken yüksek lazer gücü bölgesinde (200-275 W) ters orantılı olarak gözlenmiştir. Ölçümler sonucunda, minimum gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğü için tarama hızının 850-1150 mm/s ve lazer gücünün 200-250 W aralığının optimum değerler olduğu belirlenmiştir. Optimum aralıktaki parametrelerle üretilen numunelerin testleri sonucunda, çekme dayanımı açısından büyük bir fark görülmemiştir [41]. Ek olarak, SLE ile üretilen Ti6Al4V numunelerin doluluk oranını maksimize etmek adına Taguchi yöntemi ile katman kalınlığı, tarama aralığı, tarama stratejisi ve doğrusal enerji yoğunluğunun optimum değerleri hesaplandığında, sonuca en önemli etkiyi toz kalınlığının yaptığı anlaşılmıştır [42]. Son olarak, SLE ile üretilen Ti6Al4V yapıların yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek adına lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığının tasarım değişkenleri olduğu optimizasyon problemi için 20 adet farklı parametre setinde üretimler yapılmıştır. Üretilen numunelerden ölçülen yüzey

pürüzlülüğü sonuçları kullanılarak tasarım değişkenleri ile ikinci dereceden bir ilişki oluşturulmuştur. Vekil model yöntemi ile optimum proses parametreleri hesaplanmıştır ve hesaplanan parametreler ile üretimler yapıp sonuçlar doğrulanmıştır. Sonuçlara göre, makine sağlayıcısının sunduğu parametrelere kıyasla yüzey pürüzlülüğü açısından daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir [43].

Proses parametrelerinin etkilerini hesaplamak adına maliyet etkin bir yöntem olarak sonlu elemanlar tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde, deney tasarımı ile belirlenen noktalarda üretim simülasyonu yapılarak amaç fonksiyonu hesaplanmaktadır, Amaç fonksiyonunun değerleri kullanılarak optimum proses parametrelerini hesaplamak diğer deney tabanlı yöntemlere göre hızlı ve maliyet etkin olmaktadır [44]. Sonlu elemanlar tabanlı çözümlerin yanı sıra, SLE ile üretilmiş Ti6Al4V yapıların doluluk oranını maksimize edecek optimum lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı değerleri deney sonuçlar kullanılarak oluşturulan derin öğrenme yöntemleri ile hesaplanmıştır. Optimum parametreler ile üretilen numunelerin doluluk oranı ölçümleri yapılarak derin öğrenme algoritması doğrulanmıştır [45]. Aynı zamanda, 316L yapıları için proses parametrelerinin etkileri, yapay sinir ağı yöntemi ile deneysel sonuçlar kullanılarak modellenmiştir. Böylelikle, istenen özellikleri sağlayacak şekilde parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilebilmekte ve oluşturulan model ile üretim süresinin hesaplanabilmektedir [46]. Proses parametrelerinin etkilerini incelemek ve optimizasyon işlemini gerçekleştirmek adına oldukça fazla sayıda deneysel çalışma yapmak gerekmektedir. Deneysel çalışmalar yerine sonlu elemanlar simülasyonları ile proses parametrelerinin etkileri incelenmekte ve elde edilen sonuçlar makine öğrenmesi teknikleri ile modellenabilmektedir. Makine öğrenmesi ile sonlu elemanlar tabanlı simülasyonların birleştirilmesi ile büyük veri oluşturmak için gereken süre oldukça azaltılmıştır ve elde edilen sonuçlarla, ek bir maliyet olmadan optimum parametreler belirlenmiştir [47].

Ek olarak, toz yataklı sistemler dışındaki eriyik yığıma modellemesi (ing. Fused Deposition Modelling-FDM), Stereolithografi (SLA), seçici lazer sinterleme (ing. Selective Laser Sintering-SLS) ve bağlayıcı püskürtme (ing. Binder Jetting-BJ) gibi diğer eklemeli imalat sistemleri kullanılarak tamamlanan proses parametre optimizasyonu çalışmaları Tablo 2.2'de belirtilmiştir. Tablo 2.2 incelendiğinde, amaç fonksiyonu olarak, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk, üretim süresi, mekanik özellikler (çekme, basma ve çarpışma özellikleri) ve destek yapıların kullanımı gibi

parametreler kullanılmıştır. Yöntem olarak da, Taguchi, ANOVA, genetik algoritma, yapay zeka gibi farklı yöntemler optimum sonuca ulaşmak için kullanılmıştır.

Tablo 2.2: Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde tamamlanan proses parametre çalışmaları

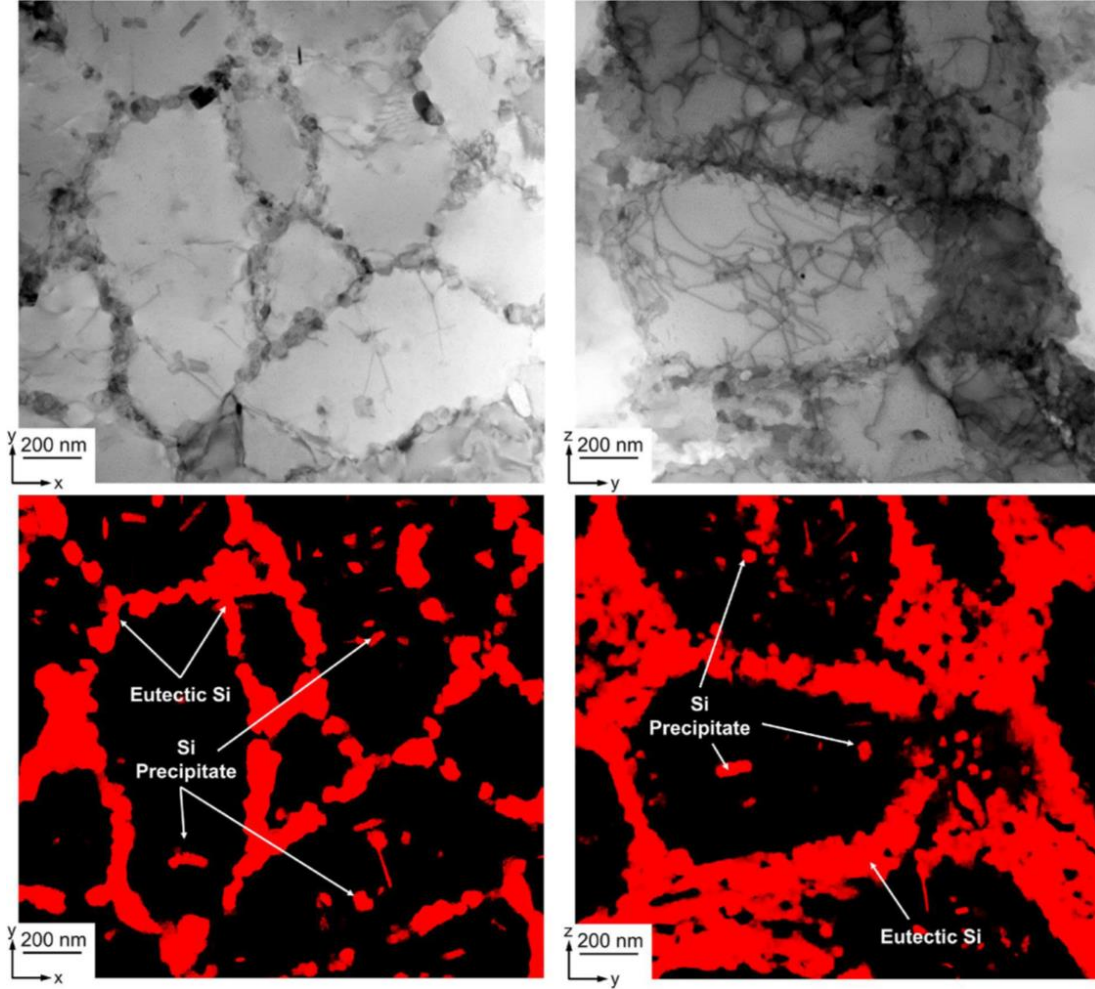
Yöntem	Tasarım Değişkenleri	Amaç Fonksiyonu	Kaynak
FDM	Katman kalınlığı, biriktirme hızı, tarama hızı, kontur kalınlığı, parça oryantasyonu	Yüzey pürüzlülüğü, mekanik özellikler, boyutsal doğruluk, destek yapı kullanımı, üretim süresi	[48–51]
SLA	Katman kalınlığı, tarama aralığı, kütleme aralığı, kütleme derinliği	Yüzey pürüzlülüğü	[52]
SLS	Katman kalınlığı, lazer gücü, tarama aralığı	Yüzey pürüzlülüğü, mekanik özellikler	[53,54]
BJ	Katman kalınlığı, İnfiltrasyon kalınlıkları, parça konumu	Boyutsal doğruluk, eğilme dayanımı	[55]

2.4. AlSi10Mg Malzemesinin Mukavementlendirme Mekanizmaları

Eklemeli imalat ile üretim sırasındaki erime ve katılaşma sayesinde oluşan mikroyapı özellikleri, döküm ve dövme ile üretilen yapıların mikroyapısına göre farklıdır. Mikroyapının farklı olması yapının mekanik özelliklerini de etkilemektedir [56]. Al-Si alaşımlarının içerisindeki Si fazının iyileştirilmesi için genellikle, elemental ekleme veya hızlı soğutma olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır [57–59]. SLE yönteminde, kısa bir sürede küçük bir alanı lazer ile ürettiğinde dolayı yüksek ısınma ve soğuma oranları (10^3 - 10^8 °C/s) görülmektedir. SLE ile üretilen Al alaşımlarının, hızlı soğuma dolayısıyla oldukça sıkı bir mikroyapıya sahiptir ve döküm ile üretilenlerin aksine, dayanımının ve sünekliğinin aynı anda iyileştirilebileceği belirtilmiştir [60,61]. Sıkı Si çöktelleri ve plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketini engelleyen ötektik Si sınırlarının, eklemeli imalat ile üretilmiş Al alaşımlarının yüksek dayanıma sahip olmasının nedenlerinden oldukları belirtilmiştir [62]. SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapılarının yüksek dayanıma sahip olmasının temelinde Si çöktellerinin katkı sağladığı Orowan mukavementlendirme mekanizması ve ötektik Si hücre sınırlarının katkı sağladığı Hall-Petch mukavementlendirme mekanizması olduğu raporlanmıştır [63,64].

SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapılarının detaylı karakterizasyonu yapıldığında, ötektik Si sınırlarının ve Si çöktellerinin olduğu gözlenmiştir (bkz. Şekil 2.7) [65]. Hızlı soğuma ve üretim esnasında termal gerilmeler nedeniyle Si ağının olduğu mikroyapı

oluşmuştur [66]. Şekil 2.7 incelendiğinde, bariyer gibi davranan ötektik Si ve Si çökeltilerinin etrafında fazla sayıda dislokasyon gözlenmektedir. Deformasyon esnasında dislokasyon birikmesi yapının dayanımının artması anlamına gelmektedir.

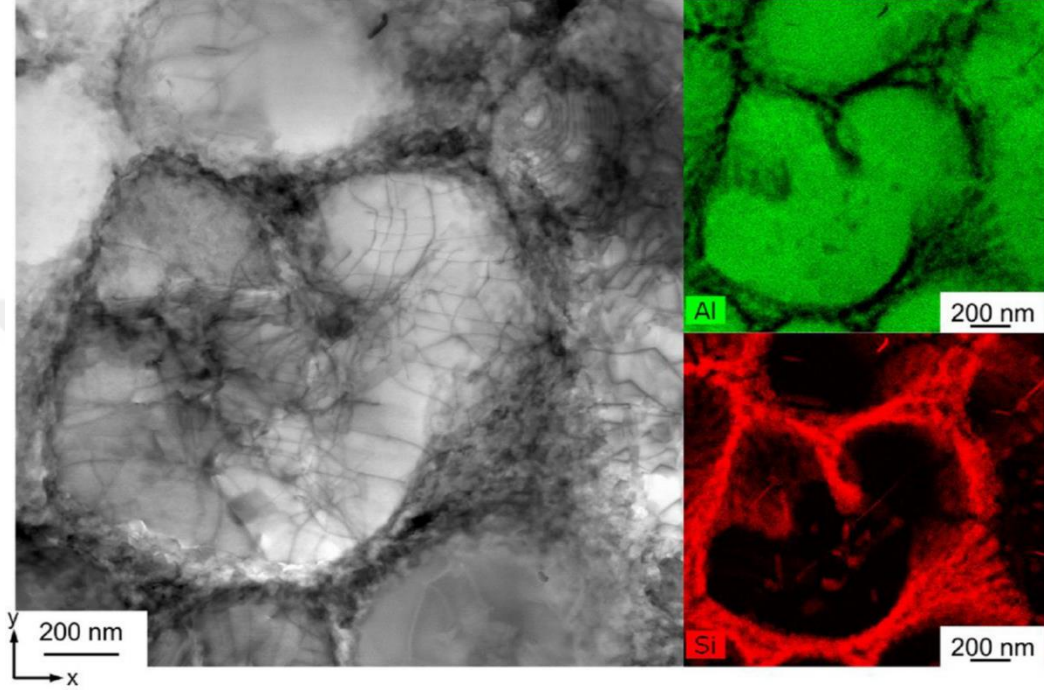


Şekil 2.7: Dikey (sol) ve Yatay (sağ) olarak üretilen numunelerin mikroyapı görüntüleri ve EDS elemental analiz sonuçları [65]

Üretimde kullanılan tozların tekrar kullanılmasının etkilerinin incelendiği çalışmada, SLE ile AlSi10Mg malzemesi ile numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin nano seviyede mikroyapı analizleri yapılmıştır. Mikroyapı incelendiğinde, ötektik Si ve Si çökeltilerinin deformasyona karşı koydukları, dislokasyon birikmesi ile anlaşılmıştır (bkz. Şekil 2.8). Si çökeltilerinin Orowan mekanizmasına, ötektik Si hücre boyutlarının Hall-Petch mekanizmasına ve önceden var olan dislokasyon ağının dislokasyon sertleştirme mekanizmasına katkı sunduğu belirlenmiştir. Si çökelti boyutu, ötektik Si hücre boyutu ve dislokasyon yoğunluğu ölçülerek ilgili mukavemetlendirme mekanizmaları hesaplanmıştır. Çalışmada, AlSi10Mg

numunelerinin akma dayanımı Denklem (2.4)'teki gibi modellenmiştir. Denklem (2.4) ile hesaplanan akma dayanımı ile çekme testleri sonucunda hesaplanan akma gerilmeleri arasında %5.5 oranında bir farklılık gözlenmiştir ve oluşturulan model doğrulanmıştır [65].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \sigma_{\text{Hall-Petch}} + \sigma_{\text{Orowan}} + \sigma_{\text{dislokasyon}} \quad (2.4)$$

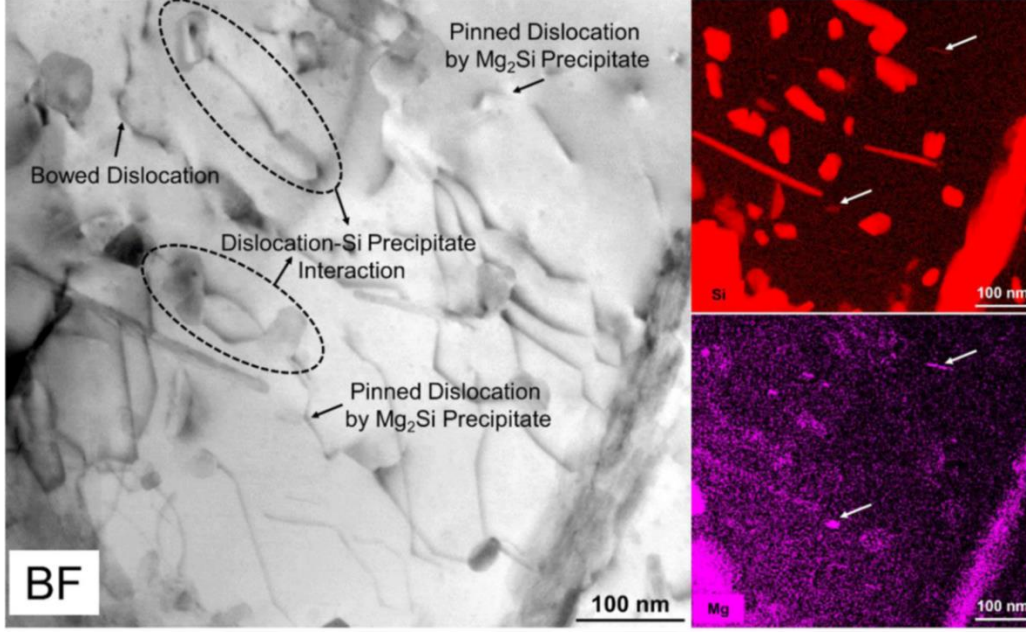


Şekil 2.8: Numunenin mikroyapı görüntüsü ve elemental analiz sonucu [65]

Dinamik yüklemelere maruz kalan yapılarda, üretim açılarının mukavemetlendirme mekanizmalarına etkisinin incelendiği çalışmada, SLE ile AlSi10Mg numuneler aynı proses parametreleri ile üretilmiştir. Numunelerin mikroyapı analizleri ile belirlenen ötektik Si hücre boyutu, Si çökelti boyutu ve dislokasyon yoğunlukları sırasıyla Hall-Petch, Orowan ve dislokasyon sertleştirme mekanizmalarına girdi yapmıştır. Dikey olarak üretilen numunelerde, ötektik Si hücre boyutu yatay numunelere kıyasla daha büyük ölçülmüşken, Si çökelti boyutu daha küçük ölçülmüştür. Dislokasyon yoğunlukları kıyaslandığında, dikey numunelerde dislokasyon yoğunluğu daha fazla olarak gözlenmiştir. Ölçülen deneysel sonuçlara göre hesaplanan akma dayanımları karşılaştırıldığında ise sonuçların aynı çıktığı gözlenmiştir [67].

SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapılarda Si çökeltilerinin yanı sıra Mg₂Si fazının da olduğu gözlenmiştir [68]. SLE ile üretilmiş deforme olmuş AlSi10Mg yapıları incelendiğinde, Si çökeltilerine ek olarak Mg₂Si çökeltilerinin de dislokasyonların

hareketine engel oldukları belirlenmiştir (bkz. Şekil 2.9). Üretilen numunelerin hücre boyutu, Si çökelti boyutu ve dislokasyon yoğunlukları ölçülerek hesaplanan akma dayanımı ile çekme testleri ile hesaplanan akma dayanımı arasında yaklaşık 13 MPa fark gözlenmektedir. Bu farkın nedeni, Mg_2Si çökeltilerinin oluşumları olarak değerlendirilmektedir [69].



Şekil 2.9: Deforme olmuş AlSi10Mg yapısının mikroyapı görüntüsü ve karşılık gelen Si ve Mg elemental analizleri [69]

AlSi10Mg tozu üretimi esnasında nano boyutta var olan toz içeriğine karıştırılan %7 oranında TiB₂ ile SLE yöntemi kullanılarak üretimler yapılmıştır. Üretilen numunelerin mikroyapı analizleri ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri sonucunda, tane ve hücre sınırlarında düzenli bir şekilde nano TiB₂ dağılımı olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda, TiB₂ ve Si çökeltilerinin Al matrisi ile uyumlu bir arayüzey oluşturduğu gözlenmiştir ve bu da yapının daha da güçlenmesini sağlamaktadır. Çekme testleri sonucunda, TiB₂ karıştırılmış AlSi10Mg yapısının çekme dayanımının 530 MPa ve sünekliğinin %15.5 olarak hesaplanması ile diğer Al-Si alaşımlarının özelliklerine göre oldukça iyi özellikler gösterdiği anlaşılmıştır. Dayanımın artmasına neden olan ana mekanizmalar Hall-Petch, yük mukavemet (ing. loading-bearing) ve Orowan mekanizmalarıdır. Sünekliğin artmasının nedeni olarak ise TiB₂ fazının eklenmesi ile tane sınırlarının değişmesi olarak belirlenmiştir [64].

3. METODOLOJİ

3.1. Eklemeli İmalat ile Üretim

Çalışmanın amaçlarından biri proses parametrelerinin etkilerini incelemek olduğundan, farklı proses parametresi kombinasyonlarında üretimler yapılmıştır. Öncelikle, etkileri incelenecek proses parametreleri olarak eklemeli imalat yönteminde kullanılan ana parametreler olan lazer tarama hızı ve lazer gücü belirlenmiştir [70]. Proses parametrelerinin mikro mekanik özelliklere etkilerini incelemek adına 10x10x10 mm boyutlarına sahip 16 adet numune 400 W Ytterbium (Yb) fiber tek lazer sistem özelliğine sahip Concept Laser M2 Cusing makinesi kullanılarak üretilmiştir. Üretimde kullanılan AlSi10Mg tozunun kimyasal içerik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir [71].

Tablo 3.1: Üretimde kullanılan AlSi10Mg tozunun kimyasal içeriği

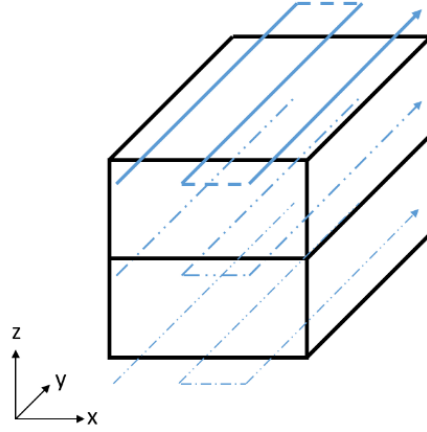
İçerik	Si	Mg	Fe	Al
Yüzdesel Değer (%)	9.0-11.0	0.20-0.45	0-0.55	Dengeli

Belirlenen proses parametrelerinin etkilerini sistematik olarak incelemek için tam faktöriyel tasarımı (ing. full factorial design-FFD) deney tasarımı yöntemi kullanılarak Tablo 3.2’de belirtilen 16 farklı parametre setinden oluşan deney noktaları belirlenmiştir. Tablo 3.2 incelendiğinde, lazer gücü olarak 100-370 W aralığında, tarama hızı olarak 800-2000 mm/s aralığında değerler aldığı görülmektedir.

Tablo 3.2: Üretilen numunelerin proses parametre setleri

	Lazer Gücü 100 W	Lazer Gücü 190 W	Lazer Gücü 280 W	Lazer Gücü 370 W
Tarama Hızı (mm/s)	800	800	800	800
	1200	1200	1200	1200
	1600	1600	1600	1600
	2000	2000	2000	2000

Argon atmosferi altında yapılan üretimde kullanılan diğer proses parametreleri Tablo 3.3'te belirtilmiştir ve tüm üretim süresince sabit tutulmuştur. Ek olarak, sadece lazer gücü ve tarama hızının etkilerini gözlemlenmek amaçlandığı için numunelerin üretiminde tarama stratejisi ve kontur taraması kullanılmamıştır. Lazer taraması, numunenin her katmanı için aynı olup bir kenarından diğer kenarına kadar kesintisiz olarak devam etmektedir (bkz. Şekil 3.1). Bu çalışma kapsamında, tüm numuneler üretildikten sonra işlem görmemiş (ing. as-built) olarak incelenmiştir.



Şekil 3.1: Üretim esnasında kullanılan lazer tarama yolu

Tablo 3.3: Üretimde kullanılan diğer parametreler

Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Aralığı (ing. Hatch Distance) (μm)	Spot Genişliği (μm)	Ön Isıtma Derecesi ($^{\circ}\text{C}$)
25	112	120	200

Eklemeli imalat sırasında enerji girişinden dolayı oluşan termal dağılım mikroyapı ve mekanik özellikleri belirlemektedir [72–75]. Enerji girişini belirlemek adına genellikle hacimsel enerji yoğunluğu kullanılmaktadır [76–78]. Hacimsel enerji yoğunluğunun formülü Denklem (3.1)'de belirtilen şekilde tanımlanmıştır:

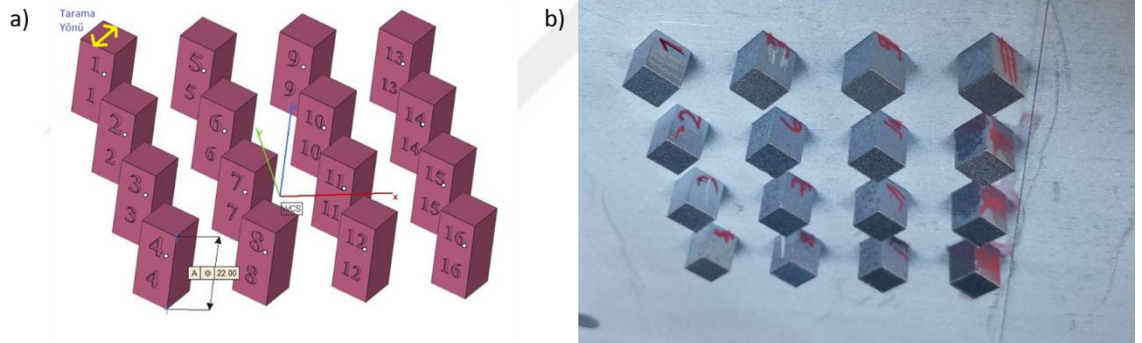
$$ED = \frac{P}{vht} \quad (3.1)$$

Burada, ED hacimsel enerji yoğunluğu, P lazer gücü, V tarama hızı, h tarama aralığı ve t katman kalınlığıdır [79]. Üretilen numunelerin enerji yoğunlukları Tablo 3.4'te belirtilmiştir ve 17-165 J/mm³ aralığında değiştiği görülmektedir.

Tablo 3.4: Numunelerin enerji yoğunluk değerleri

	Lazer Gücü 100 W	Lazer Gücü 190 W	Lazer Gücü 280 W	Lazer Gücü 370 W
Tarama Hızı 800 mm/s	44.64	29.76	22.32	17.86
Tarama Hızı 1200 mm/s	84.82	56.55	42.41	33.93
Tarama Hızı 1600 mm/s	125.00	83.33	62.50	50.00
Tarama Hızı 2000 mm/s	165.18	110.12	82.59	66.07

Numunelerin konumlandırılması, proses parametrelerinin atanması ve tarama stratejilerinin belirlenmesi gibi üretime hazırlık işlemleri Materialise Magics programı kullanılarak yapılmıştır. Üretim için hazırlanan ve üretilen numuneler sırasıyla Şekil 3.2'de belirtilmiştir. Ek olarak, üretilen numunelerin tabladan ayırma işlemleri Mitsubishi Electric MV2400R tel erozyon makinesi kullanılarak tamamlanmıştır.



Şekil 3.2: a) Üretim öncesi b) Üretim sonrası numunelerin gösterimi

Belirlenen proses parametrelerinin etkilerini incelemek adına 16 adet numunenin enerji yoğunluk değerleri 17.86-165.18 J/mm³ aralığında olduğu için bazı numunelerin mikroyapı analizlerinin yapılmasının mümkün olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle, etkileri incelenecek parametre matrisinin sayısı 16'dan 9'a düşürülmüştür ve değerler Tablo 3.5'te belirtilmiştir. Sonuç olarak, lazer gücü için 190-370 W, tarama hızı için 1200-2000 mm/s ve enerji yoğunluğu için 33.93-110.12 J/mm³ aralıkları çalışma kapsamında incelenmiştir.

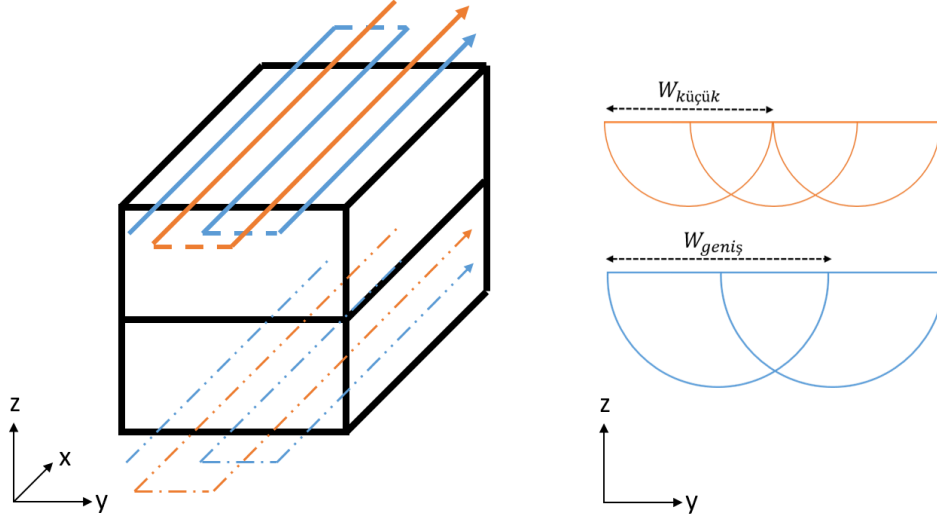
Tablo 3.5: Çalışma kapsamında incelenen numunelerin proses parametre ve enerji yoğunluğu değerleri

Numune Numarası	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
1	190	1200	56.55
2	280	1200	83.33
3	370	1200	110.12
4	190	1600	42.41
5	280	1600	62.50
6	370	1600	82.59
7	190	2000	33.93
8	280	2000	50.00
9	370	2000	66.07

3.2. Mikroyapı ve Mekanik Özellik Analizleri

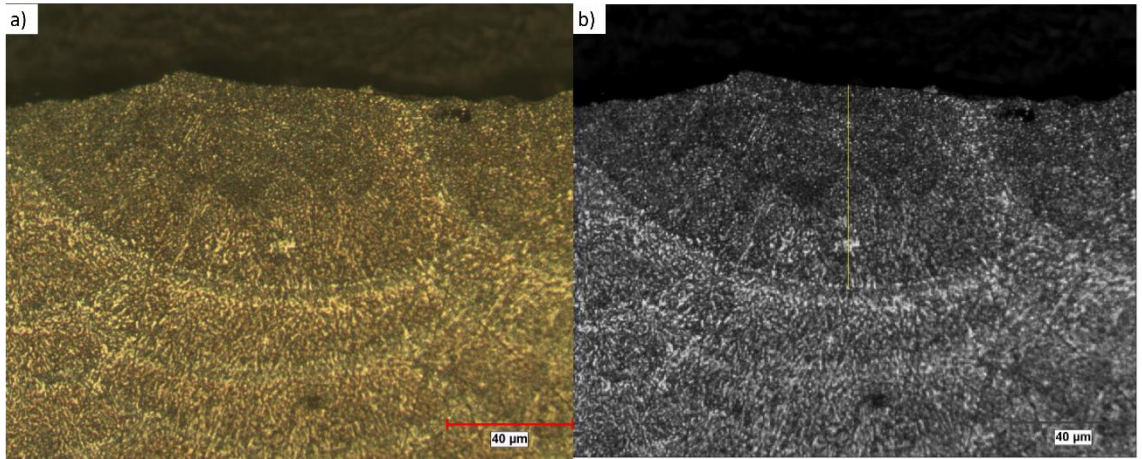
3.2.1. Eriyik Havuz Ölçümleri

Literatürde eriyik havuz ölçümleri için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi, tek katman olarak üretilen yapının ölçümü yapılarak çok katmanlı durumuna ekstraspolasyon yapılmasıdır [80–83]. İkinci yöntem olarak ise, çok katmanlı üretilen yapıların alt ve ara katmanlarından eriyik havuzun şekli tarama stratejisinden dolayı ölçümü doğru yapılamadığından en üst katmanından ölçüm alınmaktadır [84–87]. Bu çalışma kapsamında, üretim süresini etkileyen parametre olan lazerin tarama sayısı (ing. number of passes) eriyik havuz büyüklüğüne bağlıdır, proses parametrelerine bağlı olarak daha büyük boyuta sahip eriyik havuzlu yapılar için tarama sayısı daha az olmaktadır (bkz. Şekil 3.3). Tarama sayısına bağlı olarak üretim süresini modellemek adına bu çalışma kapsamında, çok katmanlı olarak üretilen numunelerin en üst katmanından eriyik havuz ölçümleri yapılmıştır. Eriyik havuz görüntüleri alınmadan önce Keller ayırıcı (ing. Keller's reagent) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlanmış numuneler için Nikon MA100 optik mikroskobu kullanılarak en üst katmanından eriyik havuz görüntüleri elde edilmiştir.

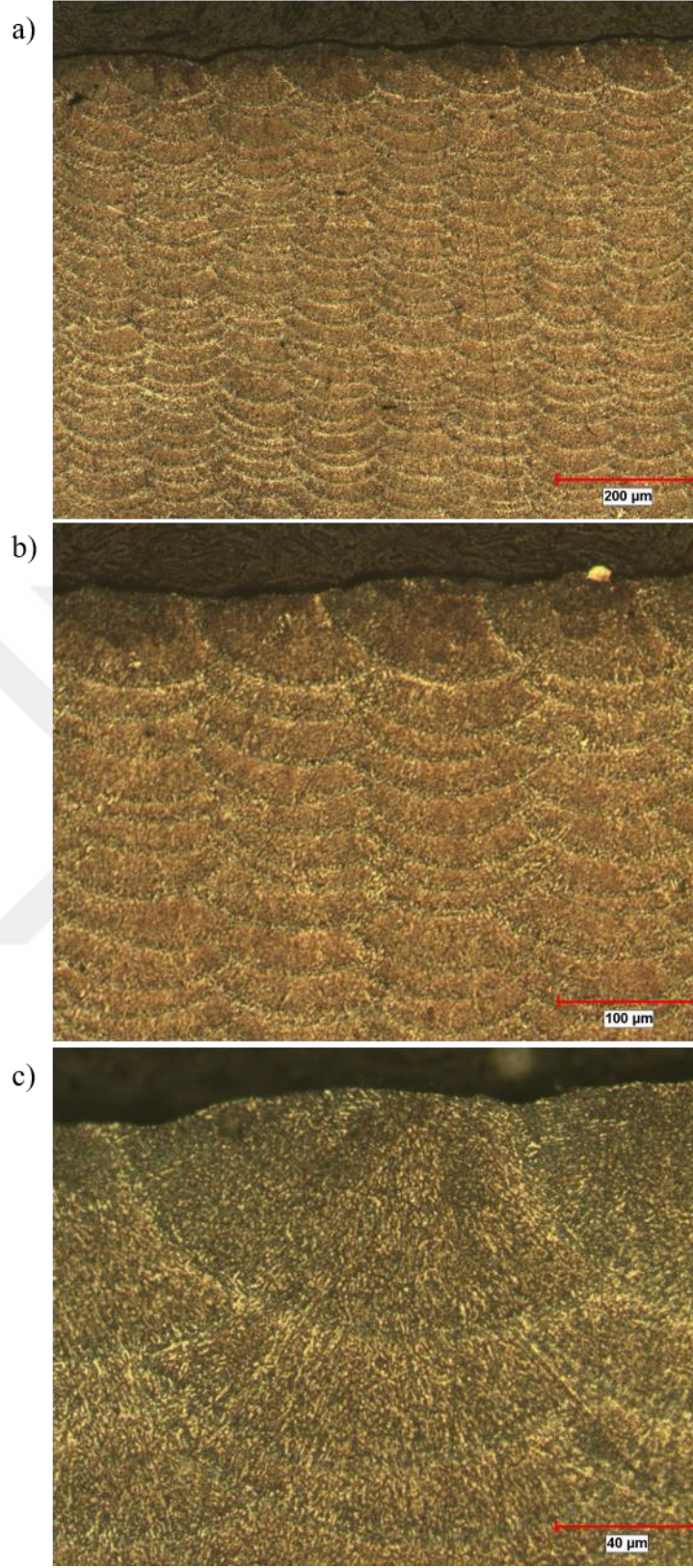


Şekil 3.3: Eriyik havuz büyüklüğüne göre değişen tarama sayısının jenerik gösterimi

Tarama aralığı nedeniyle eriyik havuzlar birbirleriyle kesişmektedirler ve bu nedenle direkt olarak eriyik havuzun genişliğinin ölçülmesi çoklu taramaya (ing. multi bead) sahip numuneler için mümkün olmamaktadır. Optik mikroskop ile dağlanmış numunelerden alınan görüntüler için ImageJ programı kullanılarak filtreleme işlemi yapılarak eriyik havuzun üst sınırına çekilen çizgi ile eriyik havuz derinliği (ing. melt pool depth) ölçülmüştür (bkz. Şekil 3.4). Her numune için 100, 200 ve 500x yakınlaştırma ile elde edilen optik mikroskop görüntüleri kullanılarak filtreleme ve derinlik ölçümü işlemleri tamamlanmıştır. Şekil 3.5'te bir numuneye ait farklı yakınlaştırma değerleri ile elde edilen görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.4:a) 500x yakınlaştırma ile numunenin en üst katmanından alınan görüntü b) alınan görüntünün filtrelenmesi ve ölçüm alınması



Şekil 3.5: En üst katmandan alınan optik mikroskop görüntüleri a)100x b)200x c)500x

Eriyik havuz modelleme çalışmaları için kullanılan Rosenthal modelinden türetilen eriyik havuz genişliği Denklem (3.2)'de belirtildiği gibi formülize edilmiştir [88].

$$W \approx \sqrt{\frac{8 \alpha P}{\pi e \rho C_p V (T_m - T_0)}} \quad (3.2)$$

Burada, ρ özkütle, C_p özgül ısı, α soğurma katsayısı, T_m erime sıcaklığı ve T_0 en üst yüzeyden yeteri kadar uzaktaki bir noktanın sıcaklığıdır.

Proses parametrelerinin ve dolayısıyla termal davranışın değişmesinden dolayı eriyik havuzun boyutu ve şekli değişmektedir. Parametrelere göre değişebilen genişlik/derinlik oranı 0.5'in altında olduğunda eriyik havuz yarı-küresel olarak kabul edilir. Genişlik/derinlik oranı 0.5'in üzerinde olduğunda ise anahtar deliği modundan (ing. key-hole mode) eriyik havuz eliptik bir şekil almaktadır ve yapı içerisinde kusurların (ing. defect) oluştuğu gözlenmiştir [89–91]. Bu çalışma kapsamında, yapının içerisinde oluşan kusurlar modellemeye dahil edilmediğinden ve Rosenthal modeli kullanıldığından dolayı eriyik havuz yarı-küresel kabul edilmiştir [92].

3.2.2. Hücre Boyutu Ölçümleri

Yüksek soğuma hızı ile üretilen AlSi10Mg malzemesinin mikroyapısı, başlıca Al-Si alaşımları içeren döküm ile üretilen alüminyum yapılara göre farklıdır [93]. Döküm ile üretilen Al-Si alaşımları daha kaba mikroyapıya sahiptir ve ikincil dendrit yapı boşlukları mikroyapıda gözlenmektedir [94]. Lazer ile eritilerek yüksek katılma hızlarında oluşturulan AlSi10Mg yapılarında ise mikroyapı daha sıktır ve silikon alüminyum hücre sınırlarına birikmektedir [36,37,95]. Mikroyapıyı etkileyen soğuma hızı Rosenthal model kullanılarak Denklem (3.3)'te belirtildiği gibi elde edilebilmektedir [95].

$$\dot{T} = 2\pi k (T_{katı} - T_0) (T_{sıvı} - T_0) \frac{v}{Q_p} \quad (3.3)$$

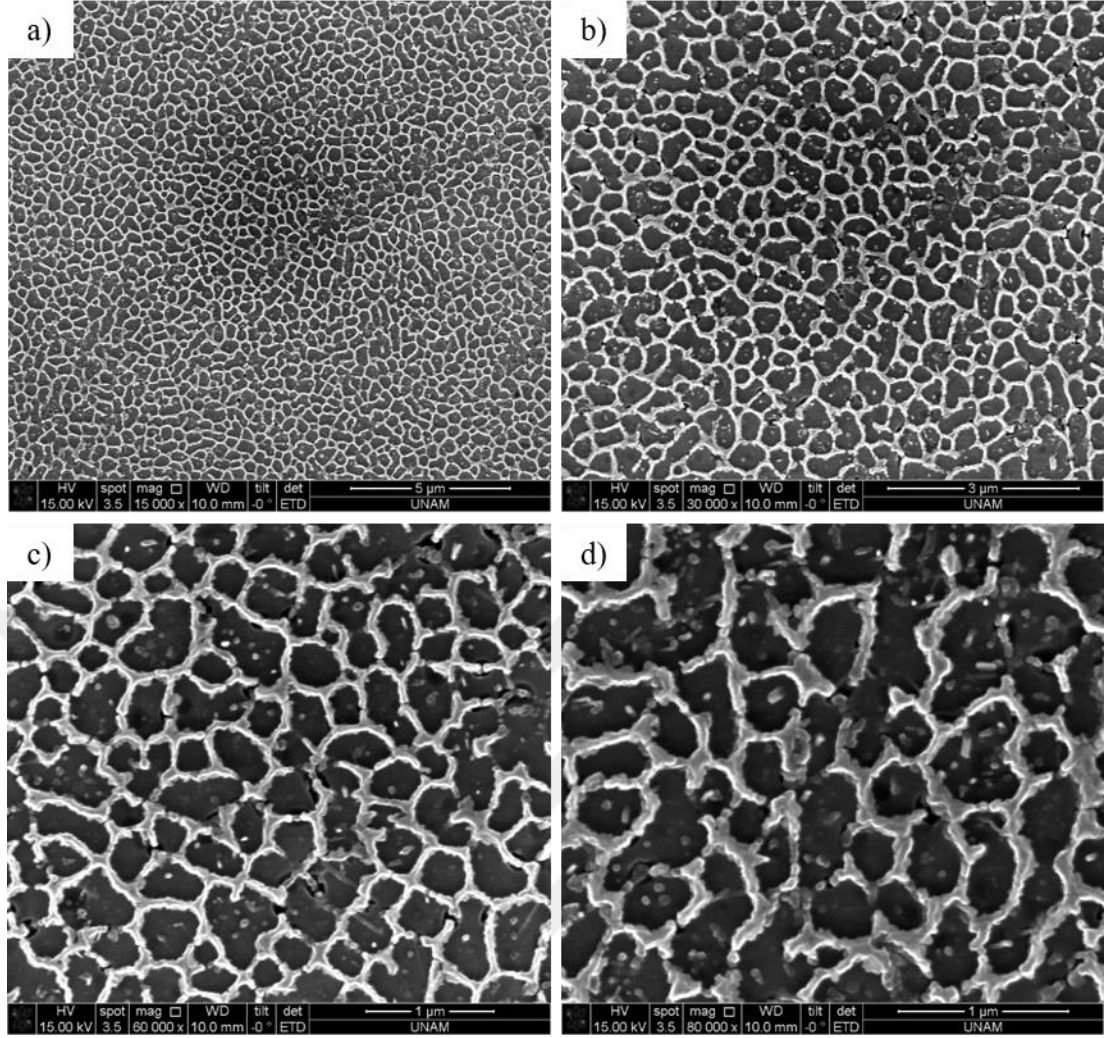
Burada, \dot{T} soğuma hızı, $T_{katı}$ ve $T_{sıvı}$ katılma ve sıvılaşma sıcaklıkları, T_0 ortam sıcaklığı, v tarama hızı ve Q_p absorbe olan lazer gücüdür. Denklem (3.3)'ten anlaşılacağı üzere, ısı girdisi (Q_p/v) değiştirilerek mikroyapı manipüle edilebilmektedir. Hızlı soğuma hızları ile üretilen alüminyum alaşımları için Denklem (3.4)'teki eşitlik kullanılmaktadır:

$$\lambda = a_1 (\dot{T})^{-n} \quad (3.4)$$

Burada, λ hücre boyutu, a_1 ve n eğri uydurma (ing. curve fitting) katsayılarıdır. n katsayısı, kullanılan soğuma hızı hesaplama yöntemine göre 0.3 ile 0.5 arasında değerler alabilmektedir [96]. Ek olarak, farklı soğuma hızlarında üretilen Al alaşımlarının hücre boyutları ölçülüp, soğuma hızı ile hücre boyutları arasındaki ilişki üstel bir fonksiyon ile temsil edildiğinde, a_1 ve n katsayıları sırasıyla 43.2 ve 0.324 olarak hesaplanmıştır ve önceki çalışmalarla uyumlu olduğu anlaşılmıştır [97,98]. Aynı zamanda, bu katsayılarla hesaplanan hücre boyutlarının Zolotorevsky vd.'nin yaptığı çalışmaya göre yaklaşık 2 kat küçük hücre boyutu tahmini yaptığı belirlenmiştir [99]. Ek olarak, SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapıları için hücre boyutu ölçümü yapıldığında Mathja'nın bulduğu katsayılarla hesaplanan hücre boyutlarıyla benzer olduğu görülmüştür [95]. Tek katman olarak SLE ile üretilen AlSi10Mg yapılarında ölçülen hücre boyutu sonuçları kullanıldığında ise $n=0.27$ olarak hesaplanmıştır [81].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, eriyik havuz içerisindeki ötektik Si hücre boyutları daha sıkı bir yapı olduğu için eriyik havuz sınırlarında oluşan ötektik Si hücre boyutundan daha küçük olduğu tespit edilmiştir. SLE yöntemi kullanılarak farklı proses parametreleri ile üretilen AlSi10Mg yapıların hücre boyutları incelendiğinde, eriyik havuz içerisinde 400-700 nm arasında iken, eriyik havuz sınırlarında 800-1800 nm arasında olduğu gözlenmiştir [100]. Farklı tarama stratejileri ile üretilen AlSi10Mg yapılarında eriyik havuz içerisinde hücre boyutları ölçüldüğünde 400-700 nm aralığında olduğu görülmüştür [36]. SLE ile üretildikten sonra işlem görmemiş AlSi10Mg yapılarının mukavemetinin daha yüksek olduğu belirten çalışmada, yaklaşık 500 nm boyutunda hücre boyutu ve 10-20 nm aralığında Si çökelti oluşumu gözlenmiştir [62].

Bu çalışma kapsamında, 9 farklı proses parametre seti ile çok katmanlı olarak üretilen ve üretildikten sonra işlem görmemiş yapıların hücre boyutlarını ölçmek adına öncelikle Keller ayırıcı ile dağlama işlemi yapılmıştır. Ardından, Quanta 400F Field Emission marka taramalı elektron mikroskobu (TEM) (ing. scanning electron microscope - SEM) ile belirli büyütmelemlerle mikroyapı görüntüleri alınmıştır (bkz. Şekil 3.6). Yapıyı daha doğru temsil ettiği için eriyik havuzun içerisinde alınan görüntüler yardımıyla hücre boyutu hesaplaması yapılırken 60k yakınlaştırma ile elde edilen görüntüler kullanılmıştır.



Şekil 3.6: TEM ile farklı büyütmelerle elde edilmiş mikroyapı görüntüleri a) 15kX b) 30kX c) 60kX ve d) 80kX

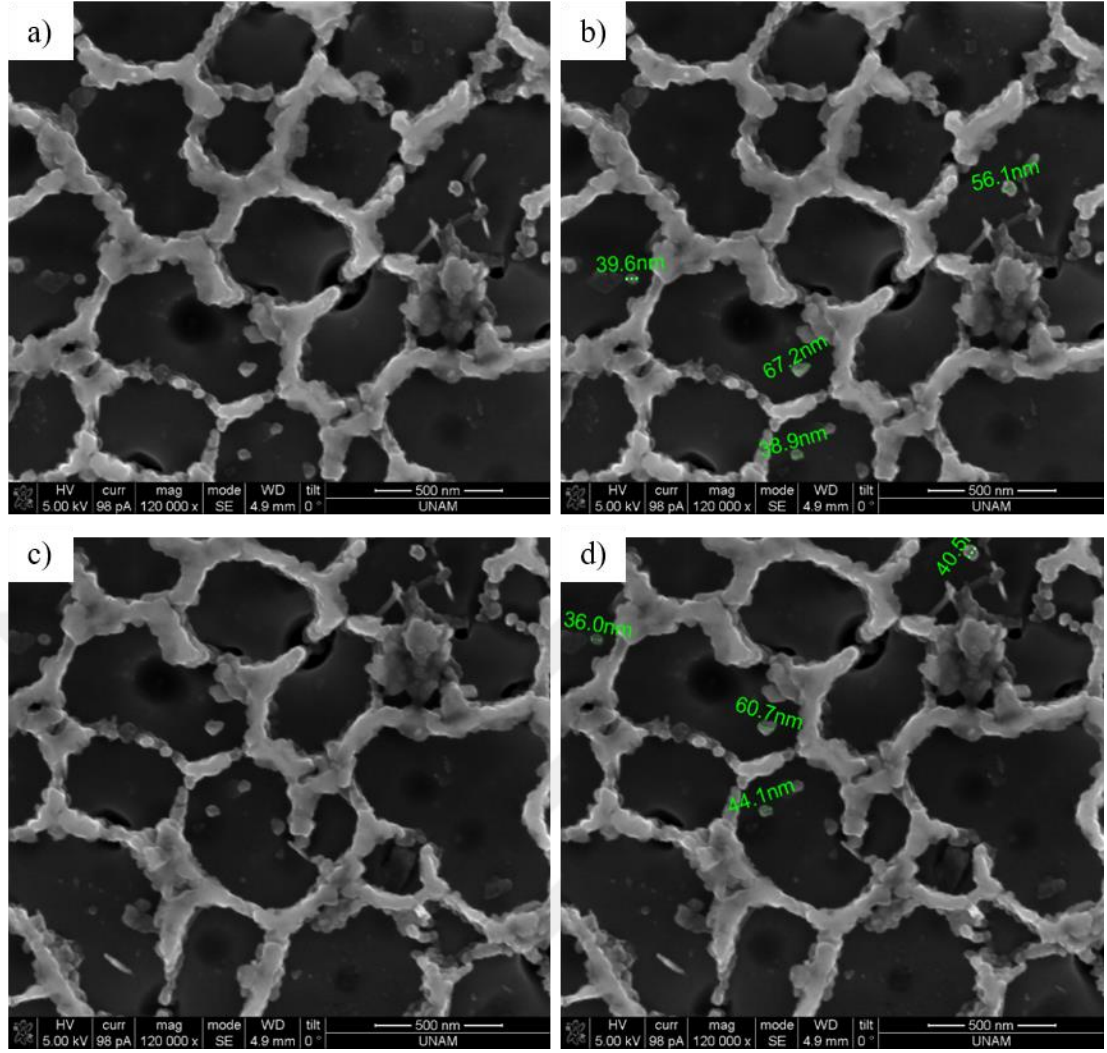
3.2.3. Si Çökelti Ölçümleri

SLE ile üretimde hızlı soğuma ve katılaşma nedeniyle, üretildikten sonra işlem görmemiş AlSi10Mg yapılarıdaki alüminyum matris içerisinde sıkı Si ağı görülmektedir ve ötektik Si modifiye edilerek mekanik özellikler iyileştirilebilmektedir [101,102]. Soğuma hızının yaklaşık 10^6 °C/s olduğu yüksek soğuma hızlarına sahip üretimlerde oluşan Si parçacıkları dislokasyon hareketini engeller ve böylelikle mekanik performansın artmasını sağlar [63,64]. Üretim açısının etkileri incelendiğinde, üretim tablasına yatay olarak üretilen numunelerde dikey olarak üretilen numunelere göre oluşan Si çökelti boyutunun daha az ve dislokasyon yoğunluğunun ise daha fazla olduğu gözlenmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun daha yüksek olması ile yatay olarak üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin de daha yüksek çıktığı test sonuçları ile belirtilmiştir [65]. Isıl işlem uygulanması ile Si

çökeltilerinin dağılımı ve büyüklüğü değişebilmektedir. Çözündürme ısı işlemi sonucunda alüminyum matrsten ayrılarak Si parçacıklarının oluşumunun gözleendiği yapıda çözündürülen ortamın sıcaklığının artmasıyla, Si parçacıklarının büyüklüğünün arttığı gözlenirken, sayısının azaldığı belirlenmiştir. Aynı zamanda, ısı işlemle çekme mukavemetinin azaldığı görülürken, gerinim değerlerinin arttığı belirlenmiştir [101,103]. Çözündürme ısı işleminin uygulanma süresinin uzatılması ile Si parçacıklarının boyutunun arttığı ve sertlik değerinin de arttığı gözlenmiştir [104]. SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapılarına tavlama ve çözündürme ısı işlemi uygulandığında, tavlama ısı işlemi sonucunda Si parçacıklarının boyutunun çözündürme sonrasındaki sonuçlara göre daha düşük olduğu ve sayısal yoğunluğunun daha yüksek olduğu belirlenirken çekme mukavemetinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir [66]. Üretim ortamının sıcaklığının etkisi incelendiğinde, sıcaklık arttıkça Si çökeltilerinin boyutunun ve hacimsel oranının arttığı görülürken akma dayanımının azaldığı test sonuçları ile belirlenmiştir [105]. Eriyik havuz içerisi, sınırları ve ısıdan etkilenen bölgenin termal koşulları aynı olmadığı için mikroyapı ve mekanik özellikler de farklılık göstermektedir. Eriyik havuz içerisinden ısıdan etkilenen bölgeye doğru gidildikçe Si çökeltilerinin boyutunun arttığı ve sertlik değerinin düştüğü gözlenmiştir [106].

Bu çalışma kapsamında, 9 farklı numune seti ile üretilen ve üretildikten sonra işlem görmemiş numunelerde oluşan Si çökeltileri incelenmeden önce Keller ayırıcı ile dağlama işlemi uygulanmıştır. Görüntü almak için hazırlanan numunelerin eriyik havuzunun içerisinden FEI Nova NanoLab 600i marka odaklanmış iyon ışını (ing. focused Ion beam - FIB) taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı görselleri elde edilmiştir. Aynı zamanda, cihazın ölçüm aracı kullanılarak Si çökeltilerinin boyutları ölçülmüştür.

Şekil 3.7’de örnek olarak elde edilen mikroyapı görselleri ve ölçüm aracı kullanılarak boyutu ölçülen Si çökeltileri belirtilmiştir.



Şekil 3.7: a, c) TEM ile alınan görüntüler ve b, d) ölçülen Si çökeltileri

3.2.4. Nano-İndentasyon Testleri

Eklemeli imalat ile üretilen metallerin mekanik özelliklerini elde etmek için ASTM E8 standardına uygun olarak çekme testlerinin yapılması gerekmektedir [107,108]. Çekme test yönteminin çokça kullanılmasına ve sonuçlarının daha güvenilir olmasına rağmen, sertlik testleri tahribatsız test yöntemi olmasından ve çok daha hızlı sonuç sağlamasından ötürü endüstride kullanılmaya başlanmıştır [109].

Yapının sertlik profili, eriyik havuz içerisinde, eriyik havuz sınırlarında ve ısıdan etkilenen alanda farklılık göstermektedir ve ısıdan etkilenen bölgede eriyik havuz sınırı ve içerisine göre daha düşük değerler almaktadır. Üretilikten sonra işlem görmemiş numuneler için sertlik değerinin eriyik havuz içerisinden ısıdan etkilenen alana doğru gidildikçe 1.52 GPa değerinden 1.35 GPa değerine düştüğü nano-indentasyon testleri ile gözlenmiştir [106]. Aboulkhair, çok katmanlı numuneler için

proses parametrelerinin değişmesi sonucunda sertlik değerinin 1.70-1.82 GPa aralığında değiştiiğini saptamıştır [80]. Zhuo vd., ısıtılmanın mekanik özelliklere etkisini incelemiştir ve üretildikten sonra işlem görmemiş numuneler için NI sertlik testleri ile ölçülen sertlik değerlerinin 2.098 GPa değerinden 1.456 GPa değerine düştüğünü belirtmiştir [110]. Literatürdeki çalışmalar göstermiştir ki, eriyik havuzun içerisindeki davranış tüm yapıyı domine etmektedir [60,61,111].

Bu çalışma kapsamında, NI sertlik testi, eriyik havuzun içerisinde kalacak şekilde tek ekseninde (genişlik boyunca) hareket ederek 10 noktada gerçekleştirilmiştir. Test öncesinde numuneler, sırasıyla 180, 240, 320, 400, 600 ve 1000 kalınlık dereceli zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve ardından Struers marka parlatma makinesi ile parlatma işlemi tamamlanmıştır. Sertlik testleri ASTM E2546-07 standardına uygun olarak yapılmıştır [112]. Testler elmas Berkovich uçlu indentöre sahip CSM Instrument TTX-NHT nano sertlik cihazı kullanılarak maksimum kuvvet ve yükleme/yükün kaldırılması (ing. loading/unloading) oranı sırasıyla 20 mN ve 40 mN/dk olarak belirlenmiştir. NI sertlik testi ile elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri kullanılarak sertlik ve elastik modül hesaplanması için Oliver-Pharr yöntemi kullanılmıştır [113].

3.2.5. Sertlik-Akma Dayanımı İlişkisi

Literatürde, Al alaşımları için sertlik ile yapının mukavemeti arasında bir korelasyon kurulması için birçok çalışma yapılmıştır [109,114–116]. Tabor'un çalışmalarını [117] genişleterek geliştirilen akma dayanımı-sertlik ilişkisi Denklem (3.5)'te belirtilen şekildedir.

$$\sigma_y = \left(\frac{H}{3}\right) (B)^n \quad (3.5)$$

Burada, H MPa birimine sahip Vickers sertlik değeri, B deneysel çalışmalardan elde edilen malzeme sabiti (alüminyum alaşımları için B=0.1) ve n gerinim sertleşmesi katsayısıdır [116]. Alüminyum alaşımları için gerinim sertleşmesi katsayısı yaklaşık olarak 0.3 olarak kullanılmaktadır [118]. T5 ısıtılma işlem prosedürü uygulanmış AlSi10Mg malzemesi için n değeri 0.16 ile 0.22 arasında hesaplanırken, üretildikten sonra işlem görmemiş AlSi10Mg için 0.252 olarak hesaplanmıştır [63,119]. Ayrıca, çok aşamalı yükleme-yükün kaldırılması durumları için üretildikten sonra işlem görmemiş AlSi10Mg malzemesi için gerinim sertleşmesi katsayısı 0.36 olarak hesaplanmıştır [120].

3.3. Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO)

Probleminin Oluşturulması

3.3.1. Maliyet Modelinin Oluşturulması

Eklemeli imalat ile üretilecek bir parçanın üretim maliyeti iki ana gruba ayrılır: (i) malzeme ile ilgili maliyetler, (ii) süre ile ilgili maliyetler. Topoloji optimizasyonunda kullanılan tasarım değişkenlerinin optimum değerleri parçanın tasarımını belirlediği için, hem malzeme ile ilgili maliyetleri hem de süreye bağlı maliyetleri etkiler. Üretim esnasında kullanılan proses parametrelerinin optimum değerleri ise üretim süresini direkt olarak etkileyeceği için süreye bağlı maliyet kalemlerini etkilemektedir [121]. Malzeme ile ilgili maliyet unsurları, tasarım için gerekli olan malzeme miktarı ve üretim esnasında hata ile karşılaşılıp parçanın hurdaya çıkma oranıdır. Süre ile ilgili maliyet unsurları ise üretim yapılacak makinenin ücretinin ve bakım masraflarının ücretlendirme stratejisine eklenmesi, enerji tüketimi, harcanan işçilik ücreti ve süresidir. Maliyet fonksiyonu oluşturulurken yönetim ile ilgili maliyetler fonksiyona dahil edilmemiştir. Çalışma kapsamında kullanılan maliyet fonksiyonu Denklem (3.6)'da belirtilmiştir [70].

$$\text{Maliyet} = \frac{1}{(1-R)} \left[A_1 v + A_2 t + A_3 \int_{t_0}^t P dt + A_4 \right] \quad (3.6)$$

Burada, v parçanın toplam hacmi, P lazer gücü, t toplam üretim süresi, R üretilen parçanın kabul edilmeme oranı, A_1 malzeme maliyeti, A_2 üretim maliyeti, A_3 enerji tüketim maliyeti ve A_4 hurda ve üretim dışı elektrik kullanım maliyetidir. A_i katsayılarının formülleri Tablo 3.6'da belirtilmiştir.

Tablo 3.6: Maliyet fonksiyonu unsurlarının formülleri

	Açıklama	Birim	Formül
A_1	Malzeme maliyeti	\$/mm ³	$c_m \rho_m (1 - \eta)$
A_2	Üretim maliyeti	\$/saat	$\frac{c_y + c_b L}{LH} + c_i$
A_3	Enerji maliyeti	\$/Wsaat	c_e
A_4	Hurda ve üretime hazırlık elektrik maliyeti	\$	$c_m \rho_m \eta V_{env} + c_e P_0 t$

Tablo 3.6'da c_m birim malzeme maliyeti, ρ_m malzemenin özkütlesi, η hurda oranı, c_y yatırım maliyeti, c_b bakım maliyeti, L makinenin tahmini ömrü, H yıllık çalışma

süresi, c_i işçilik maliyeti, c_e enerji maliyeti, V_{env} üretim hacmi ve P_0 üretim başlayana kadar lazer çalışma gücüdür.

Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilecek bir parçanın üretim süresi Denklem (3.7) ile hesaplanmaktadır.

$$t_{\text{üretim}} = \int N \frac{1}{V_h} dV_{\text{env}} \quad (3.7)$$

Burada, N üretim yönünün z-ekseni olarak kabul edilmesi sonucu (bkz. Şekil 3.3) y-ekseninde birim uzunluk için tarama sayısı, V tarama hızı ve h tarama aralığıdır. Boyutları l_x , l_y ve l_z olan 3 boyutlu 6 yüzlü sonlu eleman (ing. hexahedral element) Denklem (3.7)'ye entegre edilirse üretim süresi Denklem (3.8) ile hesaplanır.

$$t_{\text{üretim}} = \sum_i N_i \frac{l_x l_z}{V_i h} \quad (3.8)$$

Üretim süresini etkileyen i elemanın anlık katmandaki alanını taraması için gereken tarama sayısı, N_i , Denklem (3.9) ile hesaplanmaktadır.

$$N_i = 1 + G(\rho_i) \left(\frac{2l_y}{W_i} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Burada, $G(\rho_i)$ yapay yoğunluk değeri 0 olan elemanlar için $N_i = 1$ ve diğer değerler için $N_i = 2l_y/W_i$ değerini sağlayacak bir mantık fonksiyonudur (bkz. Denklem (3.11)). W_i ise eriyik havuz genişliğidir. Rosenthal model kullanılarak eriyik havuz şeklinin yarı küresel olduğu kabul edilmiştir ve Denklem (3.2) kullanılarak eriyik havuz genişliği Denklem (3.10)'daki şekilde hesaplanmaktadır.

$$W = \sqrt{\frac{8A}{\pi}} \quad (3.10)$$

$$G(\rho_i) = \frac{1}{1 + e^{(-K(\rho_i - \rho_0))}} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'de, ρ_0 tekillik problemini engellemek adına denkleme dahil edilmiştir ve K arttıkça daha doğru tahminler yapmaktadır. Aynı zamanda, $G(\rho_i)$ fonksiyonu türevlenebilir bir fonksiyondur. Denklem (3.8) kullanılarak maliyet modelinin genişletilmiş hali Denklem (3.12)'deki gibi elde edilmektedir ve çalışma kapsamında kullanılan maliyet fonksiyonu elde edilmiştir.

$$M(\mathbf{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{v}) = \frac{1}{1-R} \left\{ A_1 l_x l_y l_z \sum_i \rho_i + A_2 \frac{l_x l_z}{h} \sum_i N_i / V_i + A_3 \frac{l_x l_z}{h} \sum_i \frac{P_i N_i}{V_i} + A_4 + A_2 t_0 \right\} \quad (3.12)$$

3.3.2. Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO) Probleminin Formülasyonu

GTO probleminde, hacim kısıtı ile sınırlandırılmış ve esneklik (ing. compliance) teriminin minimum değerini verecek optimum tasarım değişkenleri aranmaktadır. Burada not edilmelidir ki esneklik, yapının toplam gerinim enerjisine eşittir. Çalışma kapsamında kullanılan GTO formülasyonu Denklem (3.13)'te belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\ \text{Minimum} & \quad C(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{u}^T \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} \\ \text{Koşullar} & \quad \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = \mathbf{f} \\ & \quad v(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{i=1}^N \rho_i v_i - \bar{V} \leq 0 \\ & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Burada, ρ her sonlu elemanın yapay yoğunluk değerini içeren tasarım değişkeni vektörü, $C(\rho)$ yapının esneklik değeri (amaç fonksiyonu), $K(\rho)$ global direngenlik matrisi (ing. global stiffness matrix), u yer değiştirme vektörü, f dış kuvvet vektörü, v_i her sonlu elemanın hacim değeri ve \bar{V} yapı için hedeflenen maksimum hacim değeridir. Kısıt fonksiyonları sırasıyla, Hook Yasası'ndan türetilen kuvvet eşitliği ve hacim oranı kısıt fonksiyonudur. Değiştirilmiş SIMP yöntemi kullanılarak her sonlu elemanın elastik modül değeri Denklem (3.14) ile hesaplanmaktadır.

$$E_i(\boldsymbol{\rho}) = E_{\min} + \rho_i^p (E_0 - E_{\min}) \quad (3.14)$$

Burada, E_0 tasarımda kullanılan malzemenin elastik modülü, E_{\min} ise sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm alınırken tekillik problemini rahatlatmak ve nümerik stabiliteyi sağlamak için kullanılan sıfıra yakın bir değerdir. Topoloji optimizasyonunda SIMP yöntemi ile her sonlu eleman farklı bir mekanik özelliğe sahip olur ve dolayısıyla farklı bir lokal direngenlik matrisine sahip olur. Sonlu elemanlar çözümü yapmak için gerekli olan global direngenlik matrisi Denklem (3.15) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{i=1}^N [E_{\min} + \rho_i^p (E_0 - E_{\min})] \mathbf{K}_i^0 \quad (3.15)$$

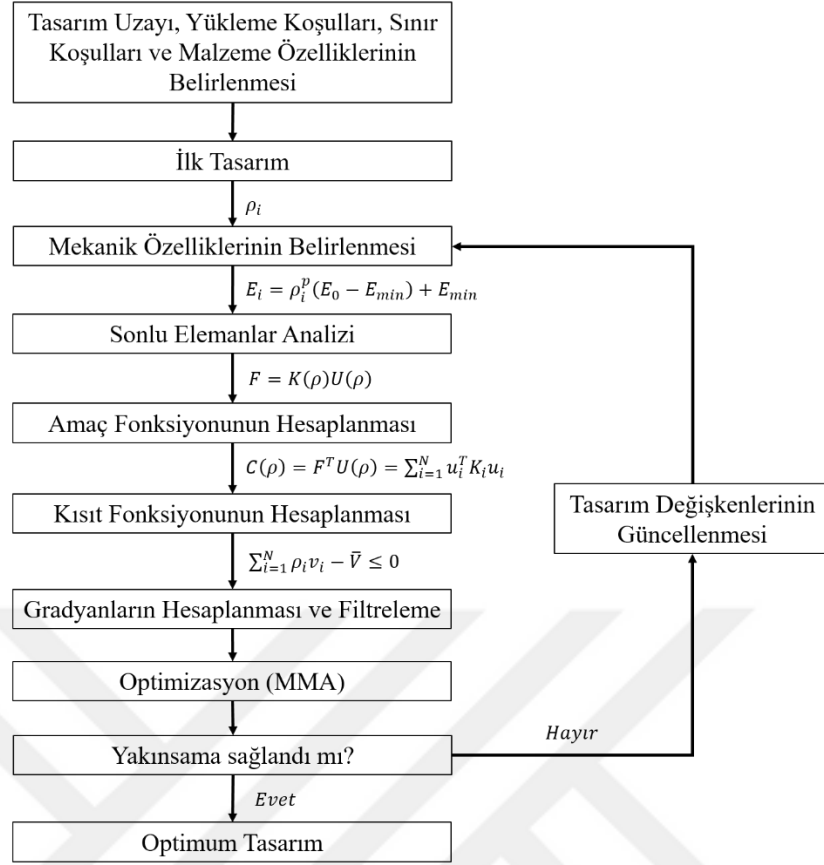
Burada, K_i^0 sonlu eleman analizi sırasında kullanılan elemanın lokal direngenlik matrisinin global versiyonudur ve sabittir. Eğer, optimizasyon problemini çözmek için gradyan tabanlı bir optimizasyon yöntemi kullanılacaksa problemin amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevlerinin optimizasyon algoritmasına beslenmesi gerekmektedir. Esneklik teriminin ve hacim kısıt fonksiyonunun tasarım

değişkenine göre türevleri sırasıyla Denklem (3.16) ve Denklem (3.17) ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial C(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} = -\mathbf{u}_i^T [\mathbf{p} \rho_i^{p-1} (E_0 - E_{\min}) \mathbf{k}_i^0] \mathbf{u}_i \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial v(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} = v_i \quad (3.17)$$

Şekil 3.8’de GTO yönteminin akış şeması verilmiştir. Şema incelendiğinde, ilk olarak, tasarım değişkenlerinin sınırları, yükleme koşulları, sınır koşulları ve tasarımda kullanılan malzemenin özellikleri belirlenir. Yapay yoğunluk tasarım değişkeninin ilk iterasyondaki değerinin tahmin edilmesi ile ilk tasarım oluşturulur. SIMP yöntemi ile her sonlu elemanın tasarım değişkeni kullanılarak mekanik özellikleri (elastik modül) belirlenir. Kurulumu tamamlanan modelin sonlu elemanlar analizi yapılır. Yapısal analiz sonucunda, amaç fonksiyonu olan esneklik değeri ve hacim kısıt fonksiyonu hesaplanır. Gradyan tabanlı bir optimizasyon yöntemi olan MMA ile optimizasyon yapıldığından amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevleri hesaplanır. Tasarım değişkenlerinin belirli bir filtre yarıçapı içerisinde birbirleri arasında büyük gradyanların oluşmasını önlemek adına filtreleme işlemi yapılır. Hesaplanan fonksiyonların değerleri ve gradyan bilgileri MMA yöntemine girdi yapar. MMA yöntemi, sonraki iterasyondaki tasarım değişkeni bilgisini çıktı olarak sunar. İki iterasyon arasındaki amaç fonksiyonu farkı, optimizasyon yakınsama kriterini sağlayana kadar iteratif süreç devam eder. Yakınsama kriteri sağlandığında ise optimizasyon durdurulur ve sonuç optimum olarak kabul edilir. Sonuç olarak, GTO yöntemi ile hacim isterini sağlayan ve minimum esnekliğe (maksimum direngenlik) sahip optimum topoloji elde edilir.



Şekil 3.8: GTO yönteminin akış şeması

3.3.3. Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO) Probleminin Formülasyonu

Minimum esneklik amaç fonksiyonlu GTO yönteminde yapıda oluşan gerilmeler veya izin verilen (ing. allowable) maksimum esneklik değeri probleme dahil edilmemektedir. Ancak, mühendislik uygulamalarında yapı üzerinde izin verilen maksimum gerilme veya esneklik (gerinim enerjisi) göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, GTO yönteminden farklı olmak üzere, YTO problemine izin verilen maksimum gerinim enerjisi de dahil edilmektedir. Esneklik, YTO problemine kısıt fonksiyonunu olarak entegre edildiği için, problemde amaç fonksiyonu olarak minimum esneklik kullanılmamaktadır. Bunun yerine, amaç fonksiyonu olarak maliyet fonksiyonu kullanılmaktadır [70]. Böylelikle, hem yapıda yükleme sonrasında oluşacak deformasyon ve anlık iterasyonda hesaplanan esneklik değeri, maksimum izin verilen esneklik değeri ile sınırlandırılırken hem de toplam maliyet minimize edilecektir. Minimum maliyet amaç fonksiyonlu YTO probleminde proses parametreleri izin verilen maksimum esneklik fonksiyonunu etkilemektedir ve sabit olarak problem kullanılmaktadır. Tasarım değişkenleri, GTO probleminde olduğu

gibi, her sonlu elemanın yapay yoğunluk değeridir. YTO probleminin formülasyonu Denklem (3.18) ile verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\
\text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}) \\
\text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
& \quad \sum_{i=1}^N \rho_i v_i - \bar{V} \leq 0 \\
& \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
& \quad 0 \leq \rho_i \leq 1
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Burada, $c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho})$ yapı üzerinde oluşacak izin verilen maksimum esneklik değeridir. İzin verilen maksimum esneklik teriminin çıkarımı Denklem (3.19) ile belirtilmiştir.

$$c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^N E_i u_i^T k_i^0 u_i \tag{3.19}$$

Burada, k_i^0 elastik katı sonlu elemanın direngenlik matrisidir ve Denklem (3.20) ile hesaplanmaktadır.

$$k_i^0 = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} B_i^T C_0 B_i d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \tag{3.20}$$

Burada, B gerinim-deformasyon matrisi, C_0 birim elastik modül ile hesaplanan yapısal matris (bkz. Denklem (3.21)) ve ξ_e ($e = 1,2,3$) elastik katı sonlu elemanın doğal koordinatlarıdır.

$$C_0 = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Burada, ν malzemenin Poisson oranıdır. Denklem (3.20), Denklem (3.19)'a entegre edildiğinde ve denklem düzenlendiğinde Denklem (3.22) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) & = \sum_{i=1}^N E_i u_i^T (\nu_i B_i^T C_0 B_i) u_i \\
& = \sum_{i=1}^N E_i \nu_i (u_i^T B_i^T) C_0 (B_i u_i)
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Birim elastik modül ile hesaplanan yapısal matris ilgili sonlu elemana özgü hesaplanması için sonlu elemanın elastik modülü ile çarpılır ($C_i = E_i C_0$). Sonlu elemanlar yönteminde, elemanın üzerinde oluşacak gerilme hesanırken gerilme-deformasyon ilişkisi ($\epsilon = Bu$) kullanıldığında Denklem (3.23) elde edilir.

$$\begin{aligned}\sigma_i &= C_i \epsilon \\ &= C_i B u\end{aligned}\quad (3.23)$$

Her sonlu elemanın üzerinde oluşacak gerilme hesabı için kullanılan Denklem (3.23), izin verilen maksimum esneklik için kullanılan Denklem (3.22)'ye entegre edildiğinde ve sadeleştirildiğinde Denklem (3.24) elde edilir.

$$\begin{aligned}c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) &= \sum_{i=1}^N E_i v_i (E_i^{-1} C_0^{-1} \sigma_i)^T C_0 (E_i^{-1} C_0^{-1} \sigma_i) \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} v_i \sigma_i^T (C_0^{-1})^T \sigma_i\end{aligned}\quad (3.24)$$

Mühendislik uygulamalarında, genellikle tasarımlar ve analizler belirli kabuller yapılarak oluşturulduğu için emniyet katsayısı hesaplanır (bkz. Denklem (3.25)).

$$k = \frac{Y_i}{\sigma_i}\quad (3.25)$$

Burada, k emniyet faktörü, σ_i gerilme vektörü, \mathbf{Y}_i malzemenin maksimum kayma teorisine göre hesaplanan 6x1 boyutundaki akma dayanımı vektörüdür ($\mathbf{Y}_i = [Y_i, Y_i, Y_i, Y_i/2, Y_i/2, Y_i/2]^T$) [122]. Denklem (3.25), Denklem (3.24)'e entegre edilirse izin verilen maksimum esneklik terimi son halini alır (bkz. Denklem (3.26)).

$$c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{k^2 E_i} V_i Y_i^T (C_0^{-1})^T Y_i\quad (3.26)$$

Topoloji optimizasyonu probleminde her sonlu elemanın elastik modülünü bulmak için kullanılan değiştirilmiş SIMP yöntemi aynı zamanda tasarım değişkenlerine göre her sonlu eleman için farklılık gösterecek akma dayanımına da uygulanabilmektedir (bkz. Denklem (3.27)).

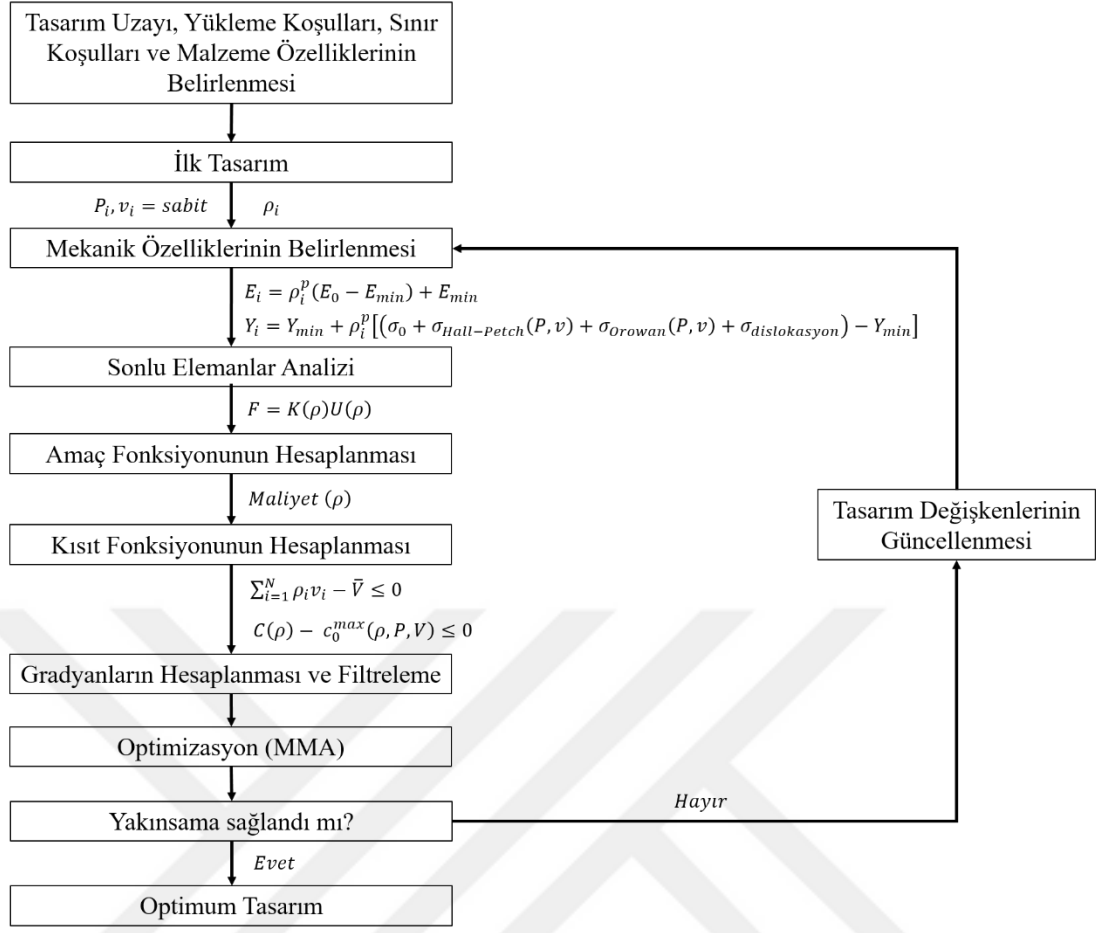
$$Y_i = Y_{\min} + \rho_i^p (\sigma_y - Y_{\min})\quad (3.27)$$

Bölüm 2.4'te belirtilen SLE ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesinin akma dayanımı modeli Denklem (3.27)'ye entegre edilirse Denklem (3.28) elde edilir. Böylelikle, topoloji optimizasyonunda kullanılan tasarım değişkenleri (sonlu elemanların yapay yoğunluk değerleri, ρ_i) ve eklemeli imalatta kullanılan tasarım değişkenleri (lazer gücü P ve tarama hızı v) cinsinden sonlu elemanların akma dayanımı vektörleri parametrik olarak hesaplanabilmektedir.

$$Y_i = Y_{\min} + \rho_i^p \left[(\sigma_0 + \sigma_{Hall-Petch}(P, v) + \sigma_{Orowan}(P, v) + \sigma_{dislokasyon}) - Y_{\min} \right]\quad (3.28)$$

YTO probleminde amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevleri analitik olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 3.9’da YTO yönteminin akış şeması verilmiştir. Şema incelendiğinde, ilk olarak, tasarım değişkenlerinin sınırları, yükleme koşulları, sınır koşulları ve tasarımda kullanılan malzemenin özellikleri belirlenir. Yapay yoğunluk tasarım değişkeninin ilk iterasyondaki değeri tahmin edilir ve izin verilen maksimum esneklik fonksiyonunun hesaplanması adına tasarım değişkenleri olmamasına rağmen lazer gücü ve tarama hızlarının değerleri sabit olarak kabul edilir. Böylelikle, ilk tasarım oluşturulur ve SIMP yöntemi ile her sonlu elemanın tasarım değişkeni kullanılarak mekanik özellikleri (elastik modül ve akma dayanımı) belirlenir. Kurulumu tamamlanan modelin sonlu elemanlar analizi yapılır. Yapısal analiz sonucunda, amaç fonksiyonunun (toplam maliyet) değeri ve kısıt fonksiyonlarının (hacim ve esneklik) değerleri hesaplanır. Gradyan tabanlı bir optimizasyon yöntemi olan MMA ile optimizasyon yapıldığından amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevleri hesaplanır. Tasarım değişkenlerinin belirli bir filtre yarıçapı içerisinde birbirleri arasında büyük gradyanların oluşmasını önlemek adına filtreleme işlemi yapılır. Hesaplanan fonksiyonların değerleri ve gradyan bilgileri MMA yöntemine girdi yapar. MMA yöntemi, sonraki iterasyondaki tasarım değişkeni bilgisini çıktı olarak sunar. İki iterasyon arasındaki amaç fonksiyonu farkı, optimizasyon yakınsama kriterini sağlayana kadar iteratif süreç devam eder. Yakınsama kriteri sağlandığında ise optimizasyon durdurulur ve sonuç optimum olarak kabul edilir. Sonuç olarak, YTO yöntemi ile ağırlık isterini sağlayan, mekanik dayanımı esneklik fonksiyonu ile kontrol edilen ve minimum maliyete sahip optimum topoloji elde edilir.



Şekil 3.9: YTO yönteminin akış şeması

3.3.4. Ardışık (Sequential) Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO) Probleminin Formülasyonu

Yapının mekanik dayanımının probleme entegre edildiği YTO probleminde, Bölüm 3.3.3'te bahsedildiği gibi, proses parametreleri sabit alınırken tasarım değişkenleri sonlu elemanların yapay yoğunluk değerleridir. APPTO probleminde ise YTO sonucunda elde edilen optimum yapay yoğunluk değerleri sabit kabul edilip, yani tasarımın topolojisi sabit kabul edilip, minimum maliyet değerini sağlayacak proses parametrelerinin optimum değerleri aranmaktadır. Burada not edilmelidir ki, proses parametreleri, her bir sonlu eleman için ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Literatürde kullanılan APPTO problemi formülasyonu Denklem (3.29) ile belirtilmiştir [70].

$$\begin{aligned}
 \text{Bul} & & [P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
 \text{Minimum} & & \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
 \text{Koşullar} & & K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
 & & C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{maks}$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{maks}$$

Denklem (3.29) incelendiğinde, tasarım değişkeni olan tarama hızı (V) arttığında, eriyik havuz genişliği (W) azalır (bkz. Denklem (3.2)) ve tarama sayısı (N) $\sqrt{V_i}$ oranında azalır (bkz. Denklem (3.9)). Ancak, tarama hızının artmasıyla tek tarama için üretim süresi doğrusal olarak azalmaktadır (bkz. Denklem (3.8)). Üretim süresinin azalmasıyla da üretim maliyeti ve toplam maliyet azalmaktadır (bkz. Denklem (3.6)). Aynı zamanda, tarama hızının artmasıyla akma dayanımı artmaktadır ve böylelikle izin verilen maksimum esneklik kısıtı rahatlatılmaktadır. Kısaca, tarama hızının artması sonucunda hem minimize edilmesi amaçlanan maliyet fonksiyonu azalırken hem de esneklik kısıtı rahatlatılmaktadır. Sonuç olarak, tarama hızını engelleyen bir denklem olmadığından dolayı tarama hızı maksimum tarama hızı sınır (V_{maks}) değerine yakınsamaktadır [70]. Tarama hızının üst sınır değerini almasıyla aslında optimum değeri aranan tek tasarım değişkeni lazer gücü olmaktadır.

SLE ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesi için Bölüm 3.2’de bahsedilen deneysel çalışmalarla kanıtlandığı şekilde, tarama hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi bulunmaktadır ve eklemeli imalat yönteminin önemli proses parametrelerinden birisidir. Bu nedenle, tarama hızının direkt olarak üst sınır değerine yakınsaması makul olmayıp, tarama hızının artışının sınırlandırılması gerekmektedir. SLE ile üretilen yapıların mikro mekanik özelliklerini direkt olarak etkilediği deneysel sonuçlarla gösterilen enerji girişini temsil eden hacimsel enerji yoğunluğu formülasyonu kısıt fonksiyonu olarak Denklem (3.29)’a entegre edilmiştir. Böylelikle, tarama hızı arttığında azalan enerji yoğunluğu değeri belirlenen minimum sınırının altına geçemeyecektir ve hem tarama hızının hem de lazer gücünün optimum değerleri aranabilecektir. Enerji yoğunluğu kısıtının entegre edildiği ve çalışma kapsamında kullanılan APPTO problemi Denklem (3.30)’da belirtilmiştir.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Bul} & [P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
 \text{Minimum} & \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
 \text{Koşullar} & K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
 & C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
 & ED_{min} \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq ED_{maks} \\
 & P_{min} \leq P_i \leq P_{maks} \\
 & V_{min} \leq V_i \leq V_{maks}
 \end{array} \tag{3.30}$$

Burada, ED_i her sonlu elemanın hacimsel enerji yoğunluk değeridir ve tasarım değişkenleri olan lazer gücü ve tarama hızına göre Denklem (3.31) ile hesaplanmaktadır.

$$ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) = \frac{P_i}{V_{iht}} \quad (3.31)$$

3.3.4.1. KS (Kreisselmeier–Steinhsauser) Fonksiyonu ile Enerji Yoğunluğu Kısıt Fonksiyonunun Hesaplanması

Enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonu hesabı için kullanılan Denklem (3.31) incelendiğinde, her sonlu eleman için enerji yoğunluğunun hesaplanması gerektiği anlaşılmaktadır. Her sonlu eleman için hesaplanan enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonu ve tasarım değişkenlerine göre hesaplanan türev fonksiyonlarının sayısının bu denli fazla olması hesaplama maliyeti açısından olumsuz etki yaratacaktır.

Topoloji optimizasyonu problemlerinde, her sonlu eleman için hesaplanan kısıt fonksiyonları gibi lokal kısıt fonksiyonlarının sayısı tasarım değişkeni sayısına eşittir. Tasarım değişkeni sayısı fazla olduğu için hem kısıt fonksiyonlarının hesaplanması hem de tasarım değişkenlerine göre türevlenecek fonksiyon sayısının fazlasıyla artması optimizasyon problem çözümünü verimsiz yapmaktadır. Fazla sayıda olan lokal kısıt fonksiyon problemini çözmek adına kullanılan en yaygın yöntem kısıtların birleştirilerek tek global fonksiyona dönüştürülmesidir. Literatürde, kısıt birleştirme yöntemleri olarak KS fonksiyonu, P-norm ve P-mean yöntemleri kullanılmaktadır [123–126]. Bu çalışma kapsamında, nümerik zorlukların azaltıldığı dönüştürülmüş KS fonksiyonu kullanılmıştır ve Denklem (3.32)'de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır [127].

$$KS(g_j(x)) = g_{maks}(x) + \frac{1}{\rho_{KS}} \ln \left[\sum_j^{n_g} e^{\rho_{KS} g_j(x) - g_{maks}(x)} \right] \quad (3.32)$$

Burada, g_j hesaplanan enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonları, ρ_{KS} birleştirme (ing. aggregation) parametresi ve g_{maks} hesaplanan maksimum enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonunun değeridir. KS fonksiyon ile hesaplanan birleştirilmiş enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonunun tasarım değişkenlerine göre türevi Denklem (3.33) kullanılarak hesaplanmaktadır [128].

$$\begin{aligned}
\frac{\partial KS}{\partial x} &= \frac{\partial g_{maks}(x)}{\partial x} + \frac{\sum_{j=1}^{ng} \left[e^{\rho_{KS}(g_j - g_{maks})} \left(\frac{dg_j}{dx} - \frac{dg_{maks}}{dx} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{ng} e^{\rho_{KS}(g_j - g_{maks})}} \\
&= \frac{\sum_{j=1}^{ng} \left[e^{\rho_{KS}(g_j)} \left(\frac{dg_j}{dx} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{ng} e^{\rho_{KS}(g_j)}}
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Çalışma kapsamında, değiştirilmiş KS fonksiyonu ile birleştirilmesi hedeflenen kısıt fonksiyonları enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonlarıdır. Enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonunun değiştirilmiş KS fonksiyonuna uyarlanmış hali ve tasarım değişkenlerine göre türevleri Denklem (3.34) ve Denklem (3.35) ile hesaplanmaktadır. Enerji yoğunluğu kısıt fonksiyonunun hem üst hem de alt limiti olduğu için tüm sınırlar için ayrı bir KS fonksiyonu kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

$$KS_1(g_{1i}) = g_{1maks} + \frac{1}{\rho_{KS}} \ln \left[\sum_i^{ng} e^{\rho_{KS}(g_{1i} - g_{1maks})} \right]; \quad g_{1i} = 1 - \frac{P_i}{ED_{min} V_i ht} \tag{3.34}$$

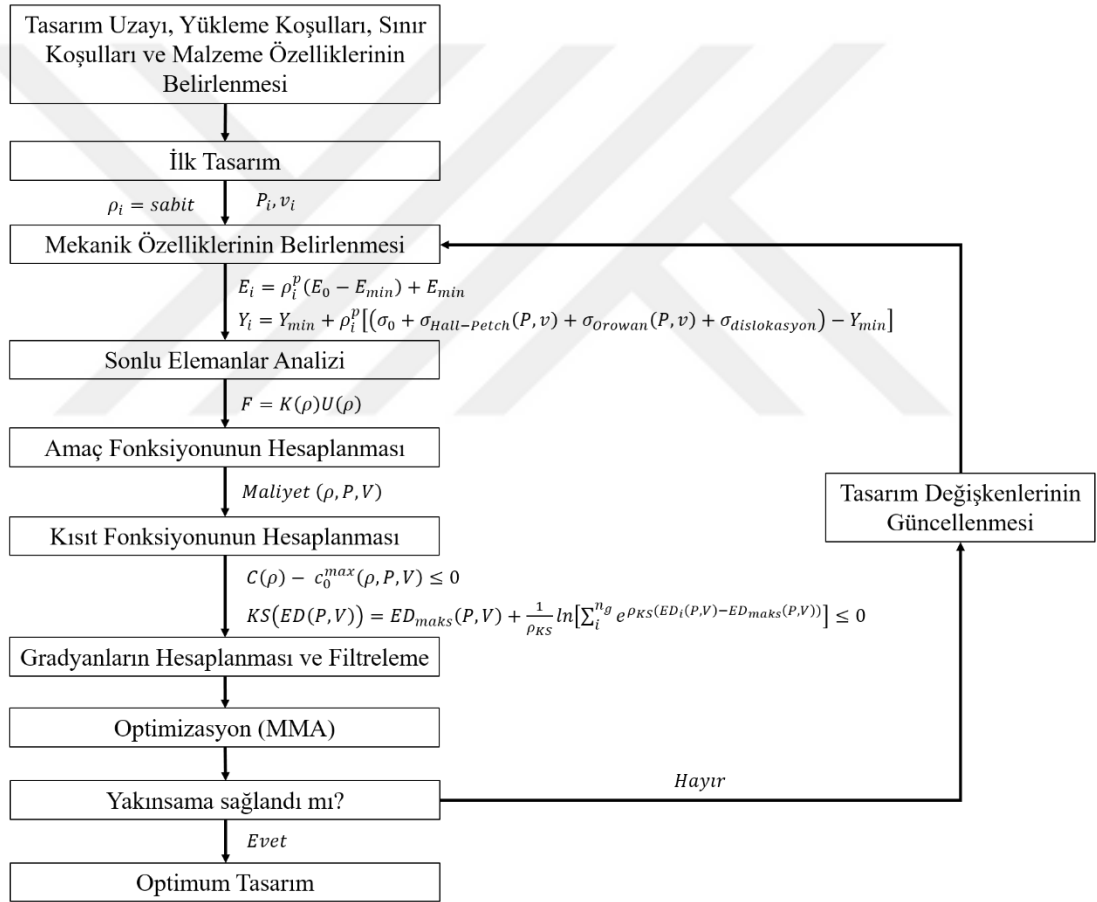
$$KS_2(g_{2i}) = g_{2maks} + \frac{1}{\rho_{KS}} \ln \left[\sum_i^{ng} e^{\rho_{KS}(g_{2i} - g_{2maks})} \right]; \quad g_{2i} = \frac{P_i}{ED_{maks} V_i ht} - 1$$

$$\frac{\partial KS_1(g_{1i})}{\partial P} = \frac{\sum_{i=1}^{ng} \left[e^{\rho_{KS}(g_{1i})} \left(-\frac{1}{ED_{min} V_i ht} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{ng} e^{\rho_{KS}(g_{1i})}}, \quad \frac{\partial KS_1(g_{1i})}{\partial V} = \frac{\sum_{i=1}^{ng} \left[e^{\rho_{KS}(g_{1i})} \left(\frac{P_i}{ED_{min} V_i^2 ht} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{ng} e^{\rho_{KS}(g_{1i})}} \tag{3.35}$$

$$\frac{\partial KS_2(g_{2i})}{\partial P} = \frac{\sum_{i=1}^{ng} \left[e^{\rho_{KS}(g_{2i})} \left(\frac{1}{ED_{maks} V_i ht} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{ng} e^{\rho_{KS}(g_{2i})}}, \quad \frac{\partial KS_2(g_{2i})}{\partial V} = \frac{\sum_{i=1}^{ng} \left[e^{\rho_{KS}(g_{2i})} \left(-\frac{P_i}{ED_{maks} V_i^2 ht} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{ng} e^{\rho_{KS}(g_{2i})}}$$

Burada, g_{1maks} , g_{1i} fonksiyonunun maksimum değeri ve g_{2maks} , g_{2i} fonksiyonunun maksimum değeridir. Şekil 3.10'da APPTO yönteminin akış şeması verilmiştir. Şema incelendiğinde, ilk olarak, tasarım değişkenlerinin sınırları, yükleme koşulları, sınır koşulları ve tasarımda kullanılan malzemenin özellikleri belirlenir. Tarama hızı ve lazer gücü tasarım değişkenlerinin ilk iterasyondaki değeri tahmin edilir ve yapay yoğunluk değeri sabit olarak kabul edilir. Optimum topolojiyi belirleyen değişken olan yapay yoğunluk değişkeni için, YTO yöntemi ile elde edilen sonuç kullanılır. Böylelikle, tasarım değiştirilmeden sonlu elemanların tarama hızı ve lazer gücü değişkenlerinin optimum değerleri aranır. SIMP yöntemi ile her sonlu elemanın tasarım değişkeni kullanılarak mekanik özellikleri (elastik modül ve akma dayanımı) belirlenir. Kurulumu tamamlanan modelin sonlu elemanlar analizi yapılır. Yapısal analiz sonucunda, amaç fonksiyonunun (toplam maliyet) değeri ve kısıt fonksiyonlarının (esneklik ve enerji yoğunluğu) değerleri hesaplanır. ED kısıtı, her sonlu eleman için hesaplanmayarak KS fonksiyonu ile bütünleştirilerek hesaplanır. Gradyan tabanlı bir optimizasyon yöntemi olan MMA ile optimizasyon yapıldığından

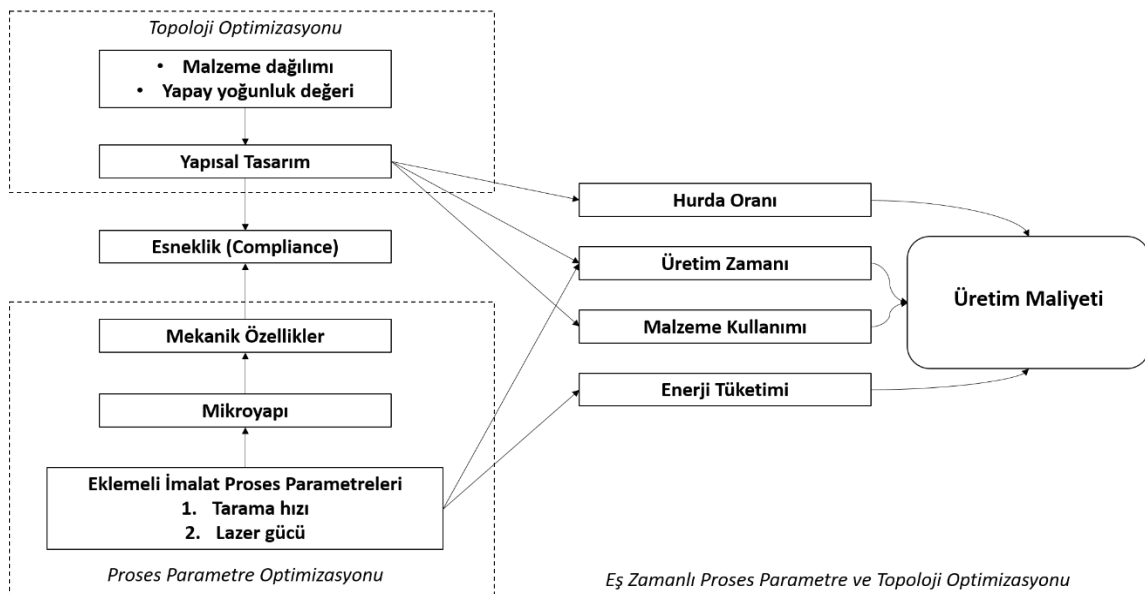
amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevleri hesaplanır. Tasarım değişkenlerinin belirli bir filtre yarıçapı içerisinde birbirleri arasında büyük gradyanların oluşmasını önlemek adına filtreleme işlemi yapılır. Hesaplanan fonksiyonların değerleri ve gradyan bilgileri MMA yöntemine girdi yapar. MMA yöntemi, sonraki iterasyondaki tasarım değişkeni bilgisini çıktı olarak sunar. İki iterasyon arasındaki amaç fonksiyonu farkı, optimizasyon yakınsama kriterini sağlayana kadar iteratif süreç devam eder. Yakınsama kriteri sağlandığında ise optimizasyon durdurulur ve sonuç optimum olarak kabul edilir. Sonuç olarak, APPTO yöntemi ile YTO sonucunda elde edilen yapısal tasarımın minimum maliyet ile üretilmesi adına optimum üretim parametreleri edilir.



Şekil 3.10: APPTO yönteminin akış şeması

3.3.5. Eş Zamanlı (Concurrent) Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO) Probleminin Oluşturulması

APPTO ile ilk olarak topoloji optimizasyonu ardından sabit tasarımın proses parametrelerinin optimizasyonu yapılmaktadır. Amaç fonksiyonu olan maliyet değerinin minimum değeri aranırken proses parametrelerinin ve topolojinin eş zamanlı olarak optimize edilmesi avantaj sağlamaktadır [70]. Şekil 3.11’de belirtilen EPPTO probleminin çalışma prensibi incelendiğinde, üretim maliyetini minimize etmeyi amaçlayan problemde, eklemeli imalat proses parametrelerinden önemli iki tanesi olan tarama hızı ve lazer gücü yapının mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Mekanik özelliklerin değişmesi izin verilen maksimum esneklik terimini etkilediğinden dolayı iterasyondaki esneklik değerini de etkilemektedir. Aynı zamanda, topoloji optimizasyonu ile hesaplanan optimum malzeme dağılımı, yapının tasarımını ve esneklik değerini etkilemektedir (bkz. Denklem (3.24)). Tasarım sürecinde proses parametreleri ve yapay yoğunluk birlikte kullanılarak yapının esneklik fonksiyonuna aynı anda girdi yaparak optimum tasarımın elde edilmesini sağlarlar. Öte yandan, elde edilen tasarım malzeme kullanımını, üretim süresini ve hurda oranını etkilemektedir (bkz. Denklem (3.12)). Elde edilen optimum proses parametreleri ise üretim süresini ve üretim esnasında tüketilen enerji miktarını etkilemektedir. Hurda oranı, üretim süresi, malzeme kullanımı ve enerji tüketimi parametreleri de üretim maliyetini etkilediği için tüm tasarım değişkenleri iteratif olarak hesaplanarak minimum üretim maliyeti elde edilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 3.11: EPPTO yönteminin çalışma prensibi

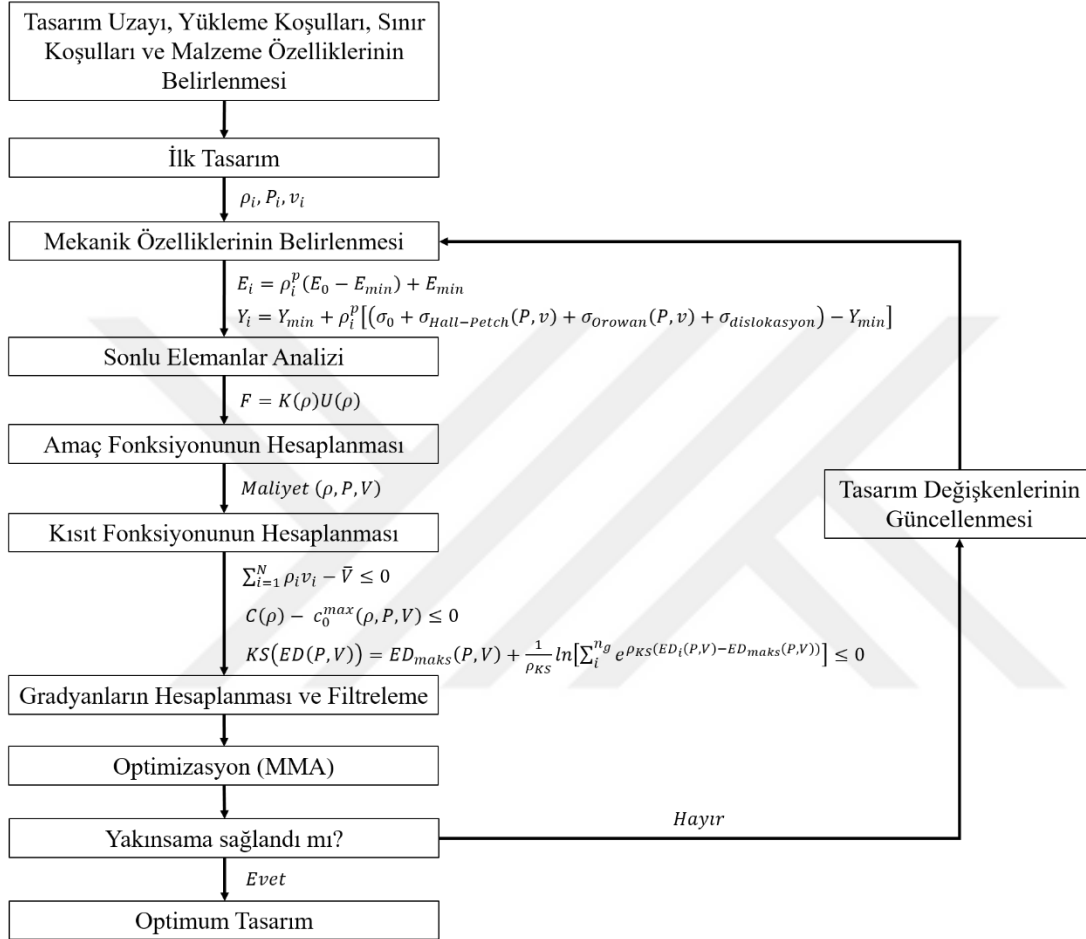
Aynı anda 3 adet tasarım değişkeni setinin (yapay yoğunluk, lazer gücü ve tarama hızı) optimum değerini bulmayı amaçlayan EPPTO probleminin formülasyonu Denklem (3.36) ile belirtilmiştir.

$$\begin{aligned}
\text{Bul} & \quad [\rho_1, \dots, \rho_N, P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
\text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
\text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
& \quad \sum_{i=1}^N \rho_i v_i - \bar{V} \leq 0 \\
& \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
& \quad ED_{min} \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq ED_{maks} \\
& \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \\
& \quad P_{min} \leq P_i \leq P_{maks} \\
& \quad V_{min} \leq V_i \leq V_{maks}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Burada, kısıt fonksiyonu olarak verilen her elemanın enerji yoğunluğu terimi Bölüm 3.3.4.1’de belirtildiği gibi KS fonksiyonu ile tek fonksiyonda birleştirilmiştir. Amaç fonksiyonunun ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevleri analitik olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.12’de EPPTO yönteminin akış şeması verilmiştir. Şema incelendiğinde, ilk olarak, tasarım değişkenlerinin sınırları, yükleme koşulları, sınır koşulları ve tasarımda kullanılan malzemenin özellikleri belirlenir. Yapay yoğunluk, tarama hızı ve lazer gücü tasarım değişkenlerinin ilk iterasyondaki değeri tahmin edilir. Böylelikle, optimum üretim parametreleri ve topoloji aranır. SIMP yöntemi ile her sonlu elemanın tasarım değişkeni kullanılarak mekanik özellikleri (elastik modül ve akma dayanımı) belirlenir. Kurulumu tamamlanan modelin sonlu elemanlar analizi yapılır. Yapısal analiz sonucunda, amaç fonksiyonunun (toplam maliyet) değeri ve kısıt fonksiyonlarının (hacim, esneklik ve enerji yoğunluğu) değerleri hesaplanır. ED kısıtı, her sonlu eleman için hesaplanmayarak KS fonksiyonu ile bütünleştirilerek hesaplanır. Gradyan tabanlı bir optimizasyon yöntemi olan MMA ile optimizasyon yapıldığından amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevleri hesaplanır. Tasarım değişkenlerinin belirli bir filtre yarıçapı içerisinde birbirleri arasında büyük gradyanların oluşmasını önlemek adına filtreleme işlemi yapılır. Hesaplanan fonksiyonların değerleri ve gradyan bilgileri MMA yöntemine girdi yapar. MMA yöntemi, sonraki iterasyondaki tasarım değişkeni bilgisini çıktı olarak sunar. İki iterasyon arasındaki amaç fonksiyonu farkı, optimizasyon yakınsama kriterini

sağlayana kadar iteratif süreç devam eder. Yakınsama kriteri sağlandığında ise optimizasyon durdurulur ve sonuç optimum olarak kabul edilir. Sonuç olarak, EPPTO yöntemi ile ağırlık, mekanik dayanım ve üretilebilir enerji yoğunluğu isterini sağlayan optimum topoloji ve üretim parametreleri (lazer gücü ve tarama hızı) eş zamanlı olarak elde edilir.



Şekil 3.12: EPPTO yönteminin akış şeması

3.3.6. Çalışma Kapsamında Ele Alınan Farklı TO Formülasyonlarının Kıyaslanması

Bu çalışma kapsamında ele alınan topoloji optimizasyonu formülasyonlarında kullanılan tasarım değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonları Tablo 3.7’de özetlenmiştir. GTO’da minimum esnekliğe sahip ve hacim kısıtı ile sınırlandırılmış optimum topoloji aranmakta olup, yapının üretiminde kullanılacak olan proses parametreleri optimizasyon problemde yer almamaktadır. YTO probleminde, esneklik ve hacim kısıtları ile sınırlandırılmış ve minimum maliyete sahip optimum topoloji aranmaktadır. Ek olarak, proses parametreleri sabit değerler olarak YTO probleminde

kullanılmaktadır. APPTO probleminde, YTO ile elde edilen optimum topoloji probleme girdi olarak eklenir ve minimum maliyete sahip hacimsel enerji yoğunluğu ve esneklik kısıtı ile sınırlandırılmış şekilde topoloji üzerindeki elemanların optimum proses parametreleri aranmaktadır. Son olarak, EPPTO probleminde, minimum maliyete sahip hacim, esneklik ve hacimsel enerji yoğunluğu kısıtları ile sınırlandırılarak optimum yapay yoğunluk ve proses parametreleri aranmaktadır.

Tablo 3.7: Farklı topoloji optimizasyonu formülasyonlarının karşılaştırılması

Formülasyon	Verilen	Tasarım değişkenleri	Amaç fonksiyonu	Kısıt fonksiyonları
Geleneksel topoloji optimizasyonu (GTO)	-	Yapay yoğunluk vektörü	Esneklik (gerinim enerjisi)	Hacim
Yapısal topoloji optimizasyonu (YTO)	Proses parametreleri	Yapay yoğunluk vektörü	Maliyet	Hacim, Maksimum esneklik
Ardışık proses parametre ve topoloji optimizasyonu (APPTO)	Optimum yapısal topoloji (Yapay yoğunluk vektörü)	Proses parametreleri vektörü	Maliyet	Hacimsel enerji yoğunluğu, Maksimum esneklik
Eşzamanlı proses parametre ve topoloji optimizasyonu (EPPTO)	-	Yapay yoğunluk vektörü, Proses parametreleri vektörü	Maliyet	Hacim, Hacimsel enerji yoğunluğu, Maksimum esneklik

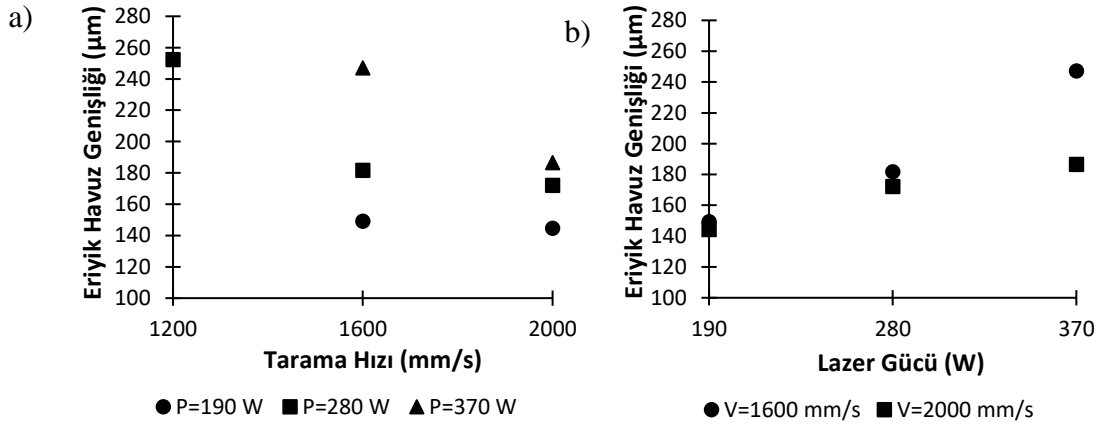


4. DENEYSEL ve SAYISAL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneysel Sonuçlar

4.1.1. Eriyik Havuz Sonuçları

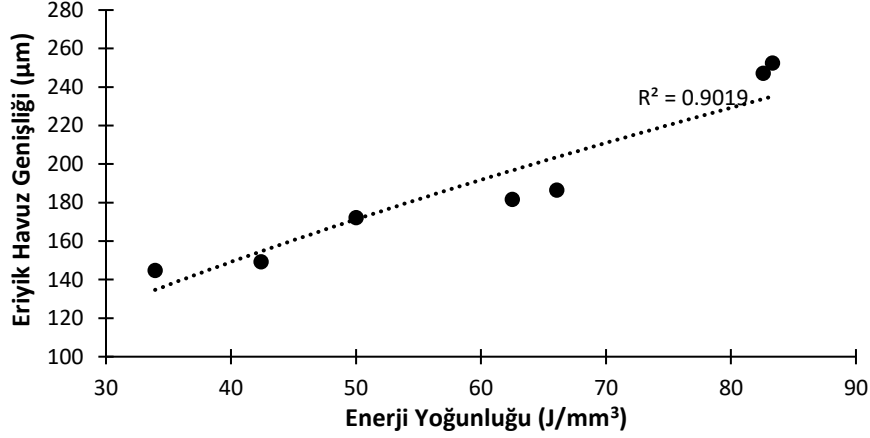
Rosenthal modeli kullanılarak elde edilen proses parametrelerine bağlı olarak ve yarı-küresel kabulü ile hesaplanan eriyik havuz genişliği denklemi (bkz. Denklem (3.2)) incelendiğinde, eriyik havuz genişliğinin lazer gücü ile doğru ve tarama hızı ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda, Şekil 4.1'de sunulan değişken tarama hızı ve lazer gücüne göre eriyik havuz ölçümleri incelendiğinde Rosenthal model ile ve literatürde yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Eriyik havuz ölçümleri üretilen 9 adet numunenin 7 adedi kullanılarak yapılmıştır. 2 adet numunenin kesim işlemleri esnasında en üst katmanlarının hasar görmesinden ve eriyik havuz ölçümleri numunelerin en üst katmanından yapıldığından dolayı 2 adet numune eriyik havuz sonuçları özelinde veri setinden çıkarılmıştır.



Şekil 4.1: Eriyik havuz genişliğinin a) tarama hızına göre b) lazer gücüne göre değişimi

Ek olarak, eriyik havuzun konfigürasyonu ve boyutları, enerji girişi, katılma veya soğuma hızı gibi lazer gücü ve tarama hızını birlikte içerisinde barındıran etmenler ile ilişkilendirilmektedir. Böylelikle, eriyik havuz genişliğinin boyutu direkt olarak enerji girişine göre yorumlanabilmektedir ve enerji girişi arttıkça genişliğin arttığı anlaşılmaktadır (bkz. Denklem (3.2)). Bu çalışma ile elde edilen Şekil 4.2'de belirtilen

enerji yoğunluğuna bağlı olarak eriyik havuz genişliğinin değişimi incelendiğinde, beklendiği gibi enerji girişi arttıkça genişliğinin arttığı görülmektedir. Ek olarak, eriyik havuz genişlik değerlerinin, üstel bir fonksiyon ile temsil edilmesi ile birlikte R^2 değeri yaklaşık 0.90 olarak hesaplanmıştır.



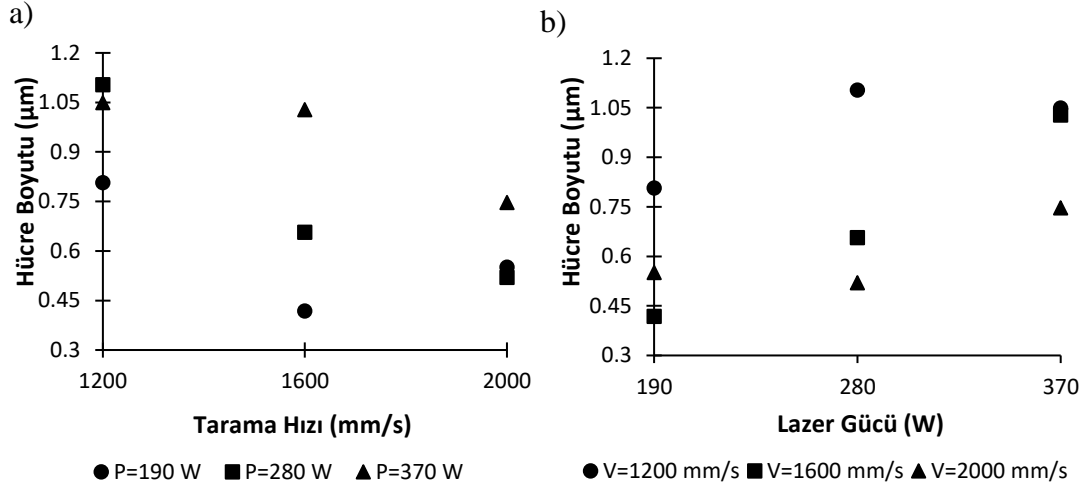
Şekil 4.2: Eriyik havuz genişliğinin enerji yoğunluğuna göre değişimi

Belirleme katsayısı (R^2) eğri uydurma başarısının parametrelerinden birisidir ve Denklem (4.1)'de belirtilen formüller ile hesaplanmaktadır. Denklem (4.1)'de belirtilen, y_i deney sonuçlarını (veriler), \bar{y} deney sonuçlarının ortalamasını ve f_i ise tahmin edilen sonuçları temsil etmektedir. Genellikle, bu değer birine yakın olması oluşturulan denklemin daha kalite olduğunu gösterir.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}; \quad SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2; \quad SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.1)$$

4.1.2. Hücre Boyutu Sonuçları

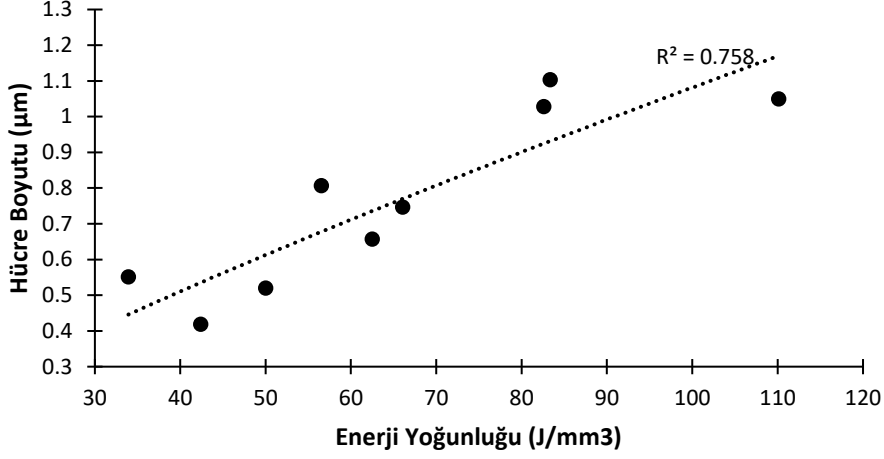
Hesaplanan ötektik Si hücre boyutlarının tarama hızı ve lazer gücüne göre değişimleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, lazer gücünün sabit kalıp tarama hızı arttığında hücre boyutunun azaldığı görülürken, tarama hızı sabitken lazer gücü arttığında ise hücre boyutunun arttığı görülmektedir. Hücre boyutu ile proses parametreleri arasındaki ilişkinin literatürde yapılan çalışmalarda gözlemlendiği gibi hücre boyutunun tarama hızı ile doğru orantılı ve lazer gücü ile ters orantılı olduğu belirlenmiştir ve sonuçların tutarlı olduğuna karar verilmiştir. [81,84,129,130].



Şekil 4.3: Hücre boyutunun a) tarama hızına göre b) lazer gücüne göre değişimi

Ek olarak, Rosenthal model ile elde edilen Denklem (3.3) incelendiğinde enerji girişinin soğuma hızını manipüle ettiği belirlenmişti. Enerji yoğunluğu ile soğuma hızı yapıya giren enerjiyi temsil etmektedir. Tarama hızı ve lazer gücü gibi proses parametreleri ile hesaplanan hacimsel enerji yoğunluğu ve soğuma hızı denklemleri incelendiğinde, tarama hızı ile enerji yoğunluğu ters orantılı iken soğuma hızı ile doğru orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, lazer gücü ile enerji yoğunluğu doğru orantılı iken soğuma hızı ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. O halde, enerji yoğunluğu ile soğuma hızının ters orantılı olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, soğuma hızının artmasıyla hücre boyutunun azaldığını göstermektedir [95–99]. Buna göre, enerji yoğunluğunun artmasıyla da hücre boyutunun artması beklenmektedir ve Şekil 4.4’te bu davranış gözlenmektedir.

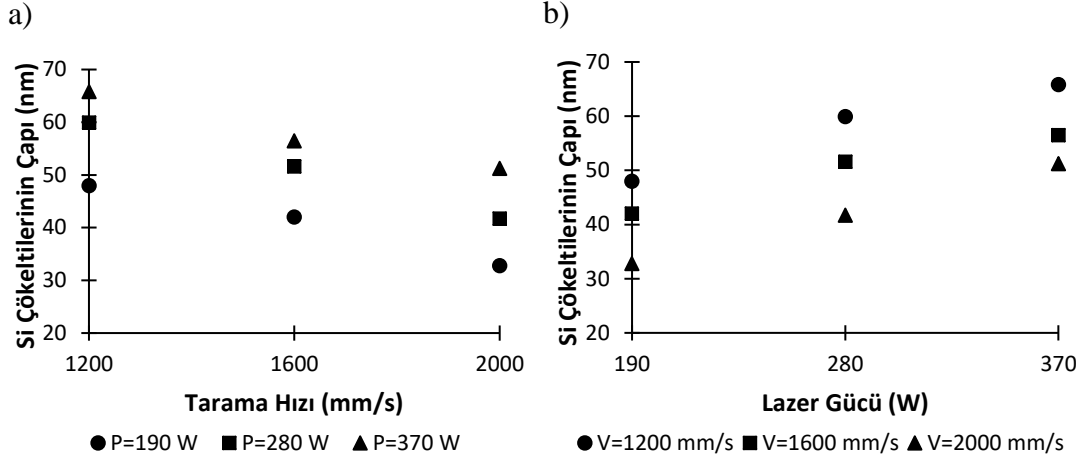
Çalışma kapsamında, hesaplanan hücre boyutlarının enerji yoğunluğuna göre değişimi üstel bir fonksiyon ile ifade edilmeye çalışıldığında, R^2 değeri 0.758 olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan denklemin kalitesini belirleyen bu değer daha yüksek olmamasının nedeni, mikroyapı içerisindeki konuma göre özelliklerin ve unsur boyutlarının değişmesi ve tüm numunelerde aynı konumdan görüntü almak pek mümkün olmamasıdır. Bu nedenlerle, hesaplanan R^2 değerinin yeterli olduğu değerlendirilmiştir.



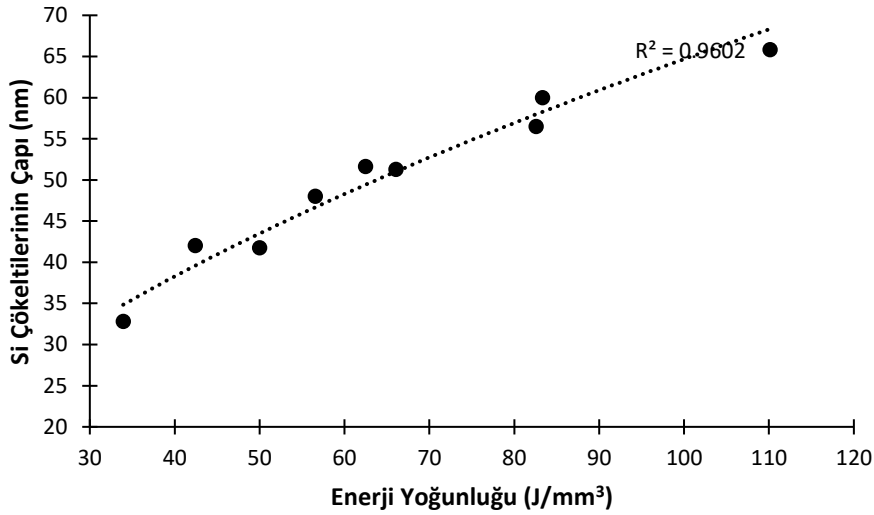
Şekil 4.4: Hücre boyutunun enerji yoğunluğuna göre değişimi

4.1.3. Si Çökelti Sonuçları

Proses parametrelerinden etkilenen yapı içerisinde oluşan termal koşullar çökelti yoğunluğunu, sayısını ve boyutunu etkilemektedir. Soğuma hızının artması sonucunda oluşan çökelti sayısının arttığı ve boyutunun azaldığı belirlenmiştir [131]. Soğuma hızı formülasyonu incelendiğinde, tarama hızı ile doğru ve lazer gücü ile ters orantılıdır. O halde, Si çökeltilerinin boyutlarının tarama hızı ile ters orantılı ve lazer gücü ile doğru orantılı olması beklenmektedir. Bu çalışma kapsamında, elde edilen sonuçlar incelendiğinde tarama hızının artması ile azalan ve lazer gücünün artması ile artan Si çökelti boyutları gözlenmektedir (bkz. Şekil 4.5). Aynı zamanda, enerji yoğunluğu ile soğuma hızı kavramları birbiri ile ters orantılı olduğundan dolayı soğuma hızı ile ters orantılı olan çökelti boyutunun enerji yoğunluğu ile doğru orantılı olması beklenmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde, beklendiği üzere enerji yoğunluğunun artması ile Si çökelti boyutunun arttığı görülmektedir. Ek olarak, elde edilen çökelti sonuçları kullanılarak enerji yoğunluğu ile üstel bir fonksiyon elde edilmek istendiğinde, R^2 değeri 0.96 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5: Si çökelti boyutunun a) tarama hızına b) lazer gücüne göre değişimi



Şekil 4.6: Si çökelti boyutunun enerji yoğunluğuna göre değişimi

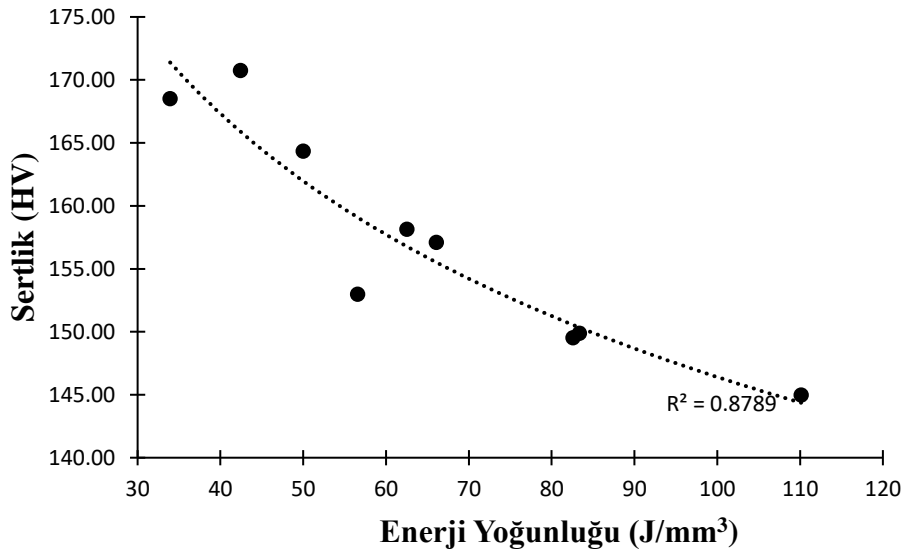
4.1.4. Nano-İndentasyon Test Sonuçları

Bölüm 3.2.4'te belirtilen literatürdeki sonuçlar incelendiğinde, SLE ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesinin sertlik değerinin 1.35-2.10 GPa aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, farklı proses parametreleri ile üretilen numunelerin NI sertlik testi ile elde edilen sertlik değerleri Tablo 4.1'de belirtilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, sertlik değerlerinin 1.56-1.84 GPa aralığında değiştiği gözlenmiştir ve literatürde yapılan sertlik ölçümleri sonuçları ile uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 4.1: Numunelerin sertlik değerleri

Sertlik (HV)	Sertlik (GPa)	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
152.97 ± 6.14	1.652	190	1200	56.55
149.88 ± 7.92	1.618	280	1200	83.33
144.97 ± 6.58	1.565	370	1200	110.12
170.76 ± 9.92	1.847	190	1600	42.41
158.14 ± 7.43	1.708	280	1600	62.50
149.52 ± 5.53	1.614	370	1600	82.59
168.50 ± 10.65	1.819	190	2000	33.93
164.33 ± 5.41	1.775	280	2000	50.00
157.10 ± 6.37	1.696	370	2000	66.07

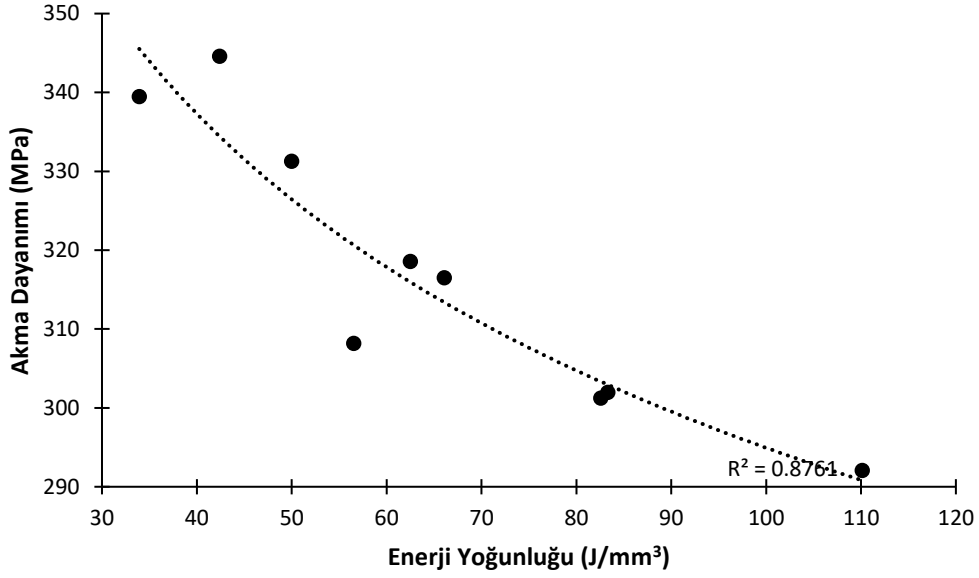
Seçici Lazer Ergitme prosesi ile üretilen AlSi10Mg, Al6061 ve AA2024 malzemeler için sertlik değerlerinin enerji yoğunluğu ile ters orantılı olduğu belirlenmiştir [132–134]. Şekil 4.7’de enerji yoğunluğuna göre değişen sertlik değerleri incelendiğinde, en düşük sertlik değeri en yüksek enerji yoğunluğu olan numunede gözlenirken, en yüksek sertlik değeri ise en düşük enerji yoğunluğuna sahip numunelerden birinde gözlenmiştir. Ek olarak, elde edilen sonuçlar kullanılarak üstel bir fonksiyon oluşturulduğunda, R^2 değeri yaklaşık 0.88 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7: Enerji yoğunluğuna göre sertlik değerlerinin değişimi

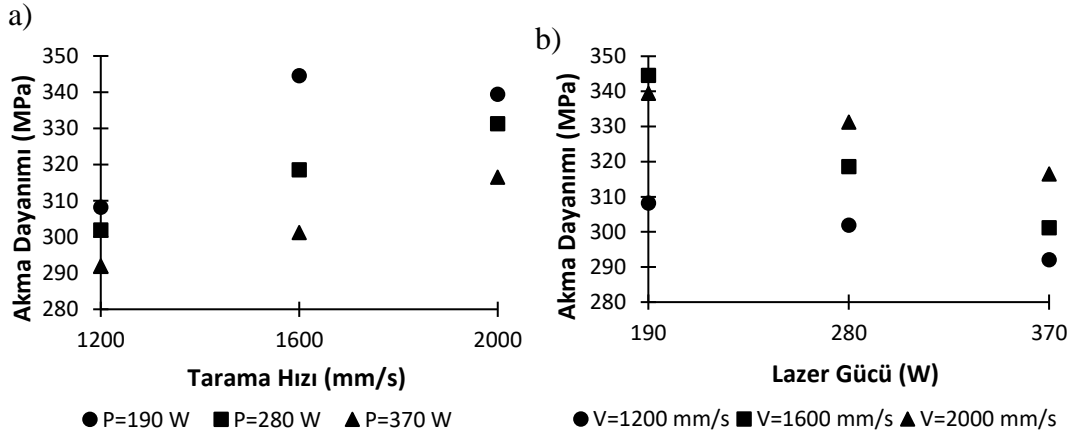
4.1.5. Akma Dayanımı Sonuçları

Bu çalışma kapsamında, gerinim sertleşmesi katsayısı yaklaşık 0.252 alınarak numunelerin akma dayanımları Denklem (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır. Sertlik-akma dayanımı ilişkisi incelendiğinde sertlik ile akma dayanımının doğru orantılı olduğu gözlenmiştir ve hesaplanan akma dayanımlarının enerji yoğunluğuna göre değişimi Şekil 4.8'de belirtilmiştir ve Şekil 4.7'de belirtilen değişim ile aynı olduğu gözlenmiştir. Ek olarak, sertlik değerlerinin, üstel bir fonksiyon ile temsil edilmesi ile birlikte R^2 değeri yaklaşık 0.88 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8: Enerji yoğunluğuna göre numunelerin akma dayanımı değerlerinin değişimi

SLE yöntemi kullanılarak farklı proses parametreleri ile üretilen ve başka bir işlem görmeyen yapılar için mekanik özellikler incelendiğinde, tarama hızının artması ile akma dayanımı yükselirken, lazer gücü ile akma dayanımının ters orantılı olduğu gözlenmiştir [132,135]. Bu çalışma kapsamında, değişen proses parametrelerine göre hesaplanan akma dayanımı sonuçları incelendiğinde, beklenildiği üzere, tarama hızının artması ile akma dayanımının arttığı ve lazer gücünün artması ile akma dayanımının azaldığı gözlenmektedir (bkz. Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Akma dayanımının a)tarama hızına göre değişimi b)lazer gücüne göre değişimi

4.2. Malzeme Seviyesi Sonuçların Entegrasyonu

Çalışmanın amacı, yapının topolojisinin ve proses parametrelerinin eş zamanlı optimizasyonu olduğu için proses parametrelerinin yapının mekanik özelliklerine ve üretim maliyetine olan etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Bölüm 4.1’de sonuçları elde edilen özellikler ile proses parametreleri (tarama hızı ve lazer gücü) arasında ilişki kurulmuştur.

4.2.1. Eriyik Havuz Sonuçlarının Entegrasyonu

Proses parametrelerinin değişmesinden etkilenen eriyik havuzun büyüklüğü yapının üretim süresini etkilemektedir. Üretim süresinin proses parametreleri cinsinden parametrik olarak hesaplanabilmesi için, Matlab yazılımı kullanılarak eriyik havuz alanı ile proses parametreleri arasında bir ilişki oluşturulmuştur. Soğuma hızı ile eriyik havuz arasındaki ilişki kurulurken üstel fonksiyonlardan yararlanılmaktadır [81]. Bu nedenle, eriyik havuz alanı denklemi oluşturulurken Denklem (4.2)’de belirtilen üstel bir fonksiyon kullanılmıştır.

$$f(P, v) = a_1 \left(\frac{\alpha P}{v} \right)^{a_2} \quad (4.2)$$

Burada, α lazeri absorbe etme katsayısı, P lazer gücü, v tarama hızı, a_1 ve a_2 denklem katsayılarıdır. SLE ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesi için $\alpha = 0.35$ olarak kabul edilmiştir [95].

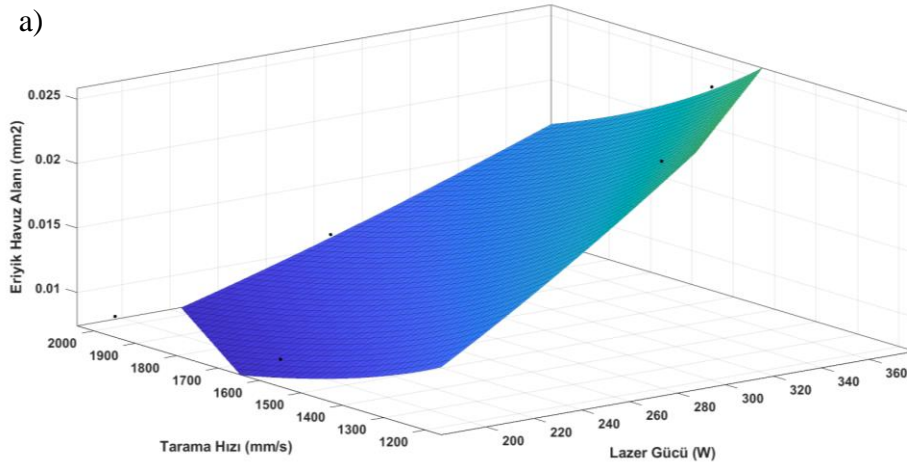
Denklemin katsayıları ve eğri uydurma parametreleri Tablo 4.2’de belirtilmiştir. Tabloda, belirtilen R_{adj}^2 parametresi eğri uydurma başarısının parametrelerinden bir tanesidir ve Denklem (4.3) ile hesaplanmaktadır. Denklem (4.3)’te, n veri adedi, k değişken sayısıdır ve R^2 değeri Denklem (4.1) ile hesaplanmaktadır. Denklem (4.4) ile hesaplanan normalize edilmiş RMSE ise tahmin edilen değerler ile veriler arasındaki uzaklığı hesaplayan bir hata metriğidir. Genellikle, bu değerın sıfıra yakın olması oluşturulan denklemin daha doğru olduğunu gösterir. Tablo 4.2’de verilen sonuçlara göre, R^2 ve R_{adj}^2 parametrelerinin 0.9 değerinin üzerinde olması deneysel çalışmalar için oldukça iyidir. Ayrıca, NRMSE değeri de %12.5 hata olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle, tahminin %87.5 oranında doğru tahmin yapıldığı söylenebilir. Tez kapsamındaki deneysel çalışmalar için NRMSE değeri %20’ye kadar olan değerlerinin kabul edilir olduğu değerlendirilmiştir. Ek olarak, oluşturulan fonksiyonun isometrik görüntüsü ve kontur sonuçları Şekil 4.10’da verilmiştir.

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[\frac{(1-R^2)(n-1)}{n-k-1} \right] \quad (4.3)$$

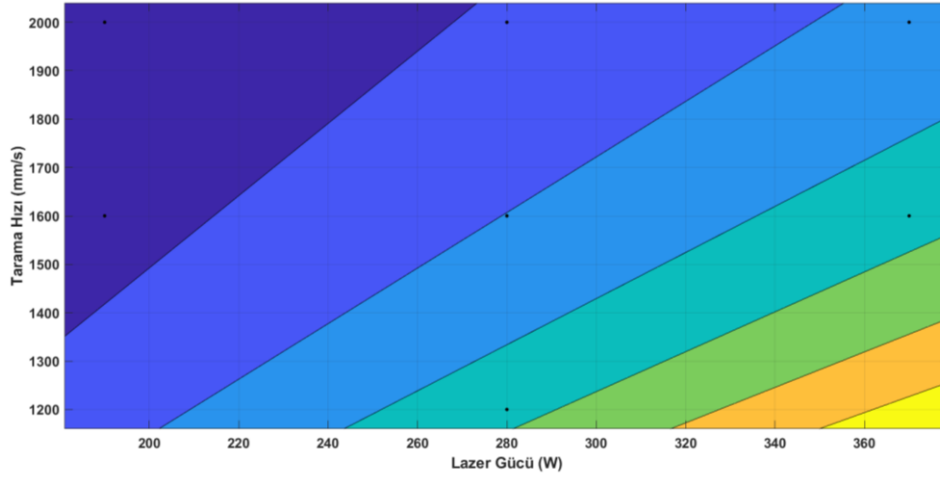
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}}{(y_{max} - y_{min})} \quad (4.4)$$

Tablo 4.2: Oluşturulan eriyik havuz alanı fonksiyonunun bilgileri

Denklem Adı	Denklem Taslağı	a_3	a_4	R^2	R_{adj}^2	NRMSE
Eriyik Havuz Alanı Proses Parametre İlişkisi	$f(P, v) = a_1 \left(\frac{\alpha P}{v} \right) a^2$	1.128	1.544	0.92	0.91	0.125



b)



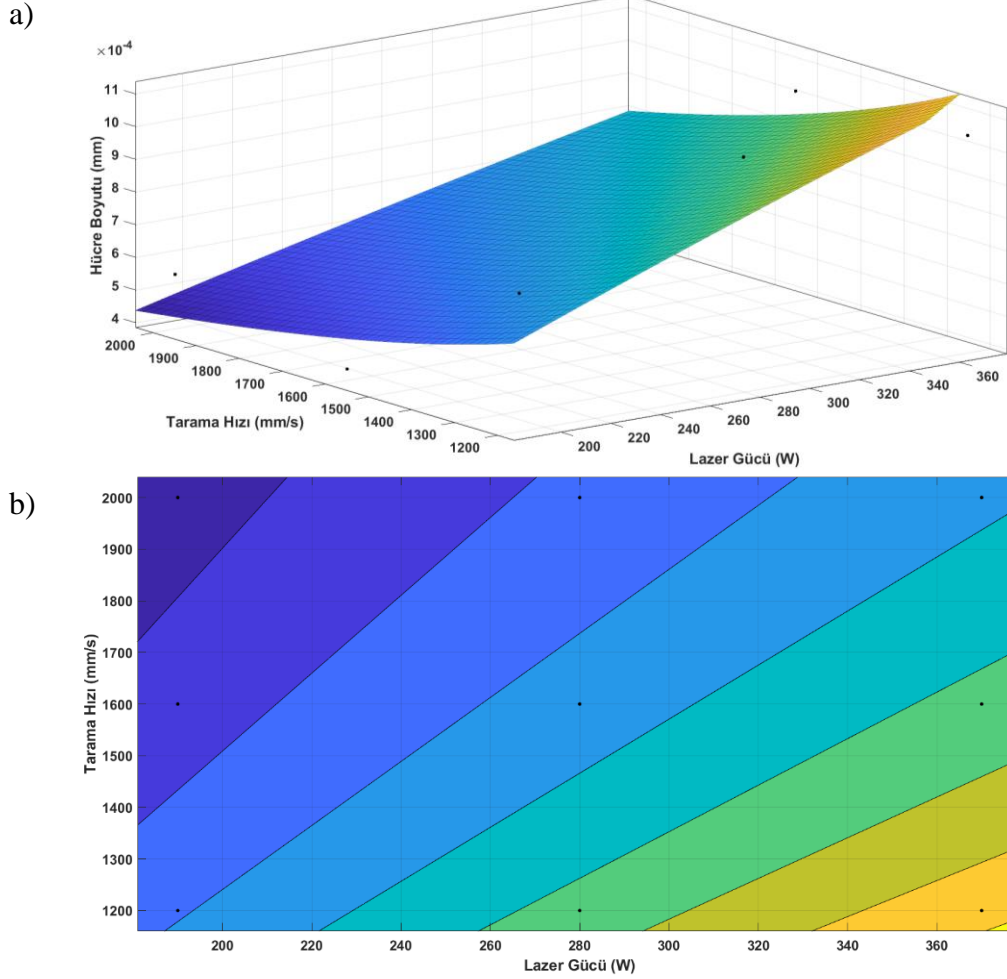
Şekil 4.10: Oluşturulan eriyik havuz alanı fonksiyonunun a) yüzey görüntüsü b) kontur görüntüsü

4.2.2. Hücre Boyutu Sonuçlarının Entegrasyonu

Proses parametrelerinin değişmesinden etkilenen ötektik Si hücre boyutu Hall-Petch mukavemetlendirme mekanizmasından dolayı yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Mekanik özelliklerin proses parametreleri cinsinden parametrik olarak hesaplanabilmesi için, Matlab yazılımı kullanılarak hücre boyutu ile proses parametreleri arasında bir ilişki oluşturulmuştur. Soğuma hızı ile hücre boyutu arasındaki ilişki kurulurken üstel fonksiyonlardan yararlanılmaktadır [81,95,97]. Bu nedenle, hücre boyutu denklemi oluşturulurken üstel bir fonksiyon kullanılmıştır. Denklemin katsayıları ve eğri uydurma parametreleri Tablo 4.3'te belirtilmiştir. Tablo 4.3'te verilen sonuçlara göre, NRMSE ile ölçülen tahmin hatası %18 civarındadır. Tahmin doğruluğunun daha yüksek olmamasının nedeni, mikroyapı içerisindeki konuma göre özelliklerin ve unsur boyutlarının değişmesi ve tüm numunelerde aynı konumdan görüntü almak pek mümkün olmamasıdır. Bu nedenlerle, hesaplanan doğruluk değerinin yeterli olduğu değerlendirilmiştir. Ek olarak, oluşturulan fonksiyonun izometrik görüntüsü ve kontur sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.3: Oluşturulan hücre boyutu fonksiyonunun bilgileri

Denklem Adı	Denklem Taslağı	a_3	a_4	R^2	R_{adj}^2	NRMSE
Hücre Boyutu Proses Parametre İlişkisi	$f(P, v) = a_3 \left(\frac{\alpha P}{v}\right)^{a_4}$	0.0067	0.788	0.78	0.75	0.184



Şekil 4.11: Oluşturulan hücre boyutu fonksiyonunun a) yüzey görüntüsü b) kontur görüntüsü

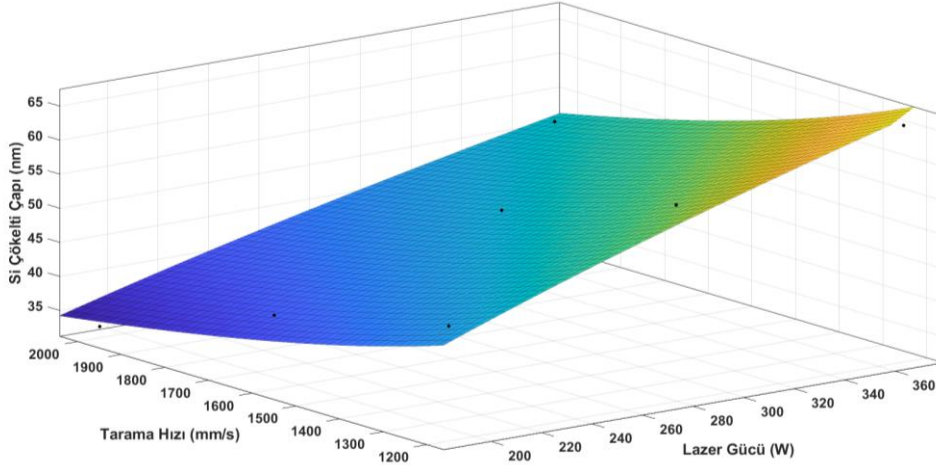
4.2.3. Si Çökelti Sonuçlarının Entegrasyonu

Proses parametrelerinin değişmesinden etkilenen Si çökeltilerinin çap büyüklükleri Orowan mukavemetlendirme mekanizmasından dolayı yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Mekanik özelliklerin proses parametreleri cinsinden parametrik olarak hesaplanabilmesi için Si çökelti çapı ile proses parametreleri arasında bir ilişki Matlab yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Soğuma hızı ile Si çökeltileri arasındaki ilişki kurulurken üstel fonksiyonlardan yararlanılmaktadır [131]. Bu nedenle, Si çökelti çapı denklemini oluşturulurken üstel bir fonksiyon kullanılmıştır. Denklemin katsayıları ve eğri uydurma parametreleri Tablo 4.4'te belirtilmiştir. Tablo 4.4'te verilen NRMSE sonucuna göre, tahminde yaklaşık %6 hata bulunmakta olup, bu hata değerinin oldukça başarılı olduğu değerlendirilmektedir. Ek olarak, oluşturulan fonksiyonun isometrik görüntüsü ve kontur sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.

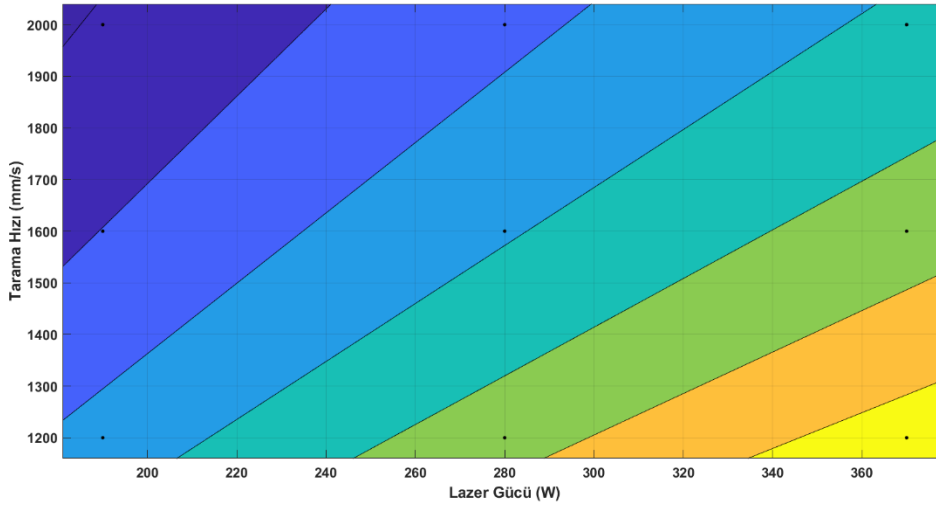
Tablo 4.4: Oluşturulan Si çökelti çapı fonksiyonunun bilgileri

Denklem Adı	Denklem Taslağı	a_5	a_6	R^2	R_{adj}^2	NRMSE
Si Çökelti Çapı Proses Parametre İlişkisi	$f(P, v) = a_5 \left(\frac{\alpha P}{v}\right)^{a_6}$	226.6	0.5445	0.96	0.96	0.062

a)



b)



Şekil 4.12: Oluşturulan Si çökelti çapı fonksiyonunun a) yüzey görüntüsü b) kontur görüntüsü

4.2.4. AlSi10Mg malzemesinin Akma Dayanımı Modelinin Oluşturulması

SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapıları için akma dayanımının belirlenmesi için ilgili mukavemetlendirme mekanizmalarının hesaplanması gerekmektedir. Bölüm 2.4'te belirtilen SLE ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesinin akma dayanımı modeli, deneysel sonuçlar sonrasında oluşturulan denklemler kullanılarak alt mukavemetlendirme mekanizmaları ile birlikte hesaplanmıştır.

4.2.4.1. Hall Petch Mukavemetlendirme Mekanizması

Hall-Petch denklemine göre, çok taneli metal malzemelerin mekanik özelliklerinin iç sürtünme gerilmesine (ing. internal friction stress) ve mikroyapıda oluşan tane boyutuna bağlıdır (bkz. Denklem (4.5)).

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'de, σ_0 tanelerin deformasyona gösterdiği direnci, k mukavemetlendirme katsayısı ve d tane boyutunu temsil etmektedir. Deformasyon sırasında, tane sınırları dislokasyon hareketini engeller ve fazla tane sınırına sahip sıkı bir mikroyapılı yapılar genellikle kaba mikroyapılı yapılara göre daha yüksek mekanik özelliklere sahiptirler [136].

Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg yapılarının Hall-Petch mukavemetlendirme mekanizması hesaplanırken tane boyutu yerine ötektik Si hücre boyutu kullanılmaktadır [65,67,69,137]. Bölüm 4.2.2'de proses parametreleri ilişkilendirilen hücre boyutu denklemi (bkz. Tablo 4.3) parametrik bir denklem olduğundan dolayı Hall-Petch mukavemetlendirme mekanizması hesaplanırken σ_0 terimi dahil edilmeyecektir ve Denklem (4.6)'de belirtilen denklem kullanılacaktır. Burada, $k=0.04 \text{ MPa m}^{1/2}$ olarak alınmıştır [138].

$$\sigma_{H-P} = \frac{k}{\sqrt{d_{\text{ötektik Si hücre}}}} \quad (4.6)$$

Bölüm 4.2.2'de elde edilen hücre boyutu denklemi, Denklem (4.6)'ya entegre edildiğinde Denklem (4.7) elde edilir ve Hall-Petch mekanizması proses parametrelerinin bir fonksiyonu olarak kullanılmaya hazır hale gelmiştir.

$$\sigma_{H-P}(P, v) = \frac{k}{\sqrt{0.0067 \left(\frac{\alpha_P}{v}\right)^{0.788}}} \quad (4.7)$$

Denklem (4.7) kullanılarak hesaplanan Hall-Petch gerilmesi ile Bölüm 3.2.2'de deneysel olarak elde edilen hücre boyutları kullanılarak hesaplanan Hall-Petch gerilmesi Tablo 4.5'te verilmiş olup, iki gerilme değeri arasındaki maksimum fark % 12.77'dir.

Tablo 4.5: Hesaplanan Hall-Petch gerilmeleri

Hall-Petch Gerilmesi (MPa) (Deneysel Sonuçlar ile)	Hall-Petch Gerilmesi (MPa) (Oluşturulan Denklem ile)	Fark (%)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
44.53	48.15	8.13	56.55
38.07	41.33	8.55	83.33
39.05	37.03	5.16	110.12
61.82	53.92	12.77	42.41
49.34	46.29	6.19	62.50
39.45	41.48	5.14	82.59
53.87	58.88	9.29	33.93
55.47	50.54	8.89	50.00
46.29	45.29	2.16	66.07

4.2.4.2. Orowan Mukavemetlendirme Mekanizması

SLE ile üretilmiş AlSi10Mg yapıları, plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketini engelleyen Si çöktelleri ve ötektik Si hücrelerin sınırları nedeniyle yüksek mukavemete sahiptir [62]. Yüksek mukavemete sahip olmasının nedeni; öncelikle Orowan mukavemetlendirme mekanizması, ardından Hall-Petch mukavemetlendirme mekanizmasıdır [63,64]. Al-Si alaşımları için Orowan gerilmesi Denklem (4.8) ile hesaplanmaktadır [64].

$$\sigma_{\text{Orowan}} = \frac{\varphi G b}{d_{\text{Si}}} \left(\frac{6V_{\text{Si}}}{\pi} \right)^{1/3} \quad (4.8)$$

Burada, φ malzeme sabiti (yarı bağıdaşık Si çöktelleri için 0.4) [139], G kayma modülü (Al matrisi için 26.5 GPa), b Burger vektörü (Al için 0.286 nm) [63], d_{Si} Si çöktellerinin çapı ve V_{Si} Si çöktellerinin hacim oranıdır (%2.5) [64].

Bölüm 4.2.3'te elde edilen Si çökelti çapı denklemi, Denklem (4.8)'e entegre edildiğinde Denklem (4.9) elde edilir ve Orowan mekanizması proses parametrelerinin bir fonksiyonu olarak kullanılmaya hazır hale gelmiştir.

$$\sigma_{\text{Orowan}}(P, v) = \frac{\varphi G b}{226.6 \left(\frac{\alpha P}{v} \right)^{0.5445}} \left(\frac{6V_{\text{Si}}}{\pi} \right)^{1/3} \quad (4.9)$$

Denklem (4.9) kullanılarak hesaplanan Orowan gerilmesi ile Bölüm 3.2.3'te deneysel olarak elde edilen Si çökelti boyutları kullanılarak Denklem (4.8) ile hesaplanan Orowan gerilmesi Tablo 4.6'da verilmiştir. Tablo 4.6 incelendiğinde, iki gerilme arasındaki maksimum farkın % 7.65 olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6: Hesaplanan Orowan gerilmeleri

Orowan Gerilmesi (MPa) (Deneysel Sonuçlar ile)	Orowan Gerilmesi (MPa) (Oluşturulan Denklem ile)	Fark (%)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
100.59	102.88	2.28	56.55
80.50	83.30	3.48	83.33
73.33	71.57	2.40	110.12
114.87	120.32	4.75	42.41
93.52	97.42	4.17	62.50
85.46	83.70	2.05	82.59
147.12	135.87	7.65	33.93
115.66	110.01	4.89	50.00
94.16	94.52	0.38	66.07

4.2.4.3. Dislokasyon Sertleştirme Mekanizması

Dislokasyon sertleşmesi mekanizması, alüminyum alaşımlarının mikroyapı özelliklerine göre değişmektedir [140]. Si çökeltileri sadece Orowan mekanizması ile yapının mukavemetini artırmaz aynı zamanda dislokasyonlar ile etkileşiminden ötürü gerinim sertleşmesi mekanizmasına da katkı yapmaktadır [141]. Dislokasyon sertleşmesi Denklem (4.10) ile hesaplanmaktadır [65].

$$\sigma_{\text{dislokasyon}} = \beta M G b \sqrt{\rho_d} \quad (4.10)$$

Burada, β mukavemetlendirme katsayısı (zamana bağlı değişmeyen deformasyon sırasında çoklu kayma sistemlerine sahip yapılar için 0.25 [142], M Taylor faktörü (YMK kristal yapıları malzemeler için 3.06) [63] ve ρ_d dislokasyon yoğunludur. ρ_d parametresi, proses parametrelerinden ve termal davranıştan etkilenmektedir, ancak, ölçümü yapılmadığından dolayı SLE ile üretilmiş ve üretildikten sonra işlem görmemiş AlSi10Mg malzemesi için $1.41 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ olarak alınmıştır [65]. Nano-indentasyon testleri sırasında, yükleme oranı sabit olduğu için zamana bağlı değişmeyen deformasyon hareketi kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında, dislokasyon yoğunluğu sabit olarak kabul edildiği için dislokasyon sertleştirme gerilmesi de sabittir ve Denklem (4.10) kullanılarak 68.85 MPa olarak hesaplanmıştır.

4.2.4.4. Test Sonuçları ile Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında kullanılan akma dayanımı modelinin içerdiği mukavemetlendirme mekanizmaları, elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak proses parametrelerinin bir fonksiyonu haline getirilmiştir. Denklem (4.11) incelendiğinde, Hall-Petch ve Orowan mukavemetlendirme mekanizmaları, sırasıyla değişken proses parametrelerine göre ölçülen ötektik Si hücre boyutu ve Si çökelti boyutları kullanılarak tarama hızı ve lazer gücünün bir fonksiyonu haline gelmiştir. Böylelikle, AlSi10Mg malzemesinin akma dayanımı modeli proses parametrelerinin bir fonksiyonu haline gelerek parametrik olarak hesaplanabilmektedir. Ancak, σ_0 terimi proses parametrelerinden bağımsızdır (Al için 72 MPa) ve dislokasyon sertleşmesi ölçülemediğinden dolayı sabit olarak alınmıştır.

$$\sigma(P, v) = \sigma_0 + \sigma_{\text{Hall-Petch}}(P, v) + \sigma_{\text{Orowan}}(P, v) + \sigma_{\text{dislokasyon}} \quad (4.11)$$

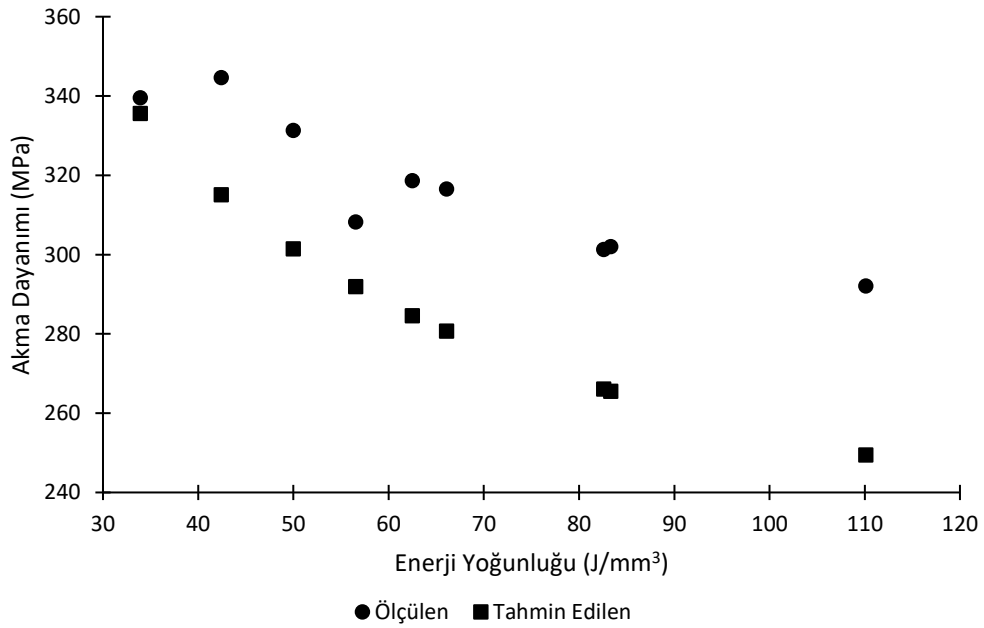
Bölüm 4.1’de elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak oluşturulan parametrik denklemler, Denklem (4.11)’e entegre edildiğinde Denklem (4.12) elde edilmektedir.

$$\sigma(P, v) = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{0.0067\left(\frac{\alpha P}{v}\right)^{0.788}}} + \frac{\varphi G b}{226.6\left(\frac{\alpha P}{v}\right)^{0.5445}} \left(\frac{6V_{\text{Si}}}{\pi}\right)^{1/3} + \beta M G b \sqrt{\rho_d} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12) kullanılarak, Tablo 3.5’te belirtilen 9 farklı proses parametre kombinasyonu ile üretilen numune için, SLE ile üretilmiş ve üretimden sonra işlem görmemiş AlSi10Mg malzemesi için akma dayanımları hesaplanmıştır (bkz Tablo 4.7). Denklem (4.12) ve NI test sonuçları ile hesaplanan akma dayanımları karşılaştırıldığında, iki değer arasında oluşan farkın enerji yoğunluğuna göre değişiklik göstererek %1.15-14.59 aralığında olduğu belirlenmiştir. Arada oluşan bu yüzdesel farkın deneysel ölçüm hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Maksimum %14.59 oranında oluşan fark, çalışma kapsamında kabul edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. Ek olarak, oluşturulan denklemler ile hesaplanan ve NI testi ile ölçülen akma dayanımlarının farklı enerji yoğunluklarına göre değişimi Şekil 4.13’te gösterilmiştir.

Tablo 4.7: AISi10Mg malzemesinin deneysel olarak ve parametrik olarak hesaplanan akma dayanımlarının karşılaştırması

Numune	Ölçülen Akma Dayanımı (MPa) (NI Test Sonucu)	Hesaplanan Akma Dayanımı (MPa)	Fark (%)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
1	308.1969	291.87	5.30	56.55
2	301.9706	265.47	12.09	83.33
3	292.0735	249.45	14.59	110.12
4	344.5886	315.09	8.56	42.41
5	318.5991	284.55	10.69	62.50
6	301.2354	266.03	11.69	82.59
7	339.4837	335.59	1.15	33.93
8	331.2795	301.39	9.02	50.00
9	316.5112	280.65	11.33	66.07



Şekil 4.13: Hesaplanan ve ölçülen akma dayanımlarının enerji yoğunluklarına göre değişimi

4.3. Tasarım Uygulama Problemleri

Geliştirilen tasarım yöntemi literatürdeki TOP3D isimli TO koduna entegre edilerek, sırasıyla ankastre kiriş, MBB kiriş ve L braket tasarım problemlerine uygulanmıştır [143]. Tasarım uygulama problemleri için kullanılan katsayılar Tablo 4.8'de belirtilmiştir. Tabloda, üretim ile ilgili maliyet parametreleri literatürdeki çalışmalardan alınmıştır [144,145].

Tablo 4.8: Tasarım problemlerinde kullanılan katsayılar

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
a_1	Eriyik havuz katsayısı	1.128	-
a_2	Eriyik havuz katsayısı	1.544	-
a_3	Hücre boyutu katsayısı	0.0067	-
a_4	Hücre boyutu katsayısı	0.788	-
a_5	Si çökelti boyutu katsayısı	226.6	-
a_6	Si çökelti boyutu katsayısı	0.5445	-
c_b	Bakım maliyeti	50000	\$
c_e	Elektrik maliyeti	0.03	\$/kWsaat
c_i	İşçilik maliyeti	26	\$/saat
c_m	Birim malzeme maliyeti	120	\$/kg
c_y	Yatırım maliyeti	750000	\$
E_0	Elastik modül	72	GPa
E_{min}	Minimum elastik modül	10^{-9}	GPa
h	Tarama aralığı	112	μm
H	Yıllık çalışma süresi	70000	saat/yıl
k	Emniyet faktörü	1.5	-
K	Mantık fonksiyonu katsayısı	100	-
L	Çalışma ömrü	7	yıl
p	Penaltı faktörü	3	-
P_0	Üretim öncesi lazer gücü	100	W
P_i	İlk iterasyondaki lazer gücü değeri	235	W
R	Red edilme oranı	3.5	%
t	Katman kalınlığı	25	μm
V_i	İlk iterasyondaki tarama hızı değeri	1400	mm/s
Y_{min}	Minimum akma dayanımı	10^{-6}	MPa
ρ_i	İlk iterasyondaki yapay yoğunluk değeri	v_f	-
ρ_{KS}	KS fonksiyonu birleştirme katsayısı	50	-
ρ_m	Malzeme özkütlesi	2.67	g/cm ³
α	Soğurma katsayısı	0.35	-
η	Hurda oranı	1	%

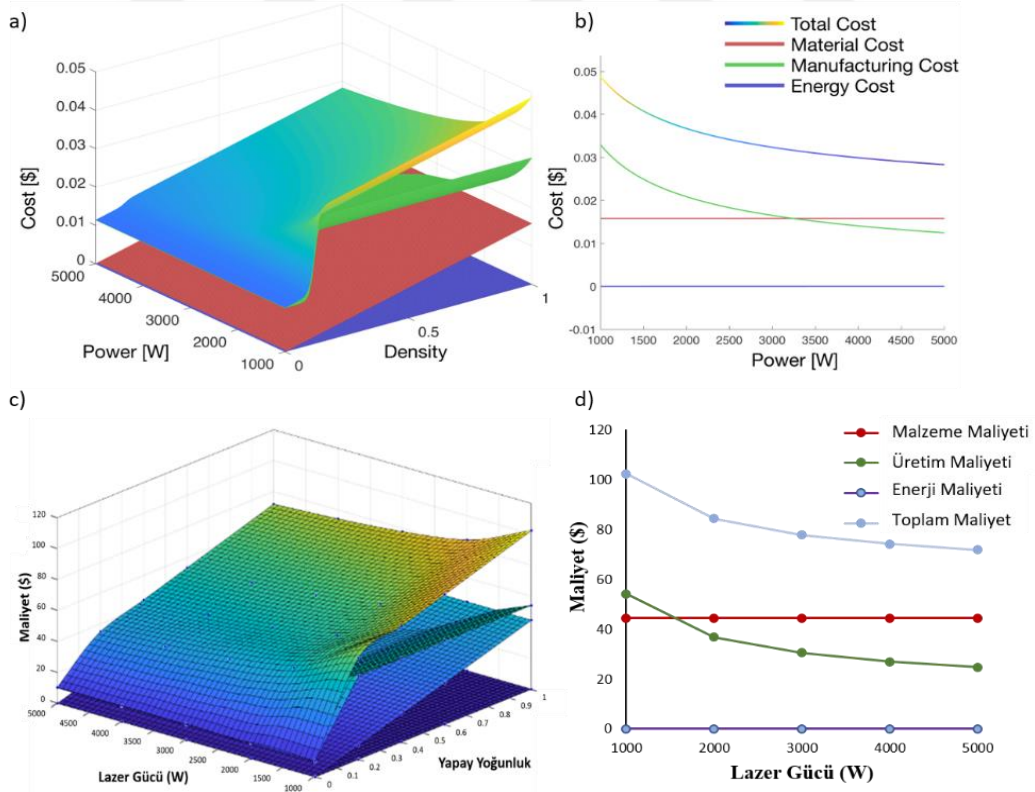
4.3.1. Doğrulama Çalışmaları

Geliştirilen yöntemin tasarım uygulamalarına geçmeden önce, Ti6Al4V malzemesi için literatürde bulunan EPPTO problemi çözümleri karşılaştırılarak algoritma doğrulanmıştır. Doğrulama problemleri Denklem (4.13) kullanılarak çözülmüştür ve denklem incelendiğinde, Bölüm 3.3.4'te belirtildiği üzere tarama hızı direkt olarak üst

sınırına yakınsadığından sadece yapay yoğunluk ve lazer gücünün optimum değerleri aranmaktadır. Doğrulama çalışmaları kapsamında, ilgili katsayılar literatürde referans alınan çalışma ile aynı alınmıştır [70].

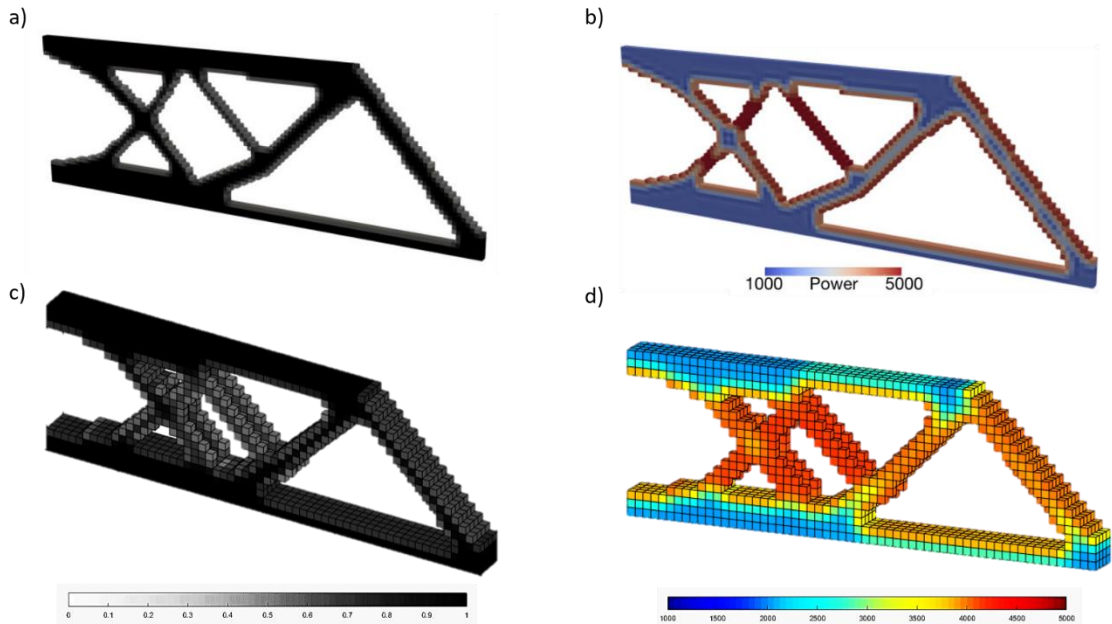
$$\begin{aligned}
 \text{Bul} & \quad [\rho_1, \dots, \rho_N, P_1, \dots, P_N,]^T \\
 \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}) \\
 \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
 & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{V_0} - v_f \leq 0 \\
 & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}) \leq 0 \\
 & \quad 1000 \leq P_i \leq 5000 \\
 & \quad V_i = 42.33
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Maliyet fonksiyonu, üretim maliyeti, malzeme maliyeti ve enerji maliyetinin yapay yoğunluk ve lazer gücüne göre değişimleri Şekil 4.14'te belirtilmiştir. Şekil 4.14'te literatürde yapılan çalışmalar ve bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, toplam maliyet ve alt bileşenlerinin tasarım değişkenlerine göre izlediği eğilimlerin aynı olduğu gözlenmiştir.



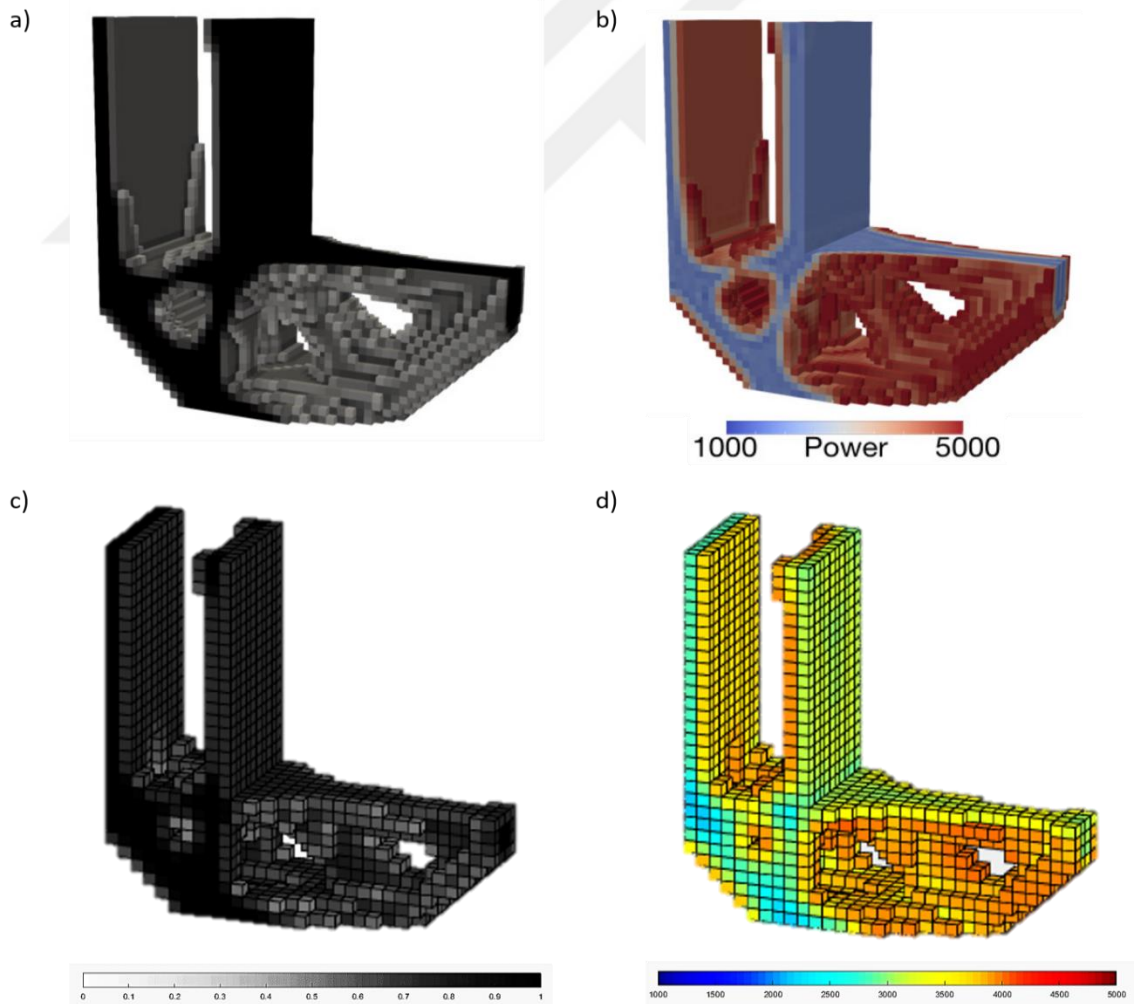
Şekil 4.14: Maliyet fonksiyonu bileşenlerinin yapay yoğunluk ve lazer gücü parametrelerine göre değişimi a, b) literatür sonuçları [70] c, d) bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar

Aynı zamanda, Denklem (4.13) kullanılarak sırasıyla ankastre kiriş ve L braket tasarım problemleri çözülmüştür. Ankastre kiriş probleminin çözümü sonucunda elde edilen tasarım ve lazer gücü dağılımı sonuçları Şekil 4.15'te verilmiştir. İlk tasarım değişkeni seti olan yapay yoğunluk değerlerinin belirlediği optimum tasarım topolojileri incelendiğinde, literatürde sunulan [70] optimum topoloji (Şekil 4.15-a) ile bu çalışmada elde edilen optimum topolojinin (Şekil 4.15-c) iç yüzeylerinin birbirleri ile bağlantı şekilleri ve dış yüzeylerinin aynı olduğu görülmektedir. Tasarımların topolojilerinin aynı olması optimum yapay yoğunluk sonuçlarının aynı olduğu anlamına gelmektedir.. Öte yandan, ikinci tasarım değişkeni olan optimum lazer gücü dağılımı sonuçları incelendiğinde, Şekil 4.15-b'de literatürde elde edilen sonuçta tasarımın iç taraflarında yüksek lazer gücü ve sınır yüzeylerinde göreceli olarak daha düşük lazer gücü gereksinimi olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.15-d'de belirtilen bu çalışma kapsamında elde edilen optimum lazer gücü dağılımı incelendiğinde ise, dış yüzeylerde düşük lazer gücü sonucu elde edilmişken iç kısımlarda daha yüksek lazer gücü ile tarama yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu değerlendirmeler ışığında, ankastre kiriş tasarımı problemi için iki tasarım değişkeni (yapay yoğunluk ve lazer gücü) için de sonuçların birbiriyle oldukça benzer olduğu değerlendirilmiştir.. Optimum lazer gücü dağılımlarının renk dağılımının farklı olmasının nedeni ise, literatürde sunulan sonuçların ParaView yazılımı ile bu çalışmada sunulan sonuçların Matlab yazılımı ile elde edilmesidir.



Şekil 4.15: Ankastre kiriş tasarımı probleminin sonuçları a, b) literatür sonuçları [70] c, d) bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar

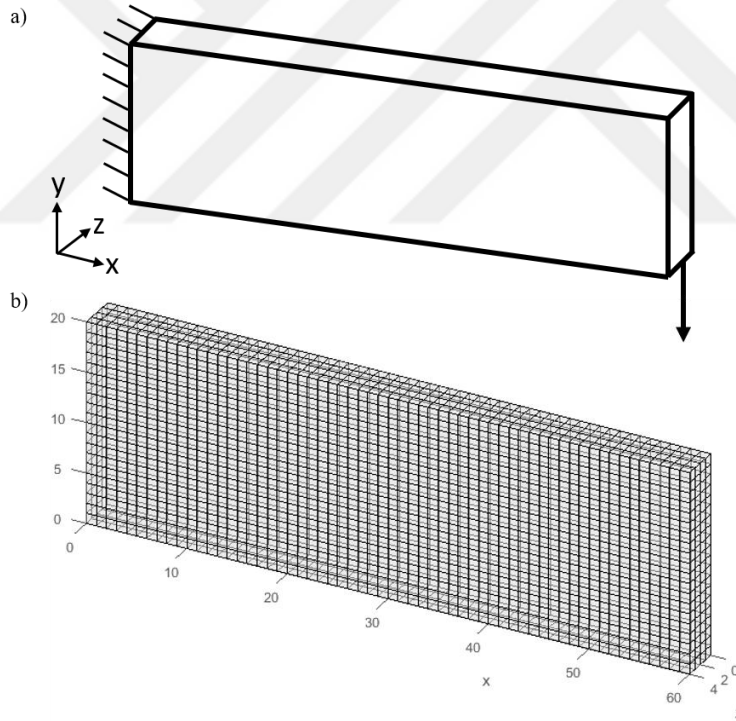
Doğrulama çalışmaları kapsamında, ikinci uygulama olan L braket tasarımı için EPPTO problemi Denklem (4.13) kullanılarak çözülmüştür. Şekil 4.16-a'da literatürde yapılan çalışmanın sonucu ve Şekil 4.16-c'de bu çalışma kapsamında elde edilen sonuç verilmiştir. L braket tasarımı sonucunda, literatürde sunulan [70] optimum topoloji ile bu çalışmada elde edilen topoloji karşılaştırıldığında, braketlerin dış yüzeylerinin, iç yüzeylerin birleşme şekillerinin ve içerdiği boşlukların aynı olduğu görülmektedir. Öte yandan, Şekil 4.16-b'de literatürde sunulan [70] optimum lazer gücü dağılımı ve Şekil 4.16-d'de bu çalışma kapsamında elde edilen optimum lazer gücü dağılımı verilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, tasarımların dış hatlarının düşük lazer gücü ile ve iç yüzey ve bağlantı yüzeylerinin daha yüksek lazer gücü ile taranması gerektiği iki sonuca bakarak da anlaşılmaktadır. Bu değerlendirmeler gözetilerek, çalışma kapsamında elde edilen L braket tasarımı çözümlerinin literatürde yapılan çalışma ile oldukça benzer olduğu ve doğrulandığı değerlendirilmiştir.



Şekil 4.16: L braket tasarımı probleminin sonuçları a, b) literatür sonuçları [70] c, d) bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar

4.3.2. Ankastre Kiriş Tasarımı

Ankastre kiriş tasarımı problemi sırasıyla GTO, YTO, APPTO ve EPPTO olmak üzere 4 farklı yöntem ile çözülmüştür. Çözülen tüm problemler için hacim oranı (v_f) olarak 0.4 hedeflenmiştir. Problemlerin çözümü esnasında, optimizasyon yöntemi olarak MMA (Method of Moving Asymptotes) yöntemi kullanılmıştır [146]. MMA yöntemi, gradyan tabanlı bir yöntem olduğu için çözüm elde edilmek adına amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevlerine ihtiyaç duymaktadır ve bu çalışma kapsamında türevler analitik olarak hesaplanmıştır. Ankastre kiriş tasarımı için tasarım uzayı Şekil 4.17'de belirtilmiştir ve kuvvet kirişin serbest ucundan 1,2 ve 3. elemanlara uygulanmakta iken tasarım uzayının sol tarafındaki düğüm noktaları tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. Tasarım uzayı, x,y ve z eksenlerinde sırasıyla 1 mm boyutunda 60,20 ve 4 sonlu eleman kullanılarak modellenmiştir (bkz. Şekil 4.17-b).



Şekil 4.17: Ankastre kiriş tasarımı probleminin a) tasarım uzayı, yükleme ve sınır koşulları b) sonlu elemanlar ağı

4.3.2.1. Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO)

Ankastre kiriş tasarımı için GTO problemi Denklem (4.14) kullanılarak çözülmüştür.

$$\begin{aligned} \text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\ \text{Minimum} & \quad C(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{u}^T \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} \\ \text{Koşullar} & \quad \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = \mathbf{f} \\ & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{V_0} - 0.4 \leq 0 \\ & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \tag{4.14}$$

GTO probleminin bir fonksiyonu olmamasına rağmen, diğer optimizasyon çözümleri ile kıyaslamak adına toplam maliyet hesaplanmıştır. Toplam maliyet hesaplanırken, tarama hızı ve lazer gücü sabit olarak sırasıyla 1400 mm/s ve 235 W olarak alınmıştır. Bu değerler, ileride kullanılacak olan enerji yoğunluğu kısıtının olurlu bölgesi içerisinde kalacak şekilde seçilmiştir. Hacim kısıtlı GTO ile elde edilen optimum ankastre kiriş tasarımı Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



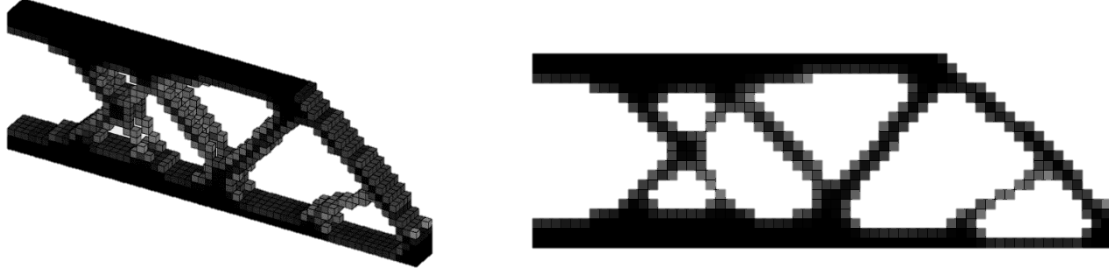
Şekil 4.18: GTO ile elde edilen optimum ankastre kiriş tasarımı

4.3.2.2. Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO)

Yapının mekanik dayanımını tasarım sürecine entegre edebilmek adına izin verilen maksimum esneklik kısıtı probleme eklenmiştir. Aynı zamanda, amaç fonksiyonu maliyet fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Ankastre kirişin YTO ile çözümü Denklem (4.15) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\ \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}) \\ \text{Koşullar} & \quad \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = \mathbf{f} \\ & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{V_0} - 0.4 \leq 0 \\ & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\ & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Toplam maliyet hesaplanırken, tarama hızı ve lazer gücü sabit olarak sırasıyla 1400 mm/s ve 235 W olarak alınmıştır. Bu değerler, ileride kullanılacak olan enerji yoğunluğu kısıtının uygun bölgesinin içerisinde kalacak şekilde seçilmiştir. Hacim kısıtlı YTO ile elde edilen optimum ankastre kiriş tasarımı Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19: YTO ile elde edilen optimum ankastre kiriş tasarımı

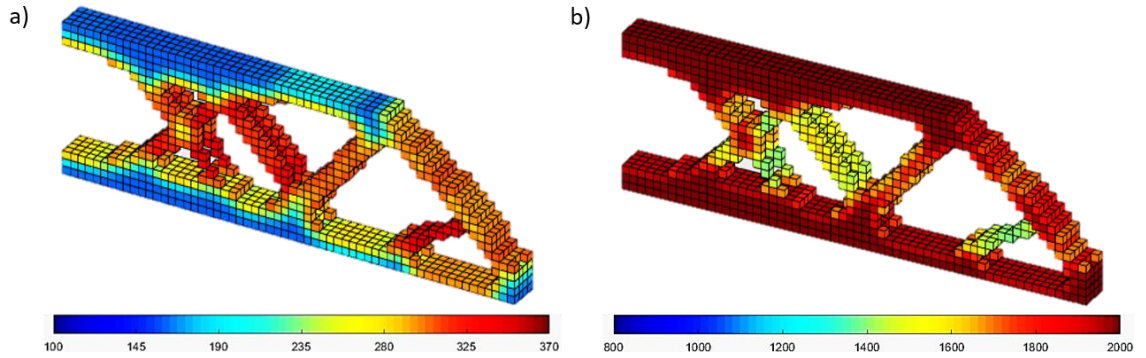
4.3.2.3. Ardışık Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO)

APPTO’da, YTO ile elde edilen tasarım topolojisi kullanılır ve topoloji değiştirilmeden toplam maliyeti minimize edecek şekilde her sonlu elemanın optimum lazer gücü ve tarama hızı aranmaktadır. Şekil 4.19’da verilen ve YTO sonucunda elde edilen optimum topoloji kullanılarak, her bir sonlu eleman için optimum lazer gücü ve tarama hızı Denklem (4.16)’da sunulan optimizasyon problemi çözülerek belirlenmiştir. Burada enerji yoğunluğu kısıtı, KS fonksiyonu ile birleştirilip probleme entegre edilmiştir.

<i>Bul</i>	$[P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T$	
<i>Minimum</i>	$Maliyet(\mathbf{P}, \mathbf{V})$	
<i>Koşullar</i>	$K(\boldsymbol{\rho})u = f$	(4.16)
	$C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0$	
	$33 \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 110$	
	$100 \leq P_i \leq 370$	
	$800 \leq V_i \leq 2000$	

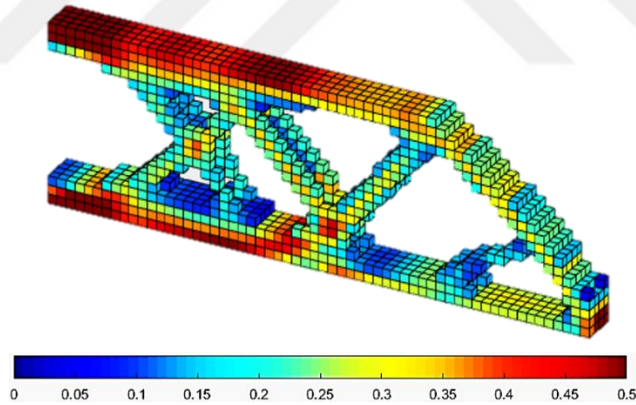
Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum lazer gücü dağılımı Şekil 4.20-a’da belirtmiştir. Şekil 4.20-a incelendiğinde, orta kısımlarında bulunan bağlantı kirişlerinin yüksek lazer gücü ile taranması gerekirken, sınır koşullarının uygulandığı bölgelere yakın parçanın dış çevresini oluşturan elemanların düşük lazer gücü ile taranması gerektiği saptanmıştır. Aynı zamanda, optimum tarama hızı dağılımı Şekil 4.20-b’de verilmiştir ve şekil incelendiğinde, lazer gücü dağılımı ile ters olarak, ankastre kirişin dış çevresini oluşturan elemanların yüksek tarama hızları ile taranması

gerektiği ve orta kısımlardaki elemanların daha düşük tarama hızlarında taranması gerektiği saptanmıştır.



Şekil 4.20: Ankastre kiriş problemi için APPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı

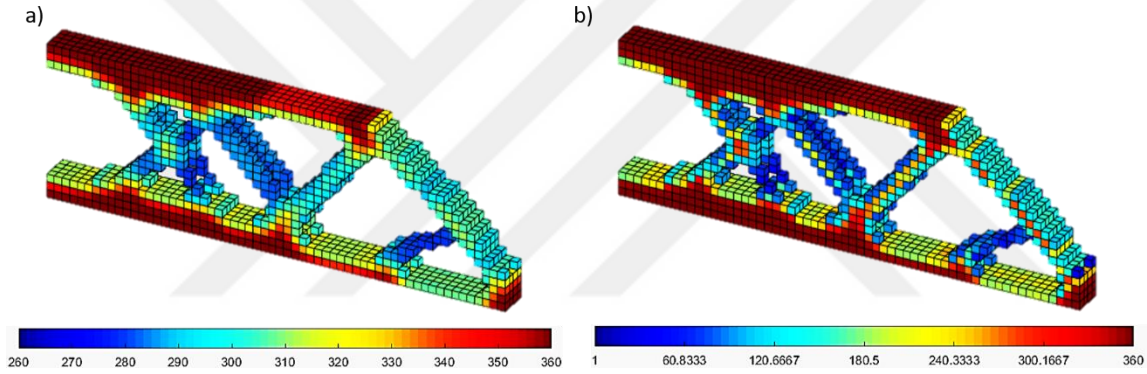
Elde edilen optimum proses parametrelere ve tasarıma göre hesaplanan ve normalize edilen Von-Mises gerilmesi Şekil 4.21’de gösterilmektedir. Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, beklendiği üzere, mesnete yakın elemanlar daha yüksek gerilmeye sahip iken orta kısımlardaki elemanların daha düşük gerilmeye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21: Ankastre kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı

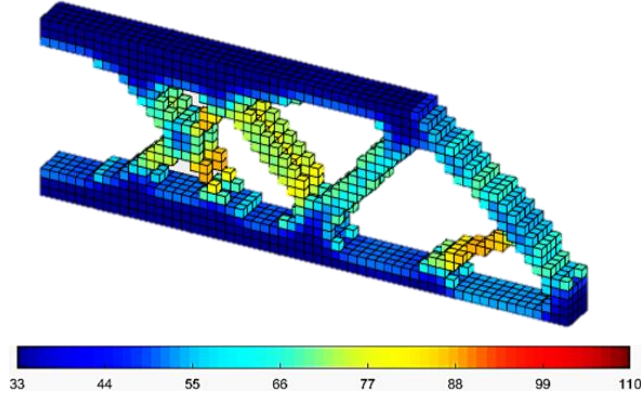
Yapının mekanik dayanım özelliklerinin esneklik kısıt fonksiyonu ile çözüme entegre edilmesi ile yüksek gerilmeye maruz kalan elemanların daha yüksek akma dayanımına sahip olması gerekmektedir. Ankastre kiriş elemanlarında oluşan normalize edilmiş Von-Mises gerilmelerinin değişimine göre sonlu elemanların akma dayanımları proses parametreleri tarafından manipüle edilmektedir. Şekil 4.9’da belirtilen test sonuçlarında ve Denklem (4.12) ile oluşturulan formülde, tarama hızının artması ile akma dayanımının arttığı ve lazer gücünün artması ile akma dayanımının düştüğu

belirlenmişti. O halde, beklenen sonuç olan yüksek Von-Mises gerilmesi olan elemanların yüksek tarama hızı ve düşük lazer gücü ile taranması gerektiği elde edilen optimizasyon sonucunda gözlenmektedir. Son olarak, Denklem (4.12) ile sadece proses parametrelerine göre hesaplanan ve Denklem (3.28) ile proses parametreleri ve yapay yoğunluk değerine göre hesaplanan akma dayanımı dağılımları Şekil 4.22’de belirtilmiştir. Yapının akma dayanımı dağılımı incelendiğinde, proses parametreleri ile elemanların akma dayanımı arasındaki ilişki (yüksek tarama hızı ve düşük lazer gücü α yüksek akma dayanımı) net olarak görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.22-a’da hesaplanan akma dayanımları, değiştirilmiş SIMP yöntemi kullanılarak yapay yoğunluk değeri ile işleme girdiğinden dolayı optimizasyon sırasında kullanılan elemanların son akma dayanımı dağılımı Şekil 4.22-b’de gösterilmiştir ve Von-Mises gerilme dağılımı ile benzer değişimler gözlenmektedir.



Şekil 4.22: Ankastre kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı

Ek olarak, Şekil 4.8’de verilen test sonuçlarında gözlemlendiği ve Denklem (4.12) ile formülize edildiği şekilde, enerji yoğunluğunun artması ile akma dayanımının düştüğü belirlenmişti. Şekil 4.23 verilen enerji yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, yüksek Von-Mises gerilmelerine sahip elemanların düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu anlaşılmıştır.



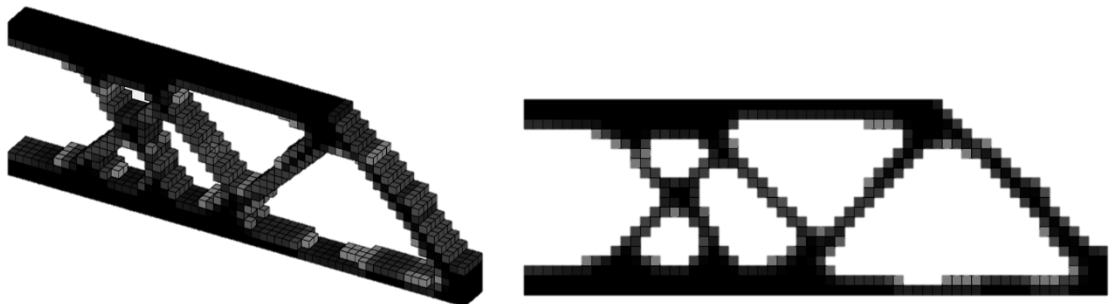
Şekil 4.23: Ankastre kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı

4.3.2.4. Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO)

EPPTO yönteminde, her bir sonlu eleman için yapay yoğunluk değeri ile proses parametreleri aynı anda optimize edilmektedir. Ankastre kiriş tasarımının ve üretim parametrelerinin optimum değerleri Denklem (4.17) çözümlenerek belirlenmiştir. Burada, enerji yoğunluğu kısıtı KS fonksiyonu ile birleştirilip probleme entegre edilmiştir.

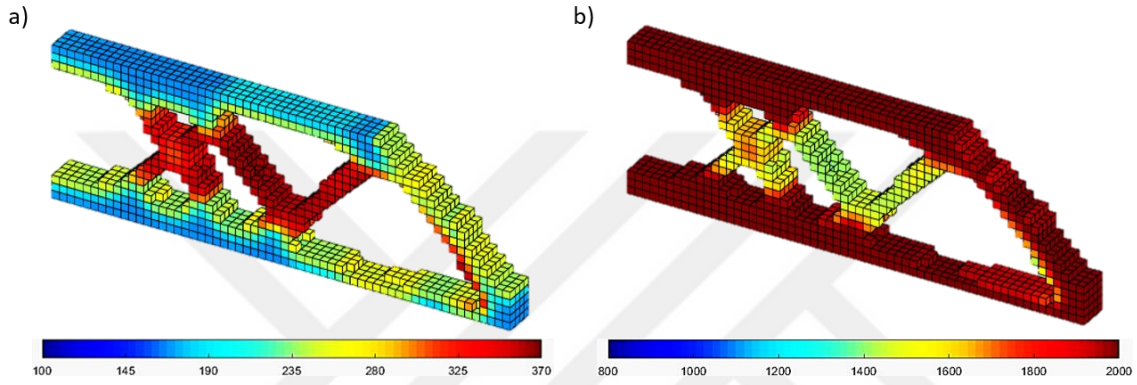
$$\begin{aligned}
 \text{Bul} & \quad [\rho_1, \dots, \rho_N, P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
 \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
 \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
 & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{V_0} - v_f \leq 0 \\
 & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
 & \quad 33 \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 110 \\
 & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \\
 & \quad 100 \leq P_i \leq 370 \\
 & \quad 800 \leq V_i \leq 2000
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Elde edilen optimum ankastre kiriş tasarımı Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Önceki bölümlerde elde edilen ankastre kiriş tasarımları ile karşılaştırıldığında, yapının dış çevresi dışarısında geri kalan kısımların tasarımının farklı olduğu anlaşılmaktadır.



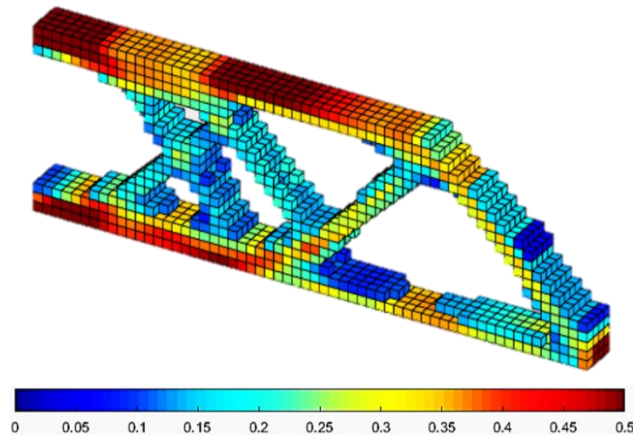
Şekil 4.24: EPPTO ile elde edilen optimum ankastre kiriş tasarımı

Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum lazer gücü ve tarama hızı dağılımları Şekil 4.25'te belirtmiştir. Şekil 4.25 incelendiğinde, APPTO çözümüne benzer olarak, tasarımın orta kısımlarında bulunan bağlantı kirişlerinin yüksek lazer gücü ile taranması gerekirken, sınır koşullarının uygulandığı bölgelere elemanların daha düşük lazer gücü gereksinii olduğu anlaşılmaktadır. Tarama hızı açısından ise lazer gücü dağılımı ile ters olarak yapının dış çerçeve elemanlarında yüksek hızlarda ve orta bağlantı kirişlerinde daha düşük hızlarda tarama yapılması gerekliliği görülmektedir.



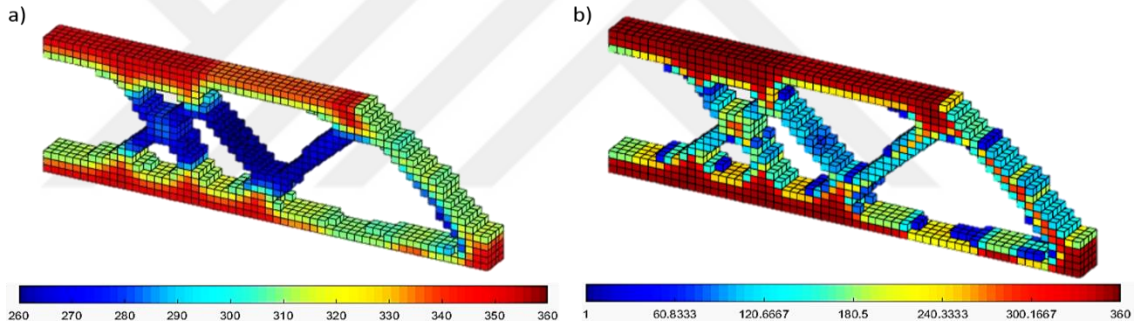
Şekil 4.25: EPPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı

Elde edilen optimum proses parametrelere ve tasarıma göre hesaplanan ve normalize edilen Von-Mises gerilmesi Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, beklendiği üzere, sınır koşuluna yakın elemanlar daha yüksek gerilmeye sahip iken orta kısımlardaki elemanların daha düşük gerilmeye sahip olduğu görülmektedir.



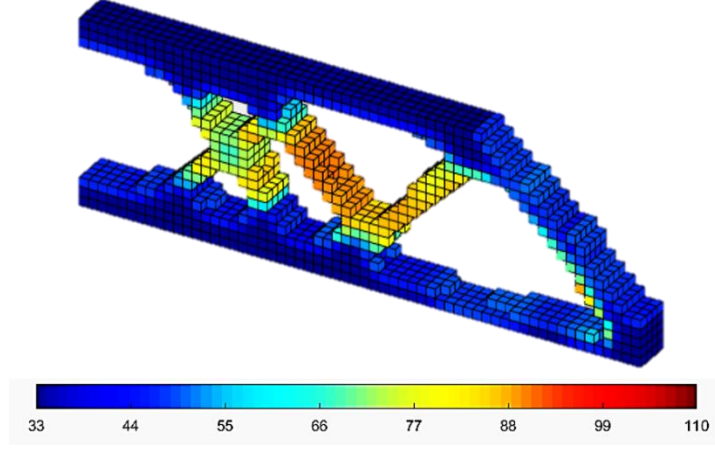
Şekil 4.26: Ankastre kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı

Test sonuçlarında (bkz. Şekil 4.9) ve oluşturulan denklemlerde (bkz. Denklem (4.12)) akma dayanımının tarama hızı ile doğru orantılı, lazer gücü ile ters orantılı olduğu belirlenmişti. Yapının mekanik dayanımı açısından, yüksek gerilmelere sahip bölgelerdeki elemanların mekanik özelliklerinin daha yüksek olması esneklik kısıtının sağlanması için gerekmektedir. Bu nedenle, yüksek gerilme değerlerine sahip elemanların yüksek hızlar ile ve düşük lazer gücü ile taranması gerektiği anlaşılmaktadır. Optimum proses parametrelerin dağılımları (bkz. Şekil 4.25) ve Von-Mises gerilme dağılımı (bkz. Şekil 4.26) incelendiğinde, beklenen bu davranışların gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Ek olarak, sadece proses parametrelerine bağlı olarak hesaplanan akma dayanımı (bkz. Denklem (4.12)) ve proses parametreleri ile yapay yoğunluk değerine göre hesaplanan akma dayanımı (bkz. Denklem (3.28)) dağılımı Şekil 4.27'de belirtilmiştir. Şekil 4.27 incelendiğinde, yapıda oluşan Von-Mises gerilme dağılımının elemanlara göre değişimi, akma dayanımı dağılımında da aynı şekilde gözlenmiştir.



Şekil 4.27: Ankastre kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı

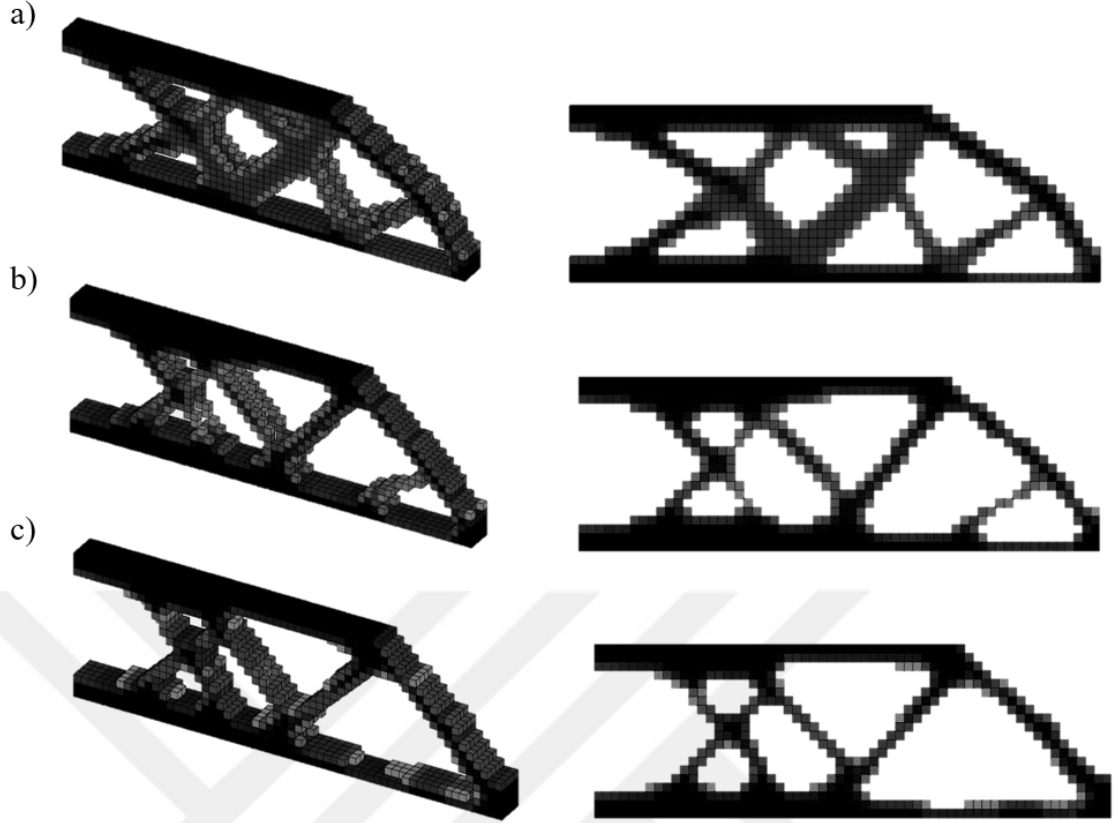
Ek olarak, EPPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluk dağılımı Şekil 4.28'de verilmiştir. Yüksek Von-Mises gerilme değerlerine ve yüksek akma dayanımına sahip elemanların düşük enerji yoğunluğu değerlerine sahip olması, test sonuçlarında gözlenen enerji yoğunluğu akma dayanımı ilişkisi ile açıklanmaktadır (bkz. Şekil 4.8).



Şekil 4.28: Ankastre kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı

4.3.2.5. Ankastre Kiriş Tasarımlarının Karşılaştırılması

Ankastre kiriş tasarımı için 4 farklı optimizasyon problemi (GTO, YTO, APPTO ve EPPTO) çözülmüştür. Elde edilen optimum tasarımlar incelendiğinde (bkz. Şekil 4.29), GTO ile elde edilen tasarımın diğer sonuçlara göre farklı olduğu görülmektedir ve esneklik kısıtının problemde yer almaması bu farklılığın nedeni olarak düşünülmektedir. Öte yandan, YTO sonucu ve EPPTO sonucu karşılaştırıldığında, tasarımların birbirlerine benzer olduğu, ancak YTO ile elde edilen tasarımda kuvvetin uygulandığı noktaya yakın bir şekilde destek için bir adet dikmenin yer aldığı görülmektedir. Tasarım değişikliğinin nedeni olarak, EPPTO probleminde, tasarım değişkenleri olan yapay yoğunluk, lazer gücü ve tarama hızının amaç ve kısıt fonksiyonlarına göre gradyanlarının aynı anda probleme entegre edilmesi olarak düşünülmektedir.



Şekil 4.29: Elde edilen ankastre kiriş tasarımları a) GTO, b) YTO (APPTO’da kullanılan tasarım) ve c) EPPTO

Tablo 4.9: Ankastre kiriş tasarımlarının üretim ve maliyet bilgileri

	GTO [ρ]	YTO [ρ]	APPTO [P, V] ρ	EPPTO [ρ, P, V]
Üretim Süresi (s)	0.301	0.270	0.254	0.245
Malzeme Maliyeti (\$)	0.631	0.623	0.623	0.631
Üretim Maliyeti (\$)	15.100	13.541	12.767	12.279
Enerji Maliyeti (\$)	0.002	0.002	0.002	0.002
Toplam Maliyet (\$)	15.737	14.170	13.395	12.915
GTO’ya göre maliyet farkı (%)	-	10.0	14.9	17.9

4 farklı yöntem ile çözülen ankastre kiriş tasarım problemi sonucunda elde edilen üretim süresi, toplam maliyet ve alt maliyet başlıkları Tablo 4.9’da belirtilmiştir. Tablo incelendiğinde, tüm çözümler için enerji maliyetlerinin aynı olduğu görülmektedir. Enerji maliyetinin toplam maliyete olan etkisi düşük olduğu için tasarım problemlerinde önemli bir rol oynamamıştır.

GTO ile yapının mekanik dayanımının göz önünde bulundurulduğu YTO çözümleri karşılaştırıldığında, toplam maliyet %10 azaltılmıştır. YTO ile elde edilen optimum

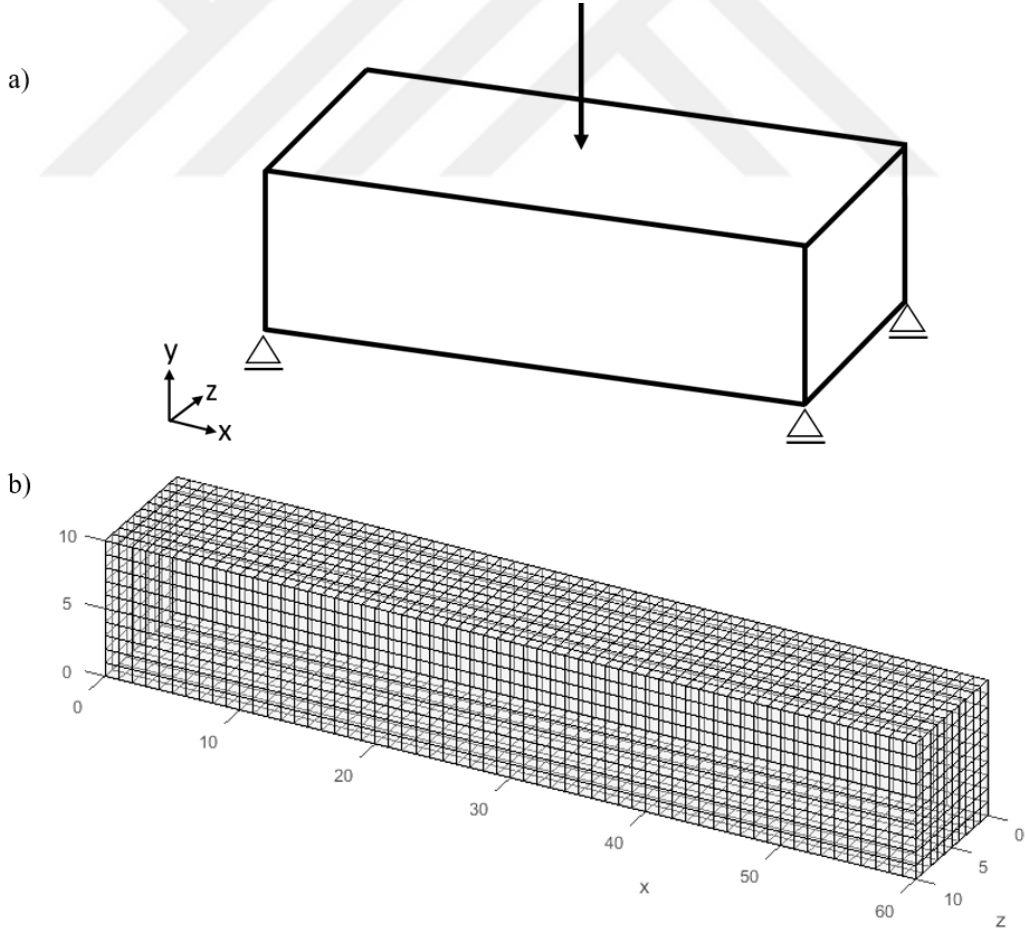
tasarımın kullanıldığı APPTO probleminde proses parametrelerinin optimum değerleri aranmıştır. Elde edilen sonuca göre, üretim parametrelerinin optimum değerlerinin elde edilmesi ile toplam maliyet YTO'ya göre %5 azaltılmıştır. Aynı zamanda, APPTO ile toplam maliyetin GTO'ya kıyasla %14.9 oranında azaltılması sağlanmıştır.

Hem yapay yoğunluğun hem de proses parametrelerinin eş zamanlı olarak optimize edildiği EPPTO sonucunda toplam maliyet APPTO sonucuna kıyasla %3 azaltılmıştır. Ayrıca, EPPTO sonucunda toplam maliyet GTO'ya kıyasla %17.9, YTO'ya kıyasla %8.9 azaltılmıştır. Sonuç olarak, tasarım ve üretim parametrelerinin eş zamanlı olarak optimize edilmesi ile mekanik dayanım isterini sağlayan ve en az maliyetli sonucu veren yöntem olduğu ve başarılı bir şekilde tasarım problemlerine uygulanabildiği anlaşılmıştır.



4.3.3. MBB Kiriş Tasarımı

MBB kiriş tasarımı problemi sırasıyla GTO, YTO, APPTO ve EPPTO olmak üzere 4 farklı yöntem ile çözülmüştür. Çözülen tüm MBB tasarım problemleri için, oluşturulan tasarım yönteminin farklı hacim oranlarında da kullanılabilirliğini kanıtlamak adına, hacim oranı v_f olarak 0.3 hedeflenmiştir. Problemlerin çözümü esnasında, optimizasyon yöntemi olarak MMA (Method of Moving Asymptotes) yöntemi kullanılmıştır [146]. MMA yöntemi, gradyan tabanlı bir yöntem olduğu için çözüm elde edilmek adına amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevlerine ihtiyaç duymaktadır ve bu çalışma kapsamında türevler analitik olarak hesaplanmıştır. MBB kiriş tasarımı için tasarım uzayı Şekil 4.30'da belirtilmiştir. Kuvvet kirişin ortasından noktasal olarak uygulanmakta iken y eksenine göre aşağıdaki köşelerde bulunan düğüm noktaları y ve z eksenlerindeki tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. Tasarım uzayı, x,y ve z eksenlerinde 1 mm boyutunda sırasıyla 60,10 ve 10 sonlu eleman kullanılarak modellenmiştir (bkz. Şekil 4.30-b).



Şekil 4.30: MBB kiriş tasarımı probleminin a) tasarım uzayı, yükleme ve sınır koşulları b) sonlu elemanlar ağı

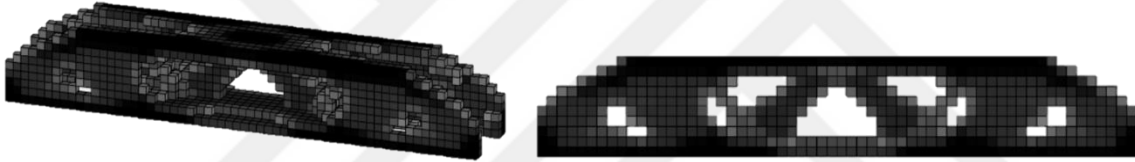
4.3.3.1. Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO)

MBB kiriş tasarımı için GTO problemi Denklem (4.18) kullanılarak çözülmüştür.

$$\begin{aligned} \text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\ \text{Minimum} & \quad C(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{u}^T K(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} \\ \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = f \\ & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{V_0} - 0.3 \leq 0 \\ & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \quad (4.18)$$

GTO probleminin bir fonksiyonu olmamasına rağmen toplam maliyet hesaplanmıştır. Toplam maliyet hesaplanırken, tarama hızı ve lazer gücü sabit olarak sırasıyla 1400 mm/s ve 235 W olarak alınmıştır.

Hacim kısıtlı GTO ile elde edilen optimum MBB kiriş tasarımı Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.31: GTO ile elde edilen optimum MBB kiriş tasarımı

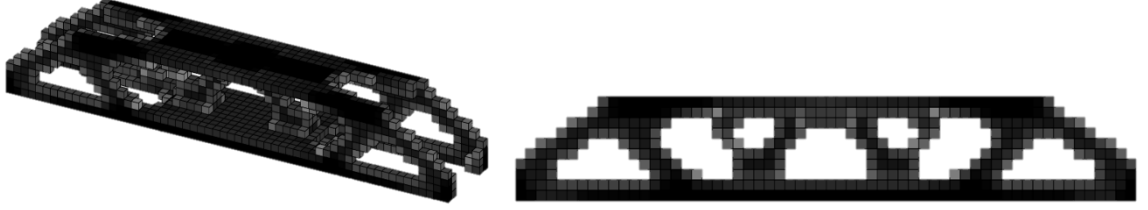
4.3.3.2. Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO)

MBB kirişin minimum maliyet amaç fonksiyonlu YTO problemi Denklem (4.19) kullanılarak çözülmüştür.

$$\begin{aligned} \text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\ \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}) \\ \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = f \\ & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{V_0} - 0.3 \leq 0 \\ & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\ & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Toplam maliyet hesaplanırken, tarama hızı ve lazer gücü sabit olarak sırasıyla 1400 mm/s ve 235 W olarak alınmıştır. Bu değerler, ileride kullanılacak olan enerji yoğunluğu kısıtının uygun bölgesinin içerisinde kalacak şekilde seçilmiştir.

Hacim kısıtlı YTO ile elde edilen optimum MBB kiriş tasarımı Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



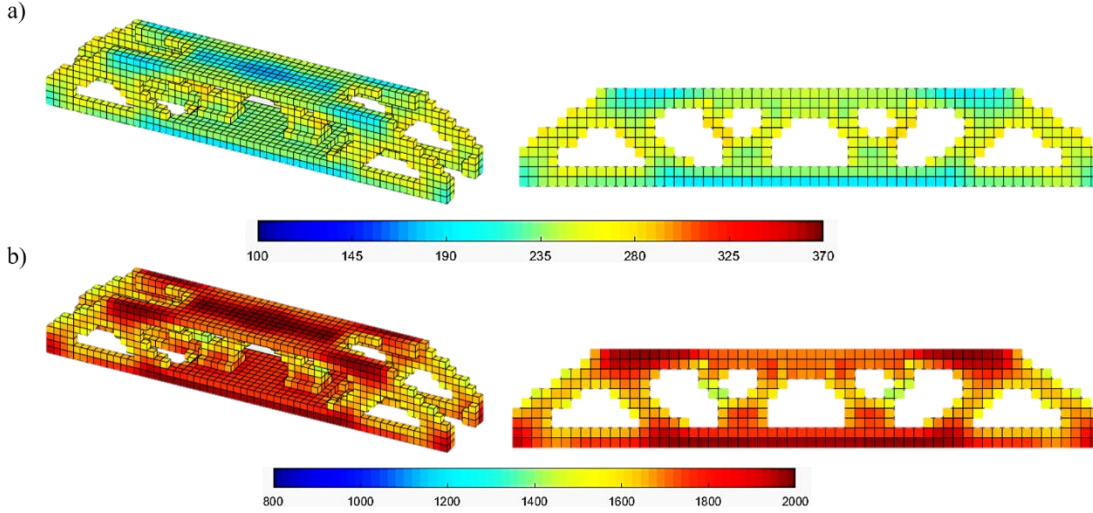
Şekil 4.32: YTO ile elde edilen optimum MBB kiriş tasarımı

4.3.3.3. Ardışık Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO)

APPTO yönteminde, YTO ile elde edilen tasarım kullanılır ve tasarım değiştirilmeden toplam maliyeti minimize edecek şekilde her sonlu elemanın optimum lazer gücü ve tarama hızı aranmaktadır. Şekil 4.32’de belirtilen YTO sonucunda elde edilen optimum tasarım kullanılarak tasarım değişkenleri olan sonlu elemanların lazer gücü ve tarama hızı Denklem (4.20) ile çözülmüştür ve enerji yoğunluğu kısıtı KS fonksiyonu ile birleştirilip probleme entegre edilmiştir.

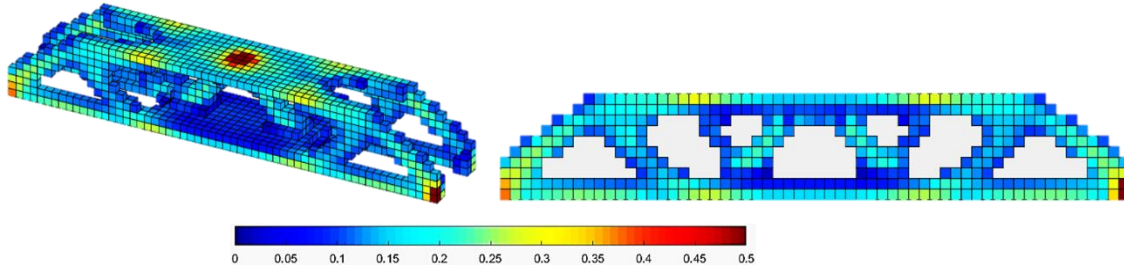
$$\begin{array}{ll}
 \text{Bul} & [P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
 \text{Minimum} & \text{Maliyet}(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
 \text{Koşullar} & K(\boldsymbol{\rho})\mathbf{u} = \mathbf{f} \\
 & C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
 & 33 \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 110 \\
 & 100 \leq P_i \leq 370 \\
 & 800 \leq V_i \leq 2000
 \end{array} \tag{4.20}$$

Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum lazer gücü ve tarama hızı dağılımları Şekil 4.33’te belirtilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde, kuvvetin uygulandığı bölgedeki sonlu elemanlar ile kirişin tavan ve taban bölgesindeki sonlu elemanların düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızı gereksinimi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.33: MBB kiriş problemi için APPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı

Elde edilen optimum proses parametrelere ve tasarıma göre hesaplanan ve normalize edilen Von-Mises gerilmesi Şekil 4.34'te gösterilmektedir. Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, kuvvetin noktasal olarak uygulanmasından dolayı maksimum gerilme kuvvet bölgesinde oluşurken, gelen yükleme sınır koşullarının olduğu bölgeye doğru ilerlemiştir. Sonuç olarak, Von-Mises gerilmeleri, kuvvetin uygulandığı bölgede daha yüksek olmakla birlikte tavan bölgesindeki neredeyse tüm sonlu elemanlarda ve sınır koşuluna yakın elemanlarda diğer bölgelerdeki sonlu elemanlara göre daha yüksek hesaplanmıştır.

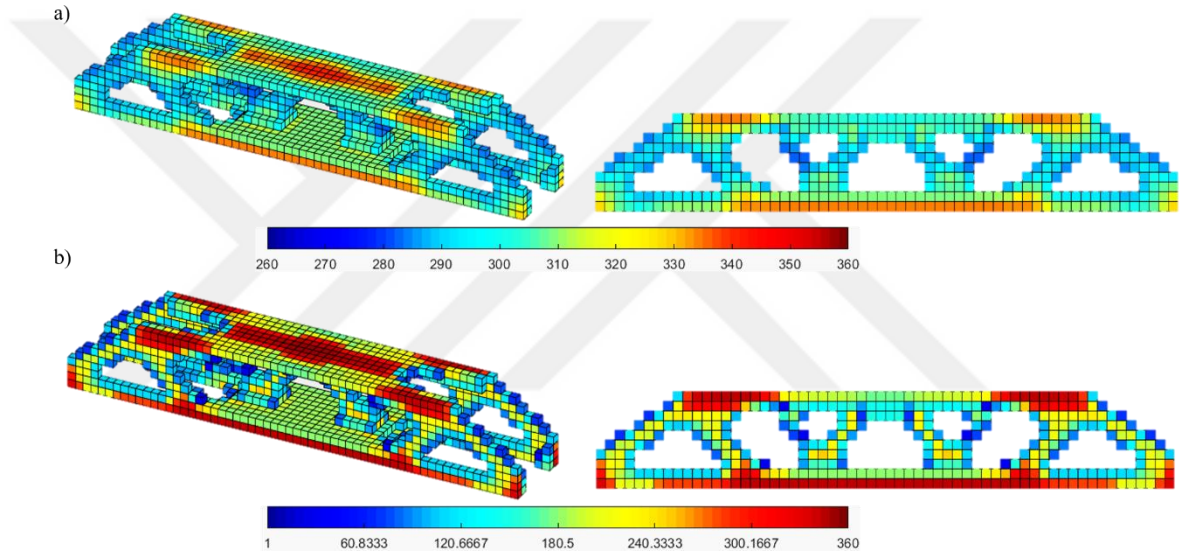


Şekil 4.34: MBB kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı

Optimizasyon problemine eklenen esneklik kısıtı, yüksek gerilmelere sahip sonlu elemanların izin verilen maksimum esneklik değerinin yüksek olması gerektiğini dikte eder. İzin verilen maksimum esneklik formülünde, değişken sonlu elemanın akma dayanımıdır (bkz. Denklem (3.26)). Deneysel sonuçlara göre oluşturulan akma dayanımı formülüne göre, tarama hızı arttığında veya lazer gücü azaldığında akma dayanımı artmaktadır (bkz. Denklem (4.12)). Buna göre, optimum tasarımda, Von-

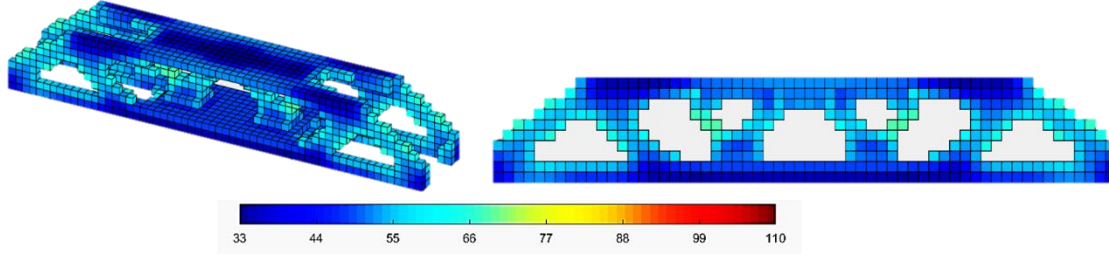
Mises gerilmesi yüksek olan sonlu elemanların lazer gücünün daha düşük ve tarama hızının daha yüksek olması gerekmektedir. MBB kiriş problemi için APPTO ile elde edilen optimum proses parametrelerinin dağılımı ve sonlu elemanların Von-Mises gerilme dağılımı incelendiğinde, beklenen davranış gözlemlendiği anlaşılmıştır (bkz. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34).

Aynı zamanda, Şekil 4.35-a'da hesaplanan akma dayanımları, değiştirilmiş SIMP yöntemi kullanılarak yapay yoğunluk değeri ile işleme girdiğinden dolayı optimizasyon sırasında kullanılan elemanların son akma dayanımı dağılımı Şekil 4.35-b'de gösterilmiştir ve Von-Mises gerilme dağılımı ile benzer değişimler gözlenmektedir.



Şekil 4.35: MBB kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı

Ek olarak, Şekil 4.8'de test sonuçlarında gözlemlendiği ve Denklem (4.12) ile formülize edildiği şekilde, enerji yoğunluğunun artması ile akma dayanımının düştüğü belirlenmişti. Şekil 4.36'da verilen enerji yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, yüksek Von-Mises gerilmelerine sahip elemanların düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu anlaşılmıştır.



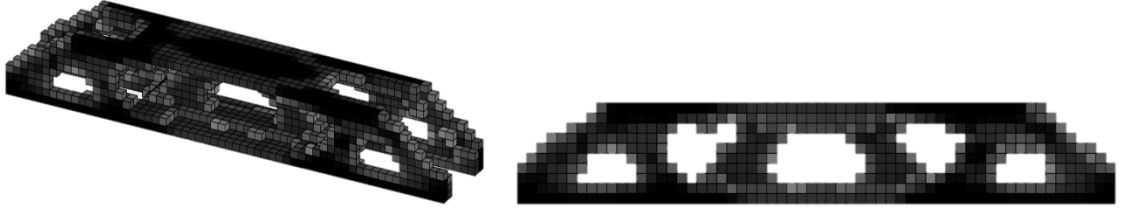
Şekil 4.36: MBB kiriş problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı

4.3.3.4. Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO)

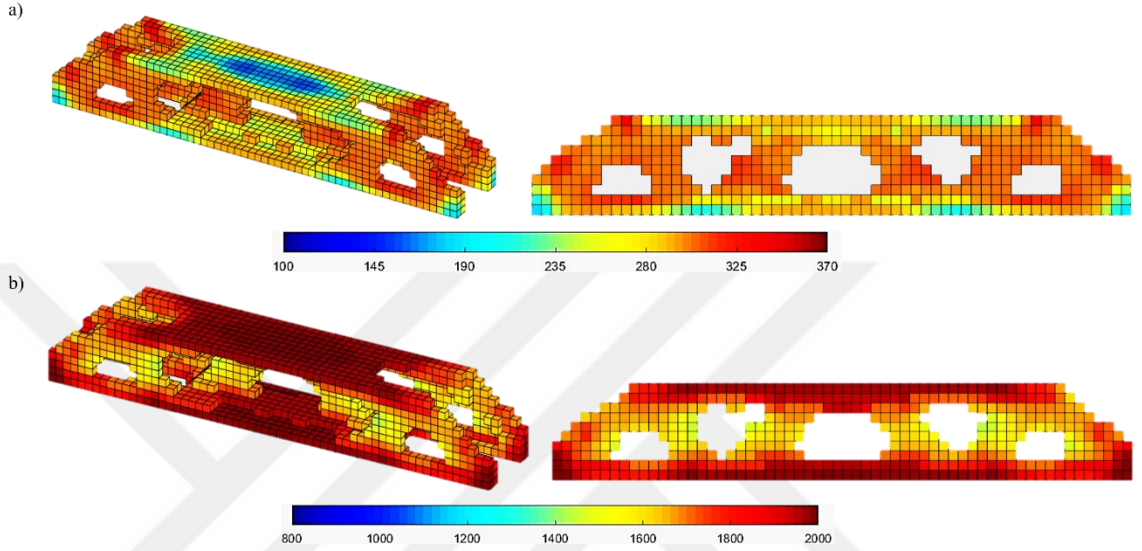
EPPTO yönteminde, yapay yoğunluk ile proses parametre değişkenleri aynı anda optimize edilmektedir. MBB kiriş tasarımının ve üretim parametrelerinin bu yöntemle optimum değerleri Denklem (4.21) kullanılarak aranmıştır ve enerji yoğunluğu kısıtı KS fonksiyonu ile birleştirilip probleme entegre edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{Bul} & \quad [\rho_1, \dots, \rho_N, P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
 \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
 \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
 & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{v_0} - v_f \leq 0 \\
 & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
 & \quad 33 \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 110 \\
 & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \\
 & \quad 100 \leq P_i \leq 370 \\
 & \quad 800 \leq V_i \leq 2000
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

Elde edilen optimum MBB kiriş tasarımı Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum lazer gücü ve tarama hızı dağılımları Şekil 4.38’de belirtmiştir. Optimum proses parametreleri incelendiğinde, APPTO çözümüne benzer olarak, kuvvetin uygulandığı bölgedeki elemanlar başta olmak üzere tavan bölgesinde yer alan neredeyse tüm sonlu elemanların ve sınır koşullarına yakın bölgedeki elemanlar başta olmak üzere taban bölgesindeki çoğu sonlu elemanın göreceli olarak düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızı gereksinimi olduğu anlaşılmaktadır.

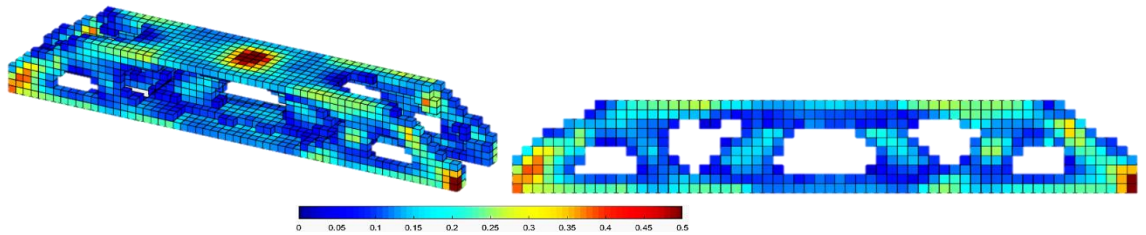


Şekil 4.37: EPPTO ile elde edilen optimum MBB kiriş tasarımı



Şekil 4.38: EPPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı

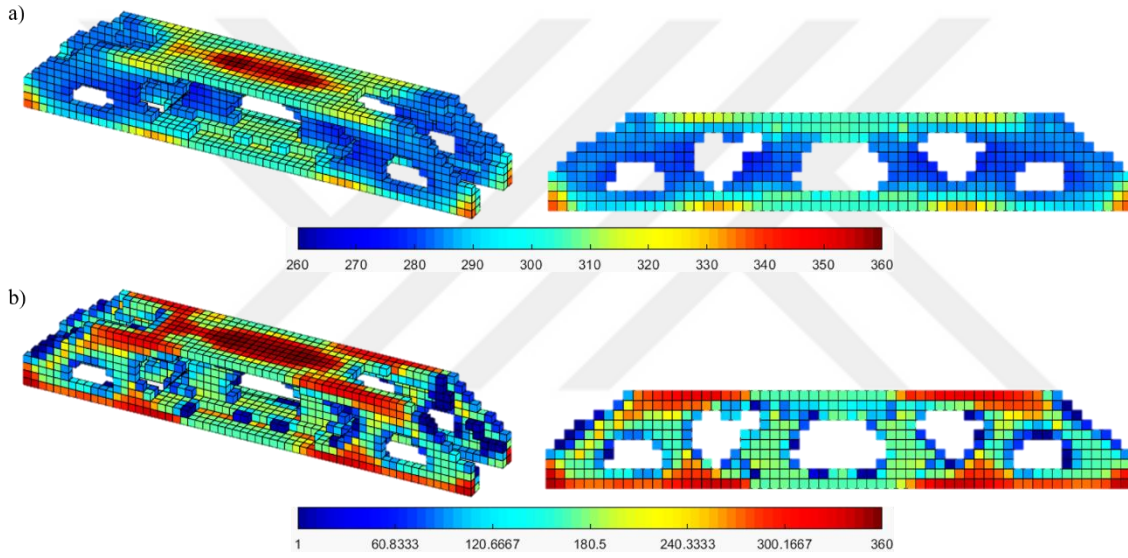
Elde edilen optimum proses parametrelere ve tasarıma göre hesaplanan ve normalize edilen Von-Mises gerilmesi Şekil 4.39'da gösterilmektedir. Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, kuvvetin noktasal olarak uygulanmasından dolayı maksimum gerilme kuvvet bölgesinde çıkarken gelen yükleme sınır koşullarının olduğu bölgeye doğru ilerlemiştir. Sonuç olarak, Von-Mises gerilmeleri, tavan bölgesinde, kuvvetin uygulandığı bölgede daha yüksek olmakla birlikte tavan bölgesindeki neredeyse tüm sonlu elemanlarda ve taban bölgesinde, sınır koşullarına yakın bölgedeki sonlu elemanlarda yüksek hesaplanmıştır.



Şekil 4.39: MBB kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı

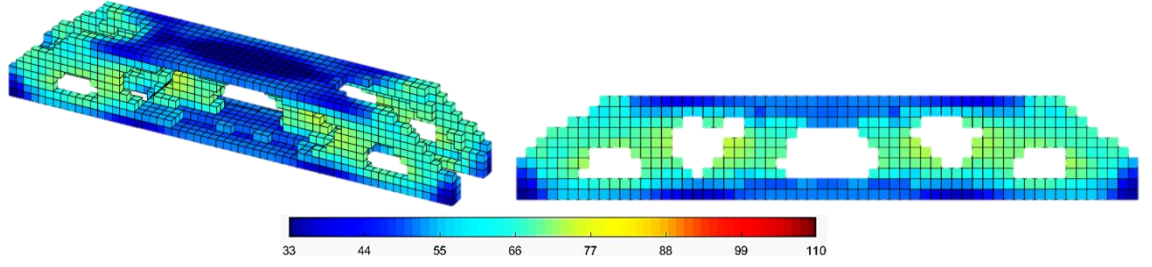
Optimizasyon problemine eklenen esneklik kısıtı sayesinde yüksek gerilmelere sahip elemanların yüksek hızlarda ve düşük lazer güçleri ile taranması gerekliliği probleme dahil edilmiştir. Beklenen bu davranış, optimum proses parametrelerinin dağılımları ve Von-Mises gerilme dağılımları incelendiğinde yükün akışına göre parametrelerin doğru bir şekilde değiştiği gözlenmiştir (bkz. Şekil 4.38 ve Şekil 4.39).

Aynı zamanda, Şekil 4.40-a'da hesaplanan akma dayanımları, değiştirilmiş SIMP yöntemi kullanılarak yapay yoğunluk değeri ile işleme girdiğinden dolayı optimizasyon sırasında kullanılan elemanların son akma dayanımı dağılımı Şekil 4.40-b'de gösterilmiştir ve Von-Mises gerilme dağılımı ile benzer değişimler gözlenmektedir.



Şekil 4.40: MBB kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı

Ek olarak, Şekil 4.8'de test sonuçlarında gözlemlendiği ve Denklem (4.12) ile formülize edildiği şekilde enerji yoğunluğunun artması ile akma dayanımının düştüğü belirlenmişti. Şekil 4.41'de verilen enerji yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, yüksek Von-Mises gerilmelerine sahip elemanların düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.41: MBB kiriş problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı

4.3.3.5. MBB Kiriş Tasarımlarının Karşılaştırılması

MBB kiriş tasarım problemi, 4 farklı optimizasyon yöntemi (GTO, YTO, APPTO ve EPPTO) ile çözülmüştür. Elde edilen optimum tasarımlar incelendiğinde (bkz. Şekil 4.42), GTO ile elde edilen tasarımın diğer tasarımlara göre farklı olduğu görülmekte olup, bu farklılığın temel nedeninin esneklik kısıtının problemde yer almaması olduğu düşünülmektedir. Öte yandan, YTO sonucu ve EPPTO sonucu karşılaştırıldığında, tasarımların birbirlerine benzer olduğu ancak, orta bölgede yer alan dikmelerin tavan bölgesi ile birleşme yöntemi en büyük farklılık olması ile birlikte kalınlık farklılıklarının olduğu da görülmektedir. Kalınlık ve birleşme yöntemi farklılıklarının nedeni olarak, EPPTO probleminde, tasarım değişkenleri olan yapay yoğunluk, lazer gücü ve tarama hızının amaç ve kısıt fonksiyonlarına göre gradyanlarının aynı anda probleme entegre edilmesi düşünülmektedir.



Şekil 4.42: Elde edilen MBB kiriş tasarımları a) GTO, b) YTO (APPTO'da kullanılan tasarım) ve c) EPPTO

Tablo 4.10: MBB kiriş tasarımlarının üretim ve maliyet bilgileri

	GTO [ρ]	YTO [ρ]	APPTO [P, V] ρ	EPPTO [ρ, P, V]
Üretim Süresi (s)	7.35	6.53	6.13	5.77
Malzeme Maliyeti (\$)	15.97	15.97	15.97	15.84
Üretim Maliyeti (\$)	368.77	327.84	307.83	289.92
Enerji Maliyeti (\$)	0.05	0.05	0.05	0.05
Toplam Maliyet (\$)	384.83	343.89	323.87	305.84
GTO'ya göre maliyet farkı (%)	-	10.6	15.8	20.5

4 farklı yöntem ile çözülen MBB kiriş tasarım problemi sonucunda elde edilen üretim süresi, toplam maliyet ve alt maliyet başlıkları Tablo 4.10'da belirtilmiştir. Tablo incelendiğinde, tüm çözümler için enerji ve malzeme maliyetlerinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Enerji ve malzeme maliyetlerinin toplam maliyete olan etkisi düşük olduğu için tasarım problemlerinde önemli bir rol oynamamıştır.

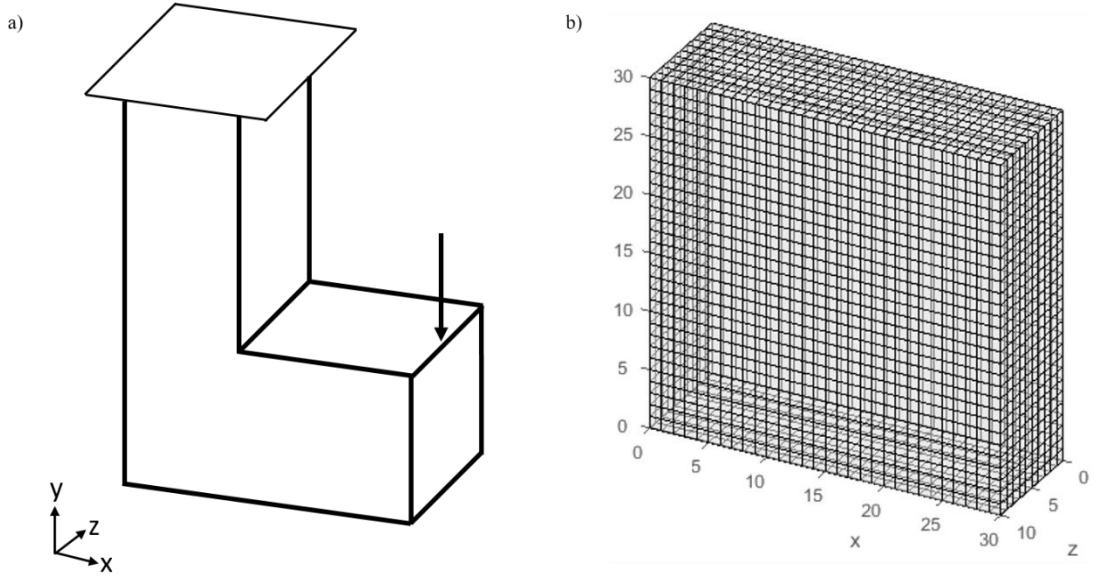
Tasarım değişkenleri aynı olan GTO ile yapının mekanik dayanımının göz önünde bulundurulduğu YTO çözümleri karşılaştırıldığında, toplam maliyet %10.6 azaltılmıştır. YTO probleminde amaç fonksiyonu maliyet olduğu için bu azalma beklenen bir davranıştır.

YTO ile elde edilen optimum tasarımın kullanıldığı APPTO probleminde, proses parametrelerinin optimum değerleri aranmıştır. Elde edilen sonuca göre, üretim parametrelerinin optimum değerleri ile toplam maliyet YTO'ya göre %5.2 azaltılmıştır. Aynı zamanda, APPTO ile toplam maliyetin GTO'ya kıyasla %15.8 oranında azaltılması sağlanmıştır.

Hem yapay yoğunluğun hem de proses parametrelerinin eş zamanlı olarak optimize edildiği EPPTO sonucunda, toplam maliyet APPTO sonucuna kıyasla yaklaşık %5 azaltılmıştır. Bu fark, tasarım değişkenlerinin optimum değerlerinin aynı anda hesaplanmasının getirdiği bir sonuçtur. Ayrıca, EPPTO sonucunda toplam maliyet GTO'ya kıyasla %20.5, YTO'ya kıyasla %10 azaltılmıştır. Sonuç olarak, ankastre kiriş problemi ile küçük problemlere uygulanabilirliği gösterilen EPPTO probleminin orta büyüklükteki problemlere başarılı bir şekilde uygulanabileceği de anlaşılmıştır.

4.3.4. L Braket Tasarımı

L braket tasarımı problemi sırasıyla GTO, YTO, APPTO ve EPPTO olmak üzere 4 farklı yöntem ile çözülmüştür. MBB giriş tasarımı problemleri ile farklı hacim oranlarında başarılı bir şekilde çalışabildiği kanıtlanan algoritma ile çözülen L braket tasarımı problemlerinde, hacim oranı v_f olarak 0.4 hedeflenmiştir. Problemlerin çözümü esnasında, optimizasyon yöntemi olarak MMA (Method of Moving Asymptotes) yöntemi kullanılmıştır [146]. MMA yöntemi, gradyan tabanlı bir yöntem olduğu için çözüm elde edilmek adına amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım değişkenlerine göre türevlerine ihtiyaç duymaktadır ve bu çalışma kapsamında türevler analitik olarak hesaplanmıştır. L braket tasarımı için tasarım uzayı Şekil 4.43'te belirtilmiştir. Kuvvet, braketin z eksenindeki 4,5 ve 6. elemanlara uygulanmakta iken y eksenine göre en yukarıda bulunan düğüm noktaları x, y ve z eksenlerindeki tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. TO kurulumu için kullanılan Matlab yazılımında tasarım uzayı sınırları belirlenirken eksen boyunca tek bir değişken ile tanımlanabildiğinden dikdörtgensel bir tasarım uzayı olacak şekilde x,y ve z eksenlerinde sırasıyla 1 mm boyutunda 30, 30 ve 10 sonlu eleman kullanılarak modellenmiştir (bkz. Şekil 4.43-b). Şekil 4.43-a'da belirtilen tasarım uzayını temsil etmek için x, y ve z eksenlerindeki sonlu elemanların yapay yoğunluk değişkenleri her iterasyonda sıfıra eşitlenerek pasifleştirilmiştir ve tasarım uzayından çıkarılmıştır.



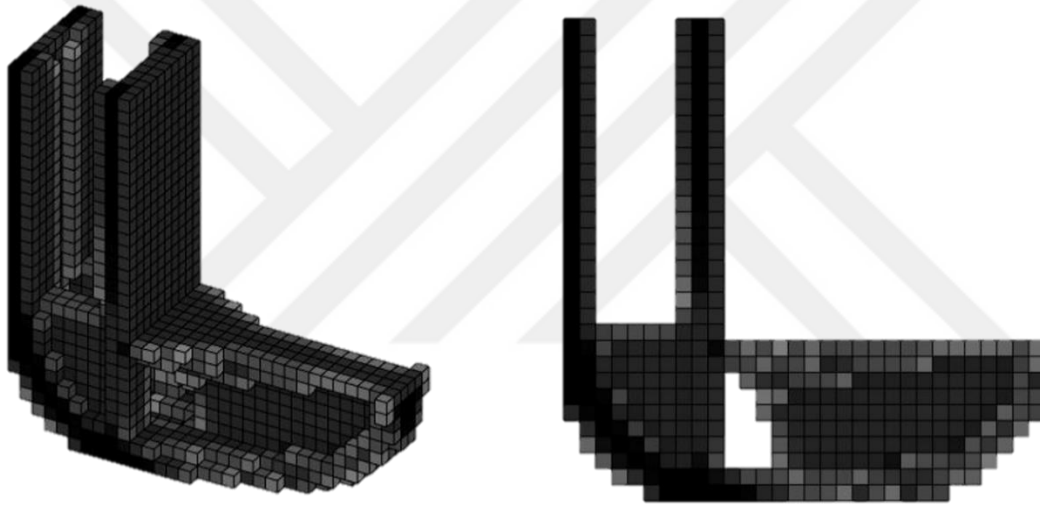
Şekil 4.43: L braket tasarım probleminin a) tasarım uzayı, yükleme ve sınır koşulları b) sonlu elemanlar ağı

4.3.4.1. Geleneksel Topoloji Optimizasyonu (GTO)

L braket tasarımı için GTO problemi Denklem (4.22) kullanılarak çözülmüştür.

$$\begin{aligned} \text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\ \text{Minimum} & \quad C(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{u}^T K(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} \\ \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = f \\ & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{v_0} - v_f \leq 0 \\ & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \quad (4.22)$$

GTO probleminin bir fonksiyonu olmamasına rağmen toplam maliyet hesaplanmıştır. Maliyet hesaplanırken, tarama hızı ve lazer gücü sabit olarak sırasıyla 1400 mm/s ve 235 W olarak alınmıştır ve elde edilen L braket tasarımı Şekil 4.44'te gösterilmiştir.



Şekil 4.44: GTO ile elde edilen optimum L braket tasarımı

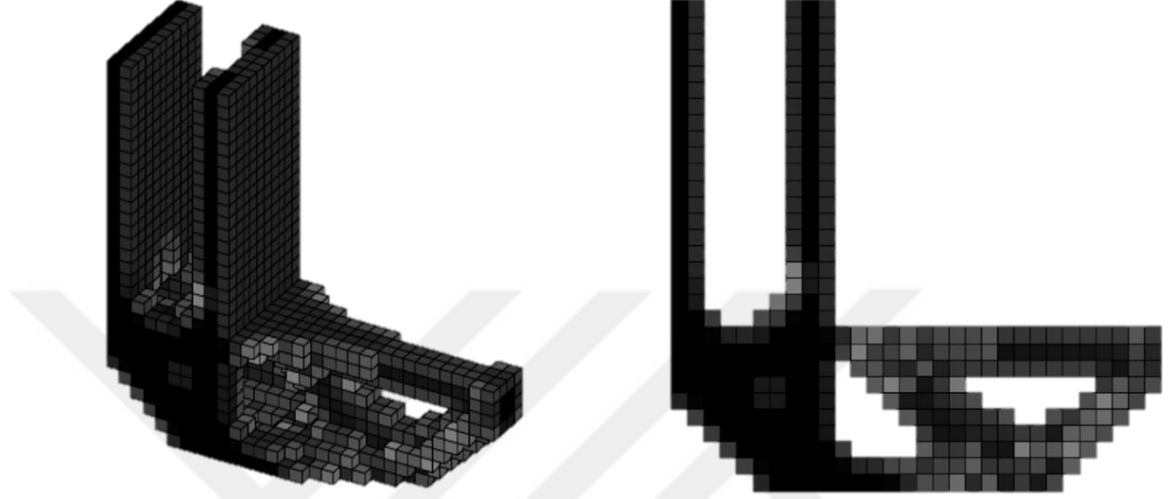
4.3.4.2. Yapısal Topoloji Optimizasyonu (YTO)

L braket için minimum maliyet amaç fonksiyonlu YTO problemi Denklem (4.23) kullanılarak çözülmüştür.

$$\begin{aligned} \text{Bul} & \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T \\ \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}) \\ \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u} = f \\ & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{v_0} - v_f \leq 0 \\ & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\ & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Toplam maliyet hesaplanırken, tarama hızı ve lazer gücü sabit olarak sırasıyla 1400 mm/s ve 235 W olarak alınmıştır. Bu değerler, ileride kullanılacak olan enerji yoğunluğu kısıtının uygun bölgesinin içerisinde kalacak şekilde seçilmiştir.

Hacim kısıtlı YTO ile elde edilen optimum L braket tasarımı Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



Şekil 4.45: YTO ile elde edilen optimum L braket tasarımı

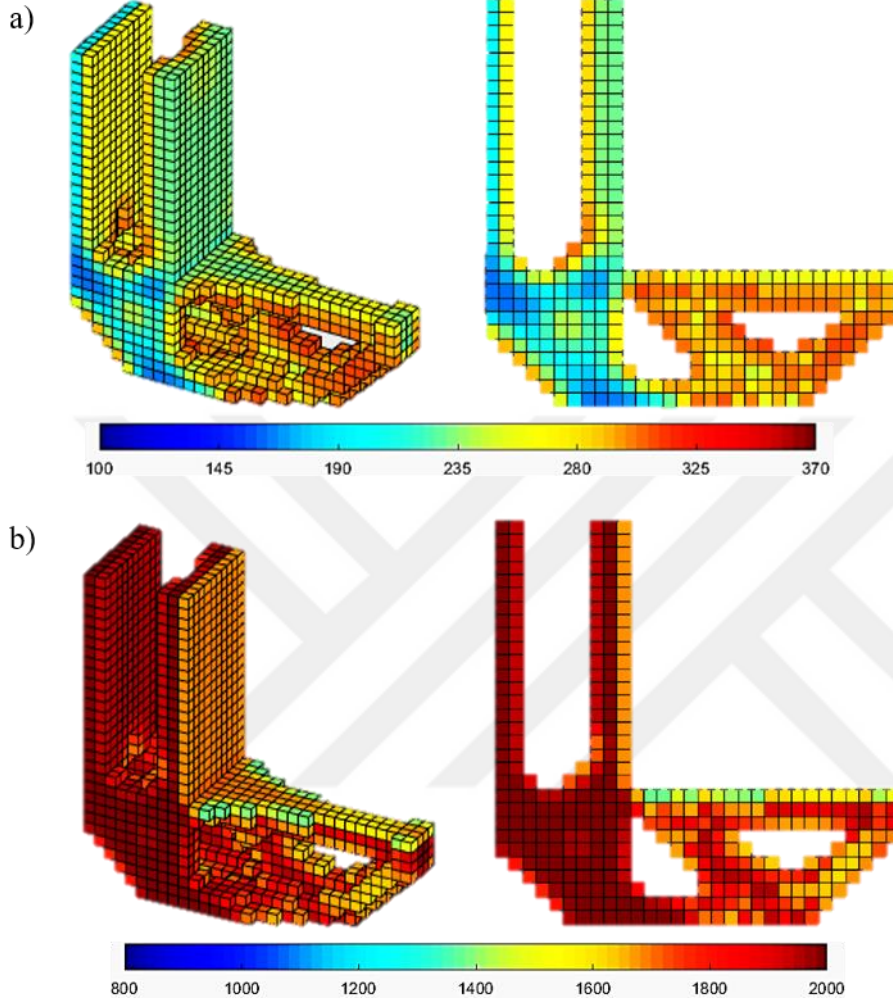
4.3.4.3. Ardışık Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (APPTO)

APPTO yönteminde, YTO ile elde edilen tasarım kullanılır ve tasarım değiştirilmeden toplam maliyeti minimize edecek şekilde her sonlu elemanın optimum lazer gücü ve tarama hızı aranmaktadır. Şekil 4.45'te belirtilen YTO sonucunda elde edilen optimum tasarım kullanılarak tasarım değişkenleri olan sonlu elemanların lazer gücü ve tarama hızı Denklem (4.24) ile çözülmüştür ve enerji yoğunluğu kısıtı KS fonksiyonu ile birleştirilip probleme entegre edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{Bul} & \quad [P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
 \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
 \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
 & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{\max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
 & \quad 33 \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 110 \\
 & \quad 100 \leq P_i \leq 370 \\
 & \quad 800 \leq V_i \leq 2000
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

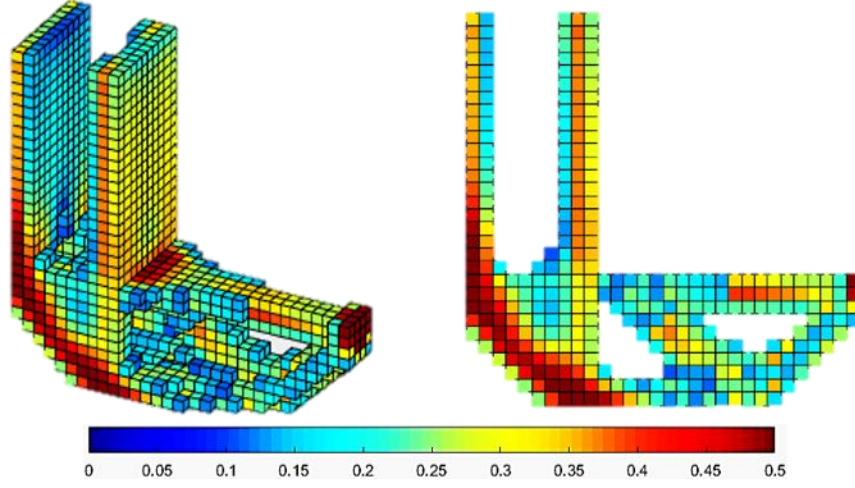
Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum lazer gücü ve tarama hızı dağılımları Şekil 4.46'da belirtmiştir. Şekil 4.46 incelendiğinde, braketin sol kısmında yer alan

elemanlar için düşük lazer güçlerinde ve yüksek hızlarda tarama yapılması gerekirken braketin iç kısmında yer alan elemanların ise tam tersi şekilde yüksek lazer güçlerinde ve daha düşük hızlarda tarama yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.46: APPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı

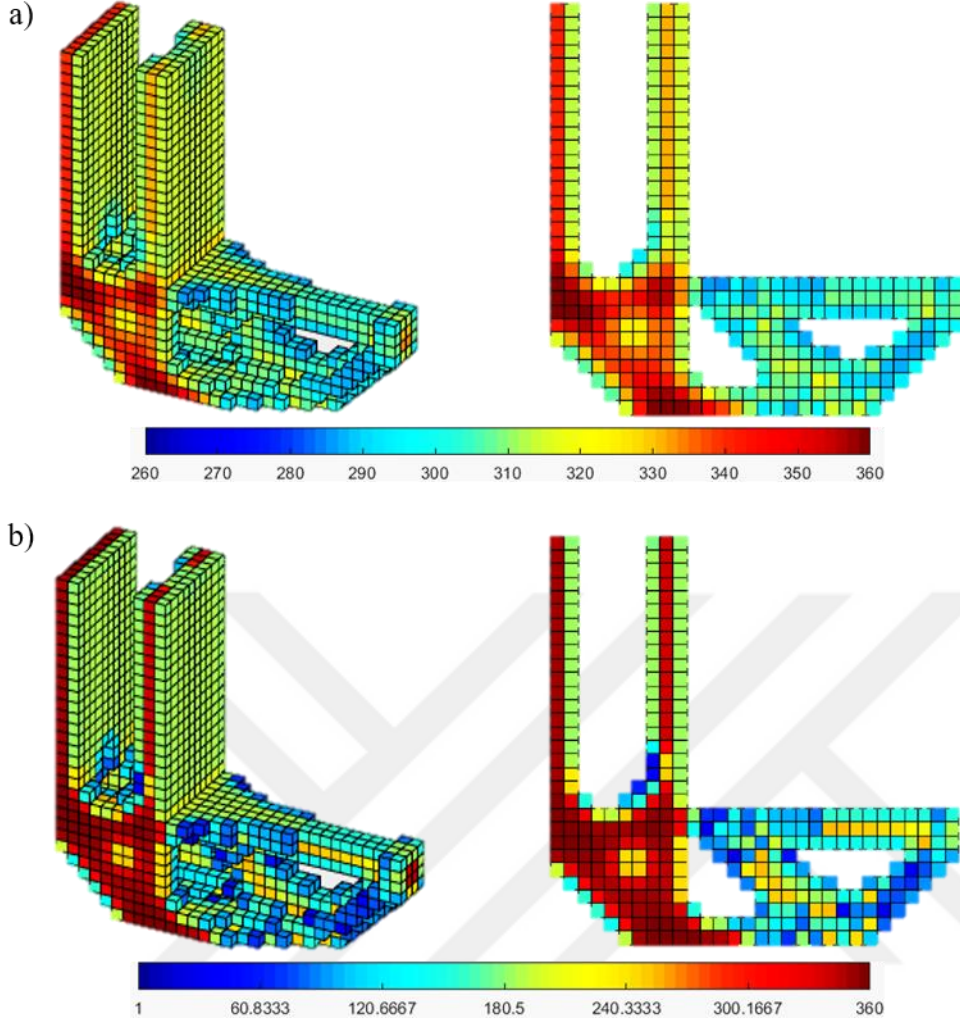
Elde edilen optimum proses parametrelere ve tasarıma göre hesaplanan ve normalize edilen Von-Mises gerilmesi Şekil 4.47’de gösterilmektedir. Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, braketin sol tarafında bir şerit halinde yüksek gerilmeler gözlenirken aynı zamanda, kuvvetin uygulandığı bölgedeki sonlu elemanlar yüksek gerilmelere maruz kaldığı görülmektedir. Ek olarak, mesnete yakın dikmelerin iç taraflarındaki elemanların göreceli olarak daha düşük gerilmelere maruz kaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.47: L braket problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı

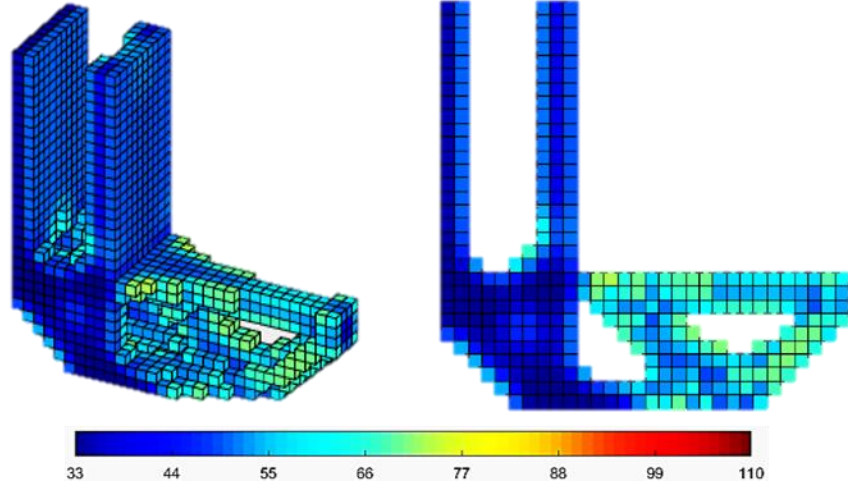
Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, esneklik kısıtı ile yüksek gerilmelere maruz kalan sonlu elemanların yüksek akma dayanımına sahip olması gerekliliği optimizasyon problemine entegre edilmişti. Akma dayanımı formülü incelendiğinde, düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızları akma dayanımının artmasını sağlamaktadır (bkz.Denklem (4.12)). Optimum proses parametre dağılımları ve Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, braketin yüksek gerilmeye maruz kalan braketin sol tarafında şerit halindeki elemanların ve mesnete bağlanan dikmelerin dış kısımlarındaki elemanların düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızı gereksinimi olduğu oluşturulan akma dayanımı formülüne göre beklenen davranışın gözlemlendiğinin göstergesidir.

Aynı zamanda, Şekil 4.48-a'da hesaplanan akma dayanımları, değiştirilmiş SIMP yöntemi kullanılarak yapay yoğunluk değeri ile işleme girdiğinden dolayı optimizasyon sırasında kullanılan elemanların son akma dayanımı dağılımı Şekil 4.48-b'de gösterilmiştir ve Von-Mises gerilme dağılımı ile çoğunlukla benzer değişimler gözlenmektedir.



Şekil 4.48: L braket problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı

Ek olarak, Şekil 4.8’de test sonuçlarında gözlemlendiği ve Denklem (4.12) ile formülize edildiği şekilde enerji yoğunluğunun artması ile akma dayanımının düştüğü belirlenmişti. Şekil 4.49’da verilen enerji yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, yüksek Von-Mises gerilmelerine sahip elemanların düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu anlaşılmıştır.



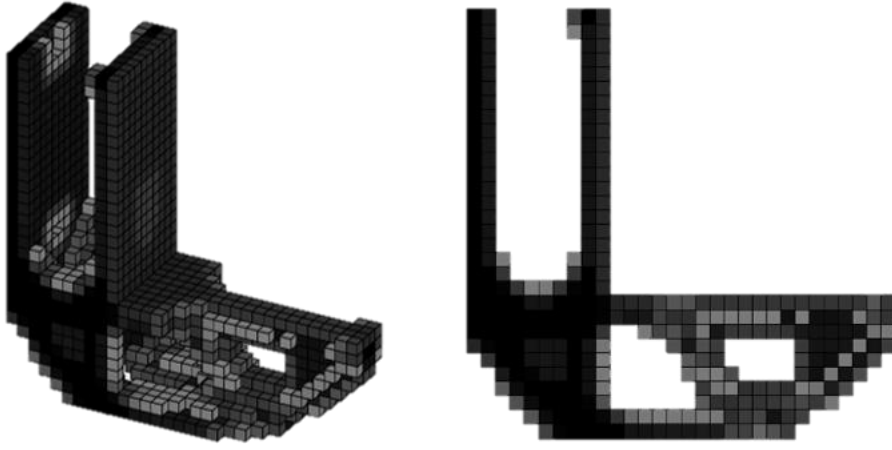
Şekil 4.49: L braket problemi için APPTO ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı

4.3.4.4. Eş Zamanlı Proses Parametre ve Topoloji Optimizasyonu (EPPTO)

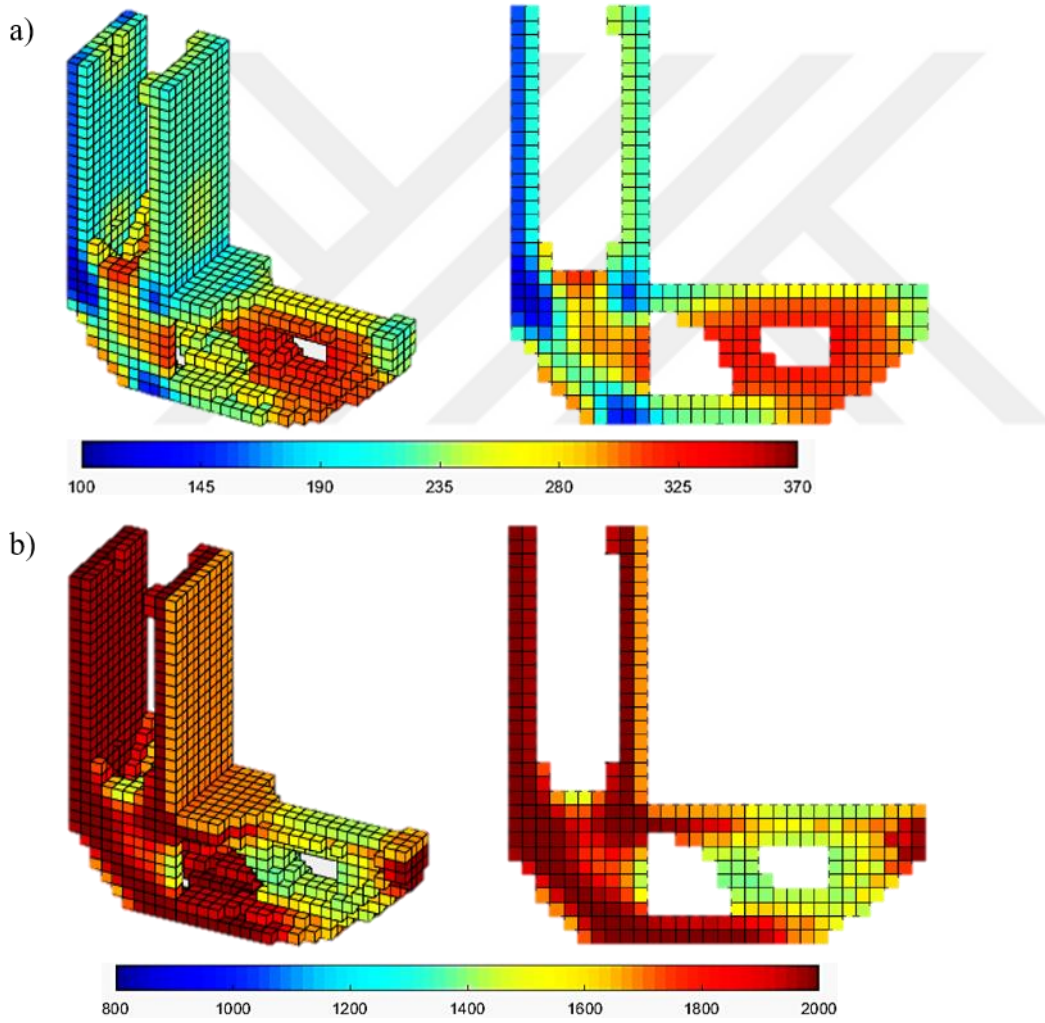
EPPTO yönteminde, yapay yoğunluk ile proses parametre değişkenleri aynı anda optimize edilmektedir. L braket tasarımının ve üretim parametrelerinin bu yöntemle optimum değerleri Denklem (4.25) kullanılarak aranmıştır ve enerji yoğunluğu kısıtı KS fonksiyonu ile birleştirilip probleme entegre edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{Bul} & \quad [\rho_1, \dots, \rho_N, P_1, \dots, P_N, V_1, \dots, V_N]^T \\
 \text{Minimum} & \quad \text{Maliyet}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \\
 \text{Koşullar} & \quad K(\boldsymbol{\rho})u = f \\
 & \quad \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i v_i}{v_0} - v_f \leq 0 \\
 & \quad C(\boldsymbol{\rho}) - c_0^{max}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 0 \\
 & \quad 33 \leq ED_i(\mathbf{P}, \mathbf{V}) \leq 110 \\
 & \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \\
 & \quad 100 \leq P_i \leq 370 \\
 & \quad 800 \leq V_i \leq 2000
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Elde edilen optimum L braket tasarımı Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum lazer gücü ve tarama hızı dağılımları Şekil 4.51’de belirtmiştir. Optimum proses parametreleri incelendiğinde, braketin mesnet bağlantısı ile birleşen dikmelerdeki elemanların, sol tarafında bir şerit halinde bulunan elemanların ve kuvvetin uygulandığı nokta çevresindeki elemanların düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızlarına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

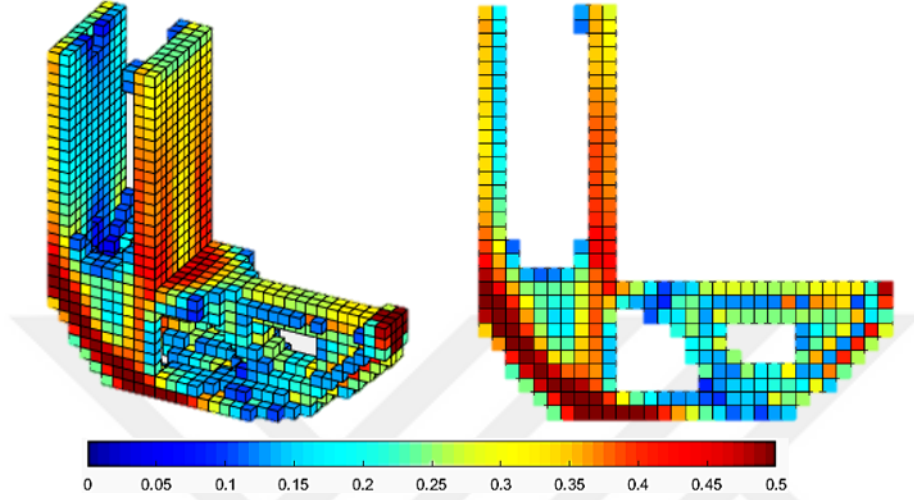


Şekil 4.50: EPPTO ile elde edilen optimum L braket tasarımı



Şekil 4.51: EPPTO ile elde edilen optimum a) lazer gücü (W), b) tarama hızı (mm/s) dağılımı

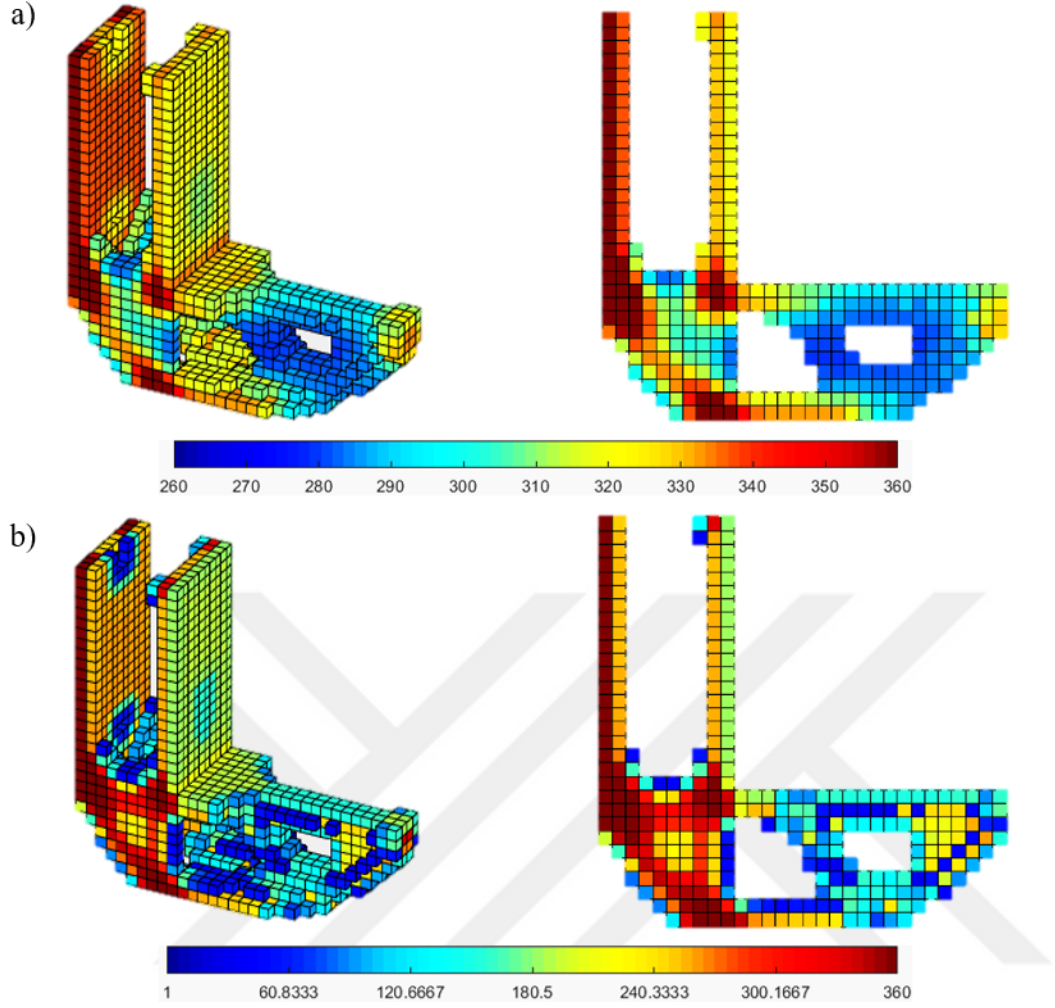
Elde edilen optimum proses parametrelere ve tasarıma göre hesaplanan ve normalize edilen Von-Mises gerilmesi Şekil 4.52’de gösterilmektedir. Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, kuvvetin uygulandığı nokta çevresindeki, mesnete bağlanan dikmelerin dış taraflarındaki ve braketin sol tarafındaki dikey ile yatay yüzeylerin birleşme yerlerindeki elemanların yüksek gerilmelere maruz kaldıkları görülmektedir.



Şekil 4.52: L braket problemi için EPPTO yöntemi ile elde edilen tasarımın normalize edilmiş Von-Mises gerilme dağılımı

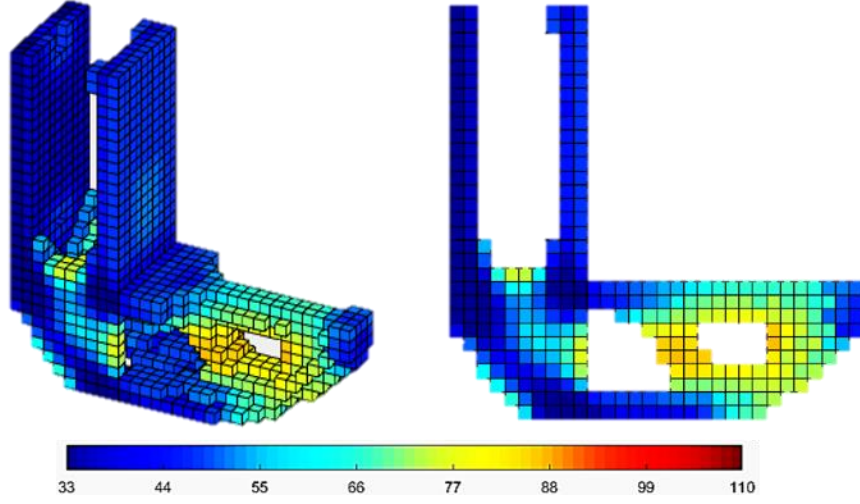
Optimizasyon problemine eklenen esneklik kısıtı sayesinde yüksek gerilmelere sahip elemanların yüksek hızlarda ve düşük lazer güçleri ile taranması gerekliliği probleme dahil edilmiştir. Beklenen bu davranış, optimum proses parametrelerinin dağılımları ve Von-Mises gerilme dağılımları incelendiğinde yükün akışına göre parametrelerin doğru bir şekilde değiştiği gözlenmiştir (bkz. Şekil 4.51 ve Şekil 4.52).

Aynı zamanda, Şekil 4.53-a’da hesaplanan akma dayanımları, değiştirilmiş SIMP yöntemi kullanılarak yapay yoğunluk değeri ile işleme girdiğinden dolayı optimizasyon sırasında kullanılan elemanların son akma dayanımı dağılımı Şekil 4.53-b’de gösterilmiştir ve Von-Mises gerilme dağılımı ile benzer değişimler gözlenmektedir.



Şekil 4.53: L braket problemi için EPPTO ile elde edilen tasarımın a) sadece proses parametreleri ile b) proses parametreleri ve yapay yoğunluk değeri ile hesaplanan akma dayanımı (MPa) dağılımı

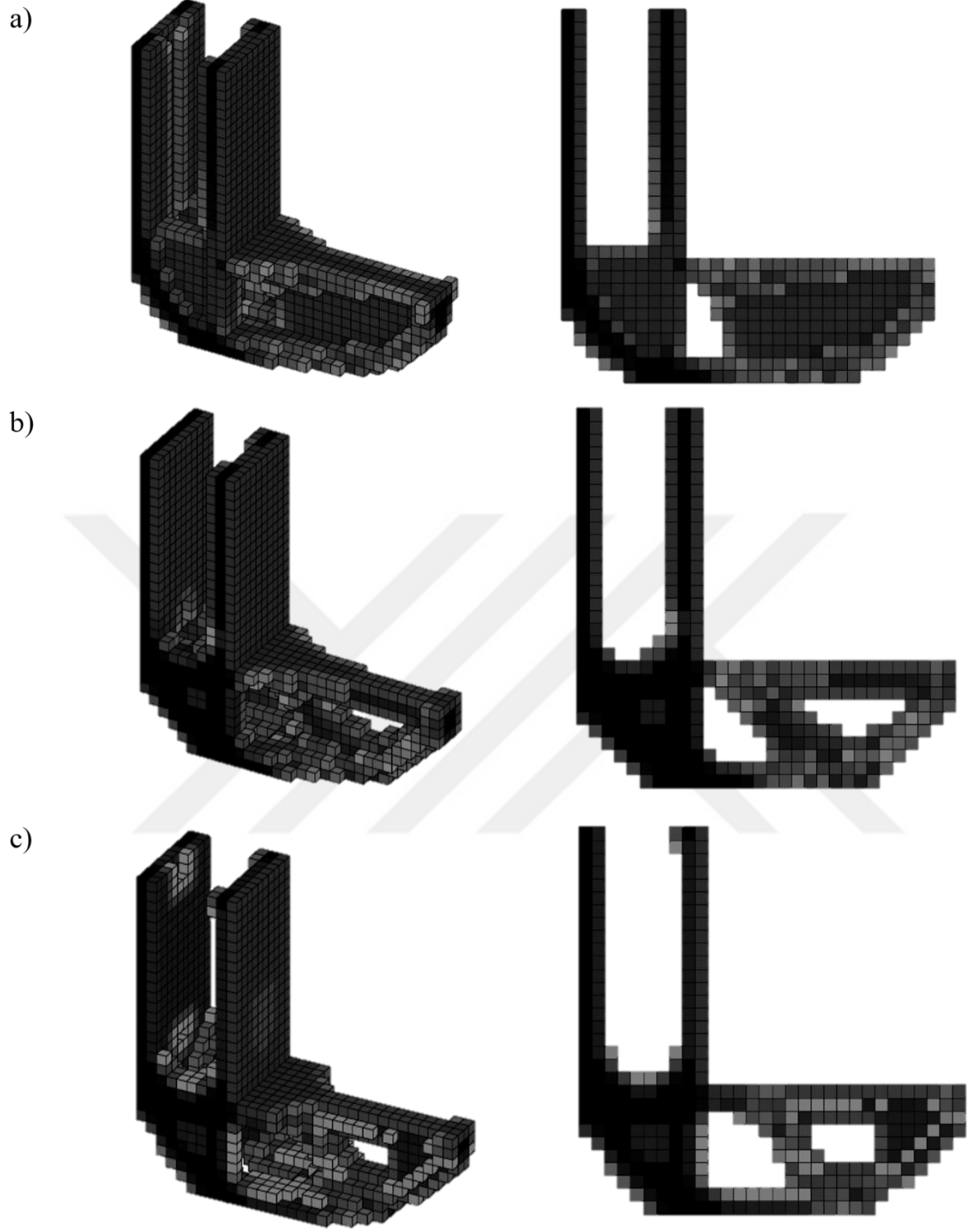
Şekil 4.54'te verilen enerji yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, yüksek Von-Mises gerilmelerine sahip elemanların düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu anlaşılmıştır ve bu dağılım test sonuçlarına göre beklenen bir dağılımdır (bkz. Şekil 4.8).



Şekil 4.54: L braket problemi için EPPTO yöntemi ile elde edilen tasarımın enerji yoğunluğu (J/mm^3) dağılımı

4.3.4.5. L Braket Tasarımlarının Karşılaştırılması

L braket tasarım problemi, 4 farklı optimizasyon yöntemi (GTO, YTO, APPTO ve EPPTO) ile çözülmüştür. Elde edilen optimum tasarımlar incelendiğinde (bkz. Şekil 4.55), minimum esneklik problemi sonucunda elde edilen tasarımın diğer sonuçlara göre farklı olduğu görülmektedir ve esneklik kısıtının problemde yer almamasının farklılığın nedeni olarak düşünülmektedir. Öte yandan, YTO sonucu ve EPPTO sonucu karşılaştırıldığında, birkaç dikmenin kalınlık farkları dışında tasarımların neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Tasarımlar arasında görülen kalınlık farklarının, EPPTO probleminde fonksiyonların tasarım değişkenlerine göre türevlerinin probleme aynı anda girdi yapması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 4.55: Elde edilen L braket tasarımları a) GTO, b) YTO (APPTO'da kullanılan tasarım) ve c) EPPTO

Tablo 4.11: L braket tasarımlarının üretim ve maliyet bilgileri

	GTO [ρ]	YTO [ρ]	APPTO [P, V] ρ	EPPTO [ρ, P, V]
Üretim Süresi (s)	56.80	53.78	47.15	46.37
Malzeme Maliyeti (\$)	141.07	142.00	142.00	140.49
Üretim Maliyeti (\$)	2849.88	2698.65	2365.71	2326.50
Enerji Maliyeti (\$)	0.41	0.39	0.38	0.35
Toplam Maliyet (\$)	2998.19	2847.86	2514.41	2473.64
GTO'ya göre maliyet farkı (%)	-	5.0	16.1	17.5

Tasarım değişkenleri aynı olan GTO ile yapının mekanik dayanımının göz önünde bulundurulduğu YTO çözümleri karşılaştırıldığında, toplam maliyet %5 azaltılmıştır. YTO probleminde amaç fonksiyonu olduğu minimum maliyet fonksiyonu için bu azalma beklenen bir davranıştır.

YTO ile elde edilen optimum tasarımın kullanıldığı APPTO probleminde, proses parametrelerinin optimum değerleri aranmıştır. Elde edilen sonuca göre, üretim parametrelerinin optimum değerleri ile toplam maliyet YTO'ya göre %11 azaltılmıştır. Aynı zamanda, APPTO ile toplam maliyetin GTO'ya kıyasla %16 oranında azaltılması sağlanmıştır.

Hem yapay yoğunluğun hem de proses parametrelerinin eş zamanlı olarak optimize edildiği EPPTO sonucunda, ilk olarak tasarımın ardından proses parametrelerinin optimize edildiği sonuca göre yaklaşık %1.5 toplam maliyet azaltılmıştır. Bu azalma, tasarım değişkenlerinin optimum değerlerinin aynı anda hesaplanmasının getirdiği bir sonuçtur. Ayrıca, EPPTO sonucunda toplam maliyet GTO'ya kıyasla %17.5, YTO'ya kıyasla %12.5 azaltılmıştır. Sonuç olarak, ankastre giriş ve MBB giriş problemleri ile sırasıyla tasarım değişkeni açısından küçük ve orta ölçekli problemlere uygulanabilirliği gösterilen EPPTO yönteminin, havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan L braket tasarımı gibi büyük hacimli problemlere başarılı bir şekilde uygulanabileceği de anlaşılmıştır.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Eİ teknolojisinin gelişmesi ile üretim yöntemine göre tasarım felsefesi üzerine çalışmalar hızlanmaktadır. Karmaşık yapıların üretilebilir olması ile birlikte tasarım süreçlerinin bir parçası olan TO sıklıkla çalışılan bir konu olmuştur. Havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu endüstrilerdeki tasarım süreçlerinde, ana amaç isterleri sağlayan minimum ağırlık ile tasarımın yapılmasıdır. Üretim aşamasına geçildiğinde ise yapısal olarak tasarlanan optimum geometri kullanılarak, belirlenen amaç fonksiyonunun minimum değerini verecek optimum parametreler aranmaktadır. Eİ yönteminde kullanılan üretim parametreleri öncelikle malzemenin mikroyapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu şekilde, hem geometri hem de üretim parametreleri yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, geometri ve üretim parametreleri için iki ayrı optimizasyon probleminin çözülmesi doğru sonuçtan uzaklaştıracağı için ilgili tasarım değişkenlerinin eş zamanlı olarak çözülmesi gerekmektedir.

Proses parametrelerinin mikroyapıya ve yapının makro özelliklerine etkilerini incelemek adına FFD deney tasarımı yöntemi ile 9 farklı parametre seti belirlenip SLE yöntemi kullanılarak numuneler üretilmiştir. AlSi10Mg malzemesinin mikroyapı unsurları; ötektik Si hücre boyutu ve hızlı soğumadan kaynaklı oluşan Si çökeltilerinin boyutlarıdır. Bu nedenle, üretilen numunelerin ötektik Si hücre ve Si çökelti boyutları TEM yardımıyla ölçülmüştür. Aynı zamanda, yapının mikro özelliklerinden makro seviye bir özellik olan akma dayanımına gitme amacı olduğundan dolayı, nano-indentasyon testleri ile numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik-akma dayanımı ilişkisi kullanılarak eriyik havuz içerisinden ölçülen sertlik değerlerinin akma dayanımına dönüşümü tamamlanmıştır. Proses parametrelerinin bir fonksiyonu olacak şekilde ötektik Si hücre boyutu ve Si çökelti çapı denklemleri, deneysel sonuçlar kullanılarak oluşturulmuştur. Ek olarak, üretim zamanını etkilediği için üretilen numunelerin eriyik havuz ölçümleri yapılmıştır ve proses parametrelerine bağlı olarak eriyik havuz alanı denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan denklem, üretim zamanı hesaplamasına entegre edilerek toplam maliyet hesaplanmıştır.

AlSi10Mg malzemesinin akma dayanımını etkileyen mekanizmalar sırasıyla Hall-Petch, Orowan ve dislokasyon sertleştirme mekanizmalarıdır. Ötektik Si hücre boyutu, Hall-Petch mekanizmasına ve Si çökeltilerinin boyutu Orowan mekanizmasına girdi yapmaktadır. Ötektik Si hücre boyutunun ve Si çökelti çaplarının proses parametrelerine bağlı olarak oluşturulan denklemleri sayesinde akma dayanımı ile proses parametreleri arasında ilişki kurulmuştur. Oluşturulan parametrik akma dayanımı modelinin sonuçları ile nano-indentasyon sonuçları karşılaştırılmıştır ve parametrelere göre farklılık gösteren hatanın %1 ila %14.6 arasında değiştiği belirlenmiştir.

GTO problemi, literatürde yapısal tasarım için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir ve hacim kısıtı ile sınırlandırılmış tasarım uzayında minimum esneklik değerini sağlayan yapay yoğunluk vektörü aranmaktadır. GTO yöntemi ile çözüm yapılırken, genellikle yapının mekanik özellikleri ile ilgili kısıt fonksiyonu bulunmamaktadır. Mekanik özelliklerin de dikkate alındığı YTO probleminde, hacim ve izin verilen maksimum esneklik kısıtları ile sınırlandırılmış tasarım uzayında minimum maliyeti sağlayan yapay yoğunluk vektörleri aranmaktadır. Böylelikle, hem mekanik mekanik isterleri sağlayan hem de istenen ağırlıkta optimum tasarımlar elde edilebilmektedir. APPTO probleminde ise YTO ile elde edilen optimum topoloji kullanılarak minimum maliyeti veren tarama hızı ve lazer gücü vektörlerinin optimum değerleri hesaplanmaktadır. Öncelikle optimum tasarımın elde edildiği ardından üretim parametrelerinin optimum değerlerinin hesaplandığı bu yöntem, tasarım süreçlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. APPTO probleminde, tarama hızı parametresinin üst sınıra yakınsamasını önlemek adına enerji yoğunluğu kısıtı, KS fonksiyonu ile global tek bir kısıt fonksiyonu haline getirilip probleme entegre edilmiştir. Böylelikle, tarama hızı ve lazer gücünün aynı anda optimum değerlerinin hesaplanmasına olanak sağlanmıştır ve proses parametreleri ile yapay yoğunluk vektörü APPTO probleminde tasarım değişkenleri olarak kullanılmıştır. Son olarak, geliştirilen EPPTO yöntemi ile, hacim, izin verilen maksimum esneklik ve enerji yoğunluğu kısıtları ile sınırlandırılan tasarım uzayında minimum maliyeti sağlayan yapay yoğunluk, tarama hızı ve lazer gücü vektörlerinin optimum değerleri aynı anda aranmaktadır.

Malzeme seviyesi denklemler kullanılarak oluşturulan akma dayanımı modeli izin verilen maksimum esneklik fonksiyonuna entegre edilmiştir. Oluşturulan akma dayanımı modeli sırasıyla YTO, APPTO ve EPPTO problemlerine entegre edilmiştir.

Minimum maliyet amaç fonksiyonlu optimizasyon yöntemleri (YTO, APPTO, EPPTO), üç adet tasarım uygulama problemine uygulanmıştır. Tasarım değişkeni sayısı giderek artacak şekilde tasarım uygulama problemleri sırasıyla ankastre kiriş tasarımı, MBB kiriş tasarımı ve son olarak L braket tasarımıdır. Ankastre kiriş tasarımı için YTO ile elde edilen tasarımın üretim parametreleri optimize edildiğinde amaç fonksiyonu olan toplam maliyet %5 azaltılmıştır. Aynı zamanda, üretim parametreleri ile yapay yoğunluk aynı anda optimize edildiğinde ise YTO problemine göre maliyet açısından %8 azalma sağlanmıştır. İkinci tasarım uygulama problemi olan MBB kiriş tasarımında ise, EPPTO yöntemi kullanılarak, maliyet açısından YTO ve APPTO yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre sırasıyla %10 ve %5 azalma sağlanmıştır. Son olarak havacılık endüstrisinde de sıklıkla kullanılan L braket tasarım uygulamasında, EPPTO yöntemi kullanılarak YTO ve APPTO yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre sırasıyla %12 ve %1.5 azalma sağlanmıştır. Böylelikle, ankastre kiriş ve MBB kiriş tasarımları sonucunda tasarım değişkeni açısından küçük ve orta ölçekli problemlere uygulanabilirliği kanıtlanan EPPTO yöntemi ile endüstri uygulamalarında sıklıkla kullanılan ve tasarım değişkeni olarak büyük ölçekli L braket tasarım uygulamasında da başarılı bir şekilde sonuç elde edilmiştir. Ek olarak, GTO yöntemi ile üç tasarım problemi çözülmüştür. GTO ile elde edilen tasarımlar diğer yöntemlerle elde edilen tasarımlardan oldukça farklıdır ve maliyet değerleri olarak kıyaslandığında beklendiği şekilde en kötü sonuç GTO ile elde edilmiştir.

Sonuç olarak, üretim parametreleri ile AlSi10Mg malzemesinin mikroyapı özellikleri arasında deneysel sonuçlar kullanılarak parametrik denklemler oluşturulmuştur. Oluşturulan mikroyapı-proses parametre denklemleri, mukavemetlendirme mekanizmalarına girdi olarak sağlanıp malzemenin akma dayanımı, tarama hızı ve lazer gücüne bağlı olarak parametrik bir şekilde elde edilmiştir. 9 farklı parametre seti ile üretilen numunelerin akma dayanımları nano-indentasyon yöntemi ile hesaplanıp oluşturulan parametrik akma dayanımı denklem sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Akma dayanımını tahmin edebilme performansı deneysel sonuçlarla doğrulanan denklemler, tasarım uygulama problemlerine entegre edilmiştir. Ankastre kiriş ve MBB kiriş tasarım problemlerine uygulanan ve orta ölçekli tasarım problemlerine başarılı bir şekilde uygulanabilirliği kanıtlanan EPPTO yöntemi, son olarak L braket tasarımına uygulanmıştır. Tüm tasarım problemlerinin sonuçları incelendiğinde, EPPTO yöntemi ile ağırlık, yapısal ve enerji yoğunluğu isterlerini sağlayan optimum üretim

parametreleri ve topoloji elde edilerek, diğer TO yöntemlerine göre en düşük maliyet değerleri elde edilmiştir.

Bu tezde anlatılan çalışmalara ek olarak:

- SLE ile üretilmiş yapıların içerisinde oluşan kusurlar, tasarım algoritmasına entegre edilebilir. Ayrıca, kusurlardan kaynaklı olarak mekanik özelliklerin değişimi, deneysel olarak incelenip ek bir denklem oluşturularak kusur boyutuna bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi göz önünde bulundurulabilir.
- Endüstride yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metodu ile çözüm yapan yazılımlar ile tez kapsamında geliştirilen tasarım yöntemi birleştirilerek bir havacılık parçasının maruz kalacağı tüm yükleme senaryoları incelenebilir.
- Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri, üretim açısına göre değişir. Üretim açısına göre değişen mekanik özellikler, tasarım sürecine entegre edilerek eş zamanlı olarak optimum topoloji, üretim parametreleri ve üretim açısı hesaplanabilir.
- Eklemeli imalata uygun olarak farklı parametrelerde birden fazla sayıda numune üretimi yapıp mekanik özellikler elde edilerek parametrelere göre mekanik özelliklerin istatistiksel analizleri yapılabilir. Böylelikle, eklemeli imalata uygun olarak her parametre için belirsizlik altında tasarımlar yapılarak tasarımların güvenilirlik dereceleri artırılabilir.
- SLE ile üretildikten sonra ısıl işlemlerin ve yüzey işlemlerin etkilerini tasarım sürecine entegre etmek adına, farklı ısıl ve yüzey işlemleri ile deneysel çalışmalar yapılarak minimum maliyet amaç fonksiyonu ile eş zamanlı olarak proses parametre ve topoloji optimizasyonu problemi çözülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., and Emmelmann, C., (2016). Additive Manufacturing of Metals, *Acta Mater.*, 117, 371–392.
- [2] ASTM2792–12a, (2013). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 10–12.
- [3] Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N., and Yadollahi, A., (2015). An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part I: Transport Phenomena, Modeling and Diagnostics, *Addit. Manuf.*, 8, 36–62.
- [4] Mower, T. M., and Long, M. J., (2016). Mechanical Behavior of Additive Manufactured, Powder-Bed Laser-Fused Materials, *Mater. Sci. Eng. A*, 651, 198–213.
- [5] King, W. E., Anderson, A. T., Ferencz, R. M., Hodge, N. E., Kamath, C., Khairallah, S. A., and Rubenchik, A. M., (2015). Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of Metals; Physics, Computational, and Materials Challenges, *Appl. Phys. Rev.*, 2, 041304.
- [6] Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., Shindo, P. W., Medina, F. R., and Wicker, R. B., (2012). Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, *J. Mater. Sci. Technol.*, 28, 1–14.
- [7] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., and Zhang, W., (2018). Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure and Properties, *Prog. Mater. Sci.*, 92, 112–224.
- [8] Gibson I, Rosen DW, S. B., (2010). *Additive Manufacturing Technologies*.
- [9] Zhang, L.-C., Wang, J., Liu, Y., Jia, Z., and Liang, S.-X. B. T.-R. M. in M. S. and M. E., (2020). Additive Manufacturing of Titanium Alloys, Elsevier.
- [10] Bendsoe, M. P., and Sigmund, O., (2004). *Topology Optimization*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [11] Bendsøe, M. P., and Kikuchi, N., (1988). Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 71, 197–224.
- [12] Bendsoe, M. P., (1989). Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem, *Struct. Optim.*, 1, 193–202.
- [13] Zhou, M., and Rozvany, G. I. N., (1991). The COC Algorithm, Part II: Topological, Geometrical and Generalized Shape Optimization, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 89, 309–336.

- [14] **Mlejnek, H. P.**, (1992). Some Aspects of the Genesis of Structures, *Struct. Optim.*, 5, 64–69.
- [15] **Sigmund, O., and Maute, K.**, (2013). Topology Optimization Approaches, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 48, 1031–1055.
- [16] **Stolpe, M., and Svanberg, K.**, (2001). On the Trajectories of Penalization Methods for Topology Optimization, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 21, 128–139.
- [17] **Stolpe, M., and Bendsøe, M. P.**, (2011). Global Optima for the Zhou–Rozvany Problem, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 43, 151–164.
- [18] **Sigmund, O.**, (2011). On the Usefulness of Non-Gradient Approaches in Topology Optimization, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 43, 589–596.
- [19] **Huang, X., and Xie, Y.**, (2010). Evolutionary Topology Optimization of Geometrically and Materially Nonlinear Structures under Prescribed Design Load, *Struct. Eng. Mech.*, 34, 581–595.
- [20] **Young, V., Querin, O. M., Steven, G. P., and Xie, Y. M.**, (1999). 3D and Multiple Load Case Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization (BESO), *Struct. Optim.*, 18, 183–192.
- [21] **Remouchamps, A., Bruyneel, M., Fleury, C., and Grihon, S.**, (2011). Application of a Bi-Level Scheme Including Topology Optimization to the Design of an Aircraft Pylon, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 44, 739–750.
- [22] **Tomlin, M., and Meyer, J.**, (2011). Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part, *7th Altair CAE Technol. Conf. 2011*, 1–9.
- [23] **Trivers, N. C., Carrick, C. A., and Kim, I. Y.**, (2020). Design Optimization of a Business Aircraft Seat Considering Static and Dynamic Certification Loading and Manufacturability, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 62, 3457–3476.
- [24] **Liu, H., Zhang, W., and Gao, T.**, (2015). A Comparative Study of Dynamic Analysis Methods for Structural Topology Optimization under Harmonic Force Excitations, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 51, 1321–1333.
- [25] **SHI, G., GUAN, C., QUAN, D., WU, D., TANG, L., and GAO, T.**, (2020). An Aerospace Bracket Designed by Thermo-Elastic Topology Optimization and Manufactured by Additive Manufacturing, *Chinese J. Aeronaut.*, 33, 1252–1259.
- [26] **Suresh, S., Lindström, S. B., Thore, C.-J., and Klarbring, A.**, (2021). Topology Optimization for Transversely Isotropic Materials with High-Cycle Fatigue as a Constraint, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 63, 161–172.
- [27] **Holmberg, E., Torstenfelt, B., and Klarbring, A.**, (2014). Fatigue Constrained Topology Optimization, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 50, 207–219.
- [28] **Vatanabe, S. L., Lippi, T. N., Lima, C. R. d., Paulino, G. H., and Silva, E. C. N.**, (2016). Topology Optimization with Manufacturing Constraints: A Unified Projection-Based Approach, *Adv. Eng. Softw.*, 100, 97–112.

- [29] **Ulu, E.**, (2018). Enhancing the Structural Performance of Additively Manufactured Objects, PhD Thesis, Carnegie Mellon University.
- [30] **Wang, C., and Qian, X.**, (2020). Simultaneous Optimization of Build Orientation and Topology for Additive Manufacturing, *Addit. Manuf.*, 34, 101246.
- [31] **Xiong, Y., Yao, S., Zhao, Z. L., and Xie, Y. M.**, (2020). A New Approach to Eliminating Enclosed Voids in Topology Optimization for Additive Manufacturing, *Addit. Manuf.*, 32, 101006.
- [32] **Orme, M., Madera, I., Gschweidl, M., and Ferrari, M.**, (2018). Topology Optimization for Additive Manufacturing as an Enabler for Light Weight Flight Hardware, *Designs*, 2, 51.
- [33] **Orme, M. E., Gschweidl, M., Ferrari, M., Vernon, R., Madera, I. J., Yancey, R., and Mouriaux, F.**, (2017). Additive Manufacturing of Lightweight, Optimized, Metallic Components Suitable for Space Flight, *J. Spacecr. Rockets*, 54, 1050–1059.
- [34] **EOS-RUAG Space**, Antenna Bracket for RUAG’s Sentinel Satellite - Certified for Deployment in Outer Space [Online]. Available: <https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/all-3d-printing-applications/ruag-aerospace-3d-printed-satellite-components>.
- [35] **TUSAŞ**, (2021). TUSAŞ Uydu Yapısallarını Türkiye’de İlk Kez Üç Boyutlu Yazıcılarda Üretmeyi Başardı [Online]. Available: <https://www.tusas.com/medya-merkezi/haberler/tusas-uydu-yapisallarini-turkiyede-ilk-kez-uc-boyutlu-yazicilarda-uretmeyi-basardi>.
- [36] **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 Mater.*, 61, 1809–1819.
- [37] **Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., and Kruth, J. P.**, (2012). Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting, *Phys. Procedia*, 39, 439–446.
- [38] **Liu, A., Chua, C. K., and Leong, K. F.**, (2010). Properties of Test Coupons Fabricated by Selective Laser Melting, *Key Eng. Mater.*, 447–448, 780–784.
- [39] **Read, N., Wang, W., Essa, K., and Attallah, M. M.**, (2015). Selective Laser Melting of AlSi10Mg Alloy: Process Optimisation and Mechanical Properties Development, *Mater. Des.*, 65, 417–424.
- [40] **Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verhecke, W., and Kruth, J. P.**, (2011). Process Optimization and Microstructural Analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg, *22nd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2011*, 484–495.
- [41] **Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C., and Zhang, W.**, (2019). Optimization of Processing Parameters and Establishment of a Relationship between Microstructure and Mechanical Properties of SLM Titanium Alloy, *Opt. Laser Technol.*, 112, 159–167.
- [42] **Sun, J., Yang, Y., and Wang, D.**, (2013). Parametric Optimization of Selective

Laser Melting for Forming Ti6Al4V Samples by Taguchi Method, *Opt. Laser Technol.*, 49, 118–124.

- [43] **Li, Z., Kucukkoc, I., Zhang, D. Z., and Liu, F.**, (2018). Optimising the Process Parameters of Selective Laser Melting for the Fabrication of Ti6Al4V Alloy, *Rapid Prototyp. J.*, 24, 150–159.
- [44] **Krol, T. A., Seidel, C., and Zaeh, M. F.**, (2013). Prioritization of Process Parameters for an Efficient Optimisation of Additive Manufacturing by Means of a Finite Element Method, *Procedia CIRP*, 12, 169–174.
- [45] **Nguyen, D. S., Park, H. S., and Lee, C. M.**, (2020). Optimization of Selective Laser Melting Process Parameters for Ti-6Al-4V Alloy Manufacturing Using Deep Learning, *J. Manuf. Process.*, 55, 230–235.
- [46] **Marrey, M., Malekipour, E., El-Mounayri, H., and Faierson, E. J.**, (2019). A Framework for Optimizing Process Parameters in Powder Bed Fusion (PBF) Process Using Artificial Neural Network (ANN), 34, 505–515.
- [47] **Baturynska, I., Semeniuta, O., and Martinsen, K.**, (2018). Optimization of Process Parameters for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing by Combination of Machine Learning and Finite Element Method: A Conceptual Framework, *Procedia CIRP*, 67, 227–232.
- [48] **Zhang, Y., and Chou, K.**, (2008). A Parametric Study of Part Distortions in Fused Deposition Modelling Using Three-Dimensional Finite Element Analysis, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 222, 959–967.
- [49] **Sood, A. K., Ohdar, R. K., and Mahapatra, S. S.**, (2009). Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling Processed Part Using Grey Taguchi Method, *Mater. Des.*, 30, 4243–4252.
- [50] **Anitha, R., Arunachalam, S., and Radhakrishnan, P.**, (2001). Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling, *J. Mater. Process. Technol.*, 118, 385–388.
- [51] **Gurralla, P. K., and Regalla, S. P.**, (2011). Optimization of Support Material and Build Time in Fused Deposition Modeling (FDM), *Appl. Mech. Mater.*, 110–116, 2245–2251.
- [52] **Onuh, S. O., and Hon, K. K. B.**, (1998). Optimising Build Parameters for Improved Surface Finish in Stereolithography, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 38, 329–342.
- [53] **Akilesh, M., Elango, P., Devanand, A., .R, S., and Varthanan, P.**, (2019). Optimization of Selective Laser Sintering Process Parameters on Surface Quality, *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 141–157.
- [54] **Sohrabpoor, H., Negi, S., Shaiesteh, H., Ahad, I. U., and Brabazon, D.**, (2018). Optimizing Selective Laser Sintering Process by Grey Relational Analysis and Soft Computing Techniques, *Optik (Stuttg.)*, 174, 185–194.
- [55] **Hsu, T. J., and Lai, W. H.**, (2010). Manufacturing Parts Optimization in the Three-Dimensional Printing Process by the Taguchi Method, *J. Chinese Inst. Eng. Trans. Chinese Inst. Eng. A/Chung-kuo K. Ch'eng Hsueh K'an*, 33, 121–130.

- [56] **Gorsse, S., Hutchinson, C., Gouné, M., and Banerjee, R.,** (2017). Additive Manufacturing of Metals: A Brief Review of the Characteristic Microstructures and Properties of Steels, Ti-6Al-4V and High-Entropy Alloys, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 18, 584–610.
- [57] **Farahany, S., Ourdjini, A., Bakar, T. A. A., and Idris, M. H.,** (2014). On the Refinement Mechanism of Silicon in Al-Si-Cu-Zn Alloy with Addition of Bismuth, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 45, 1085–1088.
- [58] **Birol, Y.,** (2007). Microstructural Evolution during Annealing of a Rapidly Solidified Al-12Si Alloy, *J. Alloys Compd.*, 439, 81–86.
- [59] **Birol, Y.,** (1996). Microstructural Characterization of a Rapidly-Solidified Al-12 Wt % Si Alloy, *J. Mater. Sci.*, 31, 2139–2143.
- [60] **Suryawanshi, J., Prashanth, K. G., Scudino, S., Eckert, J., Prakash, O., and Ramamurty, U.,** (2016). Simultaneous Enhancements of Strength and Toughness in an Al-12Si Alloy Synthesized Using Selective Laser Melting, *Acta Mater.*, 115, 285–294.
- [61] **Li, X. P., Wang, X. J., Saunders, M., Suvorova, A., Zhang, L. C., Liu, Y. J., Fang, M. H., Huang, Z. H., and Sercombe, T. B.,** (2015). A Selective Laser Melting and Solution Heat Treatment Refined Al-12Si Alloy with a Controllable Ultrafine Eutectic Microstructure and 25% Tensile Ductility, *Acta Mater.*, 95, 74–82.
- [62] **Wu, J., Wang, X. Q., Wang, W., Attallah, M. M., and Loretto, M. H.,** (2016). Microstructure and Strength of Selectively Laser Melted AlSi10Mg, *Acta Mater.*, 117, 311–320.
- [63] **Chen, B., Moon, S. K., Yao, X., Bi, G., Shen, J., Umeda, J., and Kondoh, K.,** (2017). Strength and Strain Hardening of a Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy, *Scr. Mater.*, 141, 45–49.
- [64] **Li, X. P., Ji, G., Chen, Z., Addad, A., Wu, Y., Wang, H. W., Vleugels, J., Van Humbeeck, J., and Kruth, J. P.,** (2017). Selective Laser Melting of Nano-TiB₂decorated AlSi10Mg Alloy with High Fracture Strength and Ductility, *Acta Mater.*, 129, 183–193.
- [65] **Hadadzadeh, A., Baxter, C., Amirkhiz, B. S., and Mohammadi, M.,** (2018). Strengthening Mechanisms in Direct Metal Laser Sintered AlSi10Mg: Comparison between Virgin and Recycled Powders, *Addit. Manuf.*, 23, 108–120.
- [66] **Takata, N., Kodaira, H., Sekizawa, K., Suzuki, A., and Kobashi, M.,** (2017). Change in Microstructure of Selectively Laser Melted AlSi10Mg Alloy with Heat Treatments, *Mater. Sci. Eng. A*, 704, 218–228.
- [67] **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, *Mater. Des.*, 159, 201–211.
- [68] **Fousová, M., Dvorský, D., Michalcová, A., and Vojtěch, D.,** (2018). Changes in the Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy after Exposure to Elevated

Temperatures, *Mater. Charact.*, 137, 119–126.

- [69] **Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., and Mohammadi, M.**, (2019). Contribution of Mg₂Si Precipitates to the Strength of Direct Metal Laser Sintered AlSi10Mg, *Mater. Sci. Eng. A*, 739, 295–300.
- [70] **Ulu, E., Huang, R., Kara, L. B., and Whitefoot, K. S.**, (2019). Concurrent Structure and Process Optimization for Minimum Cost Metal Additive Manufacturing, *J. Mech. Des.*, 141.
- [71] **Concept Laser**, (2017). CL 30AL / CL 31AL Aluminium Alloys, 12.
- [72] **Liu, S. Y., Li, H. Q., Qin, C. X., Zong, R., and Fang, X. Y.**, (2020). The Effect of Energy Density on Texture and Mechanical Anisotropy in Selective Laser Melted Inconel 718, *Mater. Des.*, 191.
- [73] **Caulfield, B., McHugh, P. E., and Lohfeld, S.**, (2007). Dependence of Mechanical Properties of Polyamide Components on Build Parameters in the SLS Process, *J. Mater. Process. Technol.*, 182, 477–488.
- [74] **Hopkinson, N., Majewski, C. E., and Zarringhalam, H.**, (2009). Quantifying the Degree of Particle Melt in Selective Laser Sintering®, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 58, 197–200.
- [75] **Beal, V. E., Paggi, R. A., Salmoria, G. V., and Lago, A.**, (2009). Statistical Evaluation of Laser Energy Density Effect on Mechanical Properties of Polyamide Parts Manufactured by Selective Laser Sintering, *J. Appl. Polym. Sci.*, 113, 2910–2919.
- [76] **Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Starr, T., and Stucker, B.**, (2014). Analysis of Defect Generation in Ti-6Al-4V Parts Made Using Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Processes, *Addit. Manuf.*, 1, 87–98.
- [77] **Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Janaki Ram, G. D., Starr, T., and Stucker, B.**, (2015). Influence of Defects on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Components Produced by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting, *Mater. Des.*, 86, 545–554.
- [78] **Starr, T. L., Gornet, T. J., and Usher, J. S.**, (2011). The Effect of Process Conditions on Mechanical Properties of Laser-Sintered Nylon, *Rapid Prototyp. J.*, 17, 418–423.
- [79] **Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, and Kruth, J. P.**, (2010). A Study of the Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V, *Acta Mater.*, 58, 3303–3312.
- [80] **Aboulkhair, N.**, (2016). Additive Manufacture of an Aluminium Alloy: Processing, Microstructure, and Mechanical Properties, The University of Nottingham.
- [81] **Narra, S. P., Scime, L., and Beuth, J.**, (2018). Integrated Control of Melt Pool Geometry and Microstructure in Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 49, 5097–5106.
- [82] **Shao, J., Yu, G., He, X., Li, S., Chen, R., and Zhao, Y.**, (2019). Grain Size Evolution under Different Cooling Rate in Laser Additive Manufacturing of Superalloy, *Opt. Laser Technol.*, 119, 105662.

- [83] **Kempen, K., Thijs, L., Humbeeck, J. Van, and Kruth, J. P.**, (2015). Processing AlSi10Mg by Selective Laser Melting: Parameter Optimisation and Material Characterisation, *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, 31, 917–923.
- [84] **Hyer, H., Zhou, L., Park, S., Gottsfritz, G., Benson, G., Tolentino, B., McWilliams, B., Cho, K., and Sohn, Y.**, (2020). Understanding the Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy, *Metallogr. Microstruct. Anal.*, 9, 484–502.
- [85] **Guo, Q., Zhao, C., Qu, M., Xiong, L., Escano, L. I., Hojjatzadeh, S. M. H., Parab, N. D., Fezzaa, K., Everhart, W., Sun, T., and Chen, L.**, (2019). In-Situ Characterization and Quantification of Melt Pool Variation under Constant Input Energy Density in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process, *Addit. Manuf.*, 28, 600–609.
- [86] **Jadhav, S., Dadbakhsh, S., Goossens, L., Kruth, J.-P., Humbeeck, J., and Vanmeensel, K.**, (2019). Influence of Selective Laser Melting Process Parameters on Texture Evolution in Pure Copper, *J. Mater. Process. Technol.*, 270, 47–58.
- [87] **Cheng, B., and Chou, K.**, (2020). Melt Pool Evolution Study in Selective Laser Melting, *Proc. - 26th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2015*, 1182–1194.
- [88] **Tang, M., Pistorius, P. C., and Beuth, J. L.**, (2017). Prediction of Lack-of-Fusion Porosity for Powder Bed Fusion, *Addit. Manuf.*, 14, 39–48.
- [89] **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, *J. Mater. Process. Technol.*, 214, 2915–2925.
- [90] **Metelkova, J., Kinds, Y., Kempen, K., de Formanoir, C., Witvrouw, A., and Van Hooreweder, B.**, (2018). On the Influence of Laser Defocusing in Selective Laser Melting of 316L, *Addit. Manuf.*, 23, 161–169.
- [91] **Soylemez, E., Beuth, J. L., and Tamingir, K.**, (2010). Controlling Melt Pool Dimensions over a Wide Range of Material Deposition Rates in Electron Beam Additive Manufacturing, *21st Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2010*, 571–582.
- [92] **Rosenthal, D.**, (1941). Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting, *Weld. J.*, 20, 220–234.
- [93] **Lu, L., Nogita, K., McDonald, S. D., and Dahle, A. K.**, (2004). Eutectic Solidification and Its Role in Casting Porosity Formation, *Jom*, 56, 52–58.
- [94] **Grosselle, F., Timelli, G., Bonollo, F., Tiziani, A., and Della Corte, E.**, (2009). Correlation between Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si Cast Alloys, *Metall. Ital.*, 101, 25–32.
- [95] **Tang, M., Pistorius, P. C., Narra, S., and Beuth, J. L.**, (2016). Rapid Solidification: Selective Laser Melting of AlSi10Mg, *Jom*, 68, 960–966.
- [96] **Flemings, M. C.**, (1974). *Solidification Processing*, McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y.

- [97] **Matyja, H.; Giessen, B.C.; Grant, N. J.**, (1968). The Effect of Cooling Rate on the Dendrite Spacing in Splat-Cooled Aluminium Alloys, *J. Inst. Met.*, 96, 30–32.
- [98] **Spear, R. E., and Gardner, G. R.**, (1963). Dendrite Cell Size, *Trans. AFS*, 71, 209–215.
- [99] **Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A., and Glazoff, M. V.**, (2007). Casting Aluminum Alloys, Elsevier Science, Oxford, 155.
- [100] **Kempf, A., and Hilgenberg, K.**, (2020). Influence of Sub-Cell Structure on the Mechanical Properties of AlSi10Mg Manufactured by Laser Powder Bed Fusion, *Mater. Sci. Eng. A*, 776, 138976.
- [101] **Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q., Yan, C., and Shi, Y.**, (2016). Effect of Heat Treatment on AlSi10Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting: Microstructure Evolution, Mechanical Properties and Fracture Mechanism, *Mater. Sci. Eng. A*, 663, 116–125.
- [102] **Aboulkhair, N. T., Stephens, A., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., and Everitt, N. M.**, (2020). Mechanical Properties of Selective Laser Melted AlSi10Mg: Nano, Micro, and Macro Properties, *Proc. - 26th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2015*, 1026–1035.
- [103] **Prashanth, K. G., Scudino, S., Klauss, H. J., Surreddi, K. B., Löber, L., Wang, Z., Chaubey, A. K., Kühn, U., and Eckert, J.**, (2014). Microstructure and Mechanical Properties of Al-12Si Produced by Selective Laser Melting: Effect of Heat Treatment, *Mater. Sci. Eng. A*, 590, 153–160.
- [104] **Zhou, L., Mehta, A., Schulz, E., McWilliams, B., Cho, K., and Sohn, Y.**, (2018). Microstructure, Precipitates and Hardness of Selectively Laser Melted AlSi10Mg Alloy before and after Heat Treatment, *Mater. Charact.*, 143, 5–17.
- [105] **Santos Macías, J. G., Douillard, T., Zhao, L., Maire, E., Pyka, G., and Simar, A.**, (2020). Influence on Microstructure, Strength and Ductility of Build Platform Temperature during Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg, *Acta Mater.*, 201, 231–243.
- [106] **Delahaye, J., Tchuindjang, J. T., Lecomte-Beckers, J., Rigo, O., Habraken, A. M., and Mertens, A.**, (2019). Influence of Si Precipitates on Fracture Mechanisms of AlSi10Mg Parts Processed by Selective Laser Melting, *Acta Mater.*, 175, 160–170.
- [107] **ASTM International. F3122-14**, (2014). Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes.
- [108] **ASTM E8**, (2010). ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1, *Annu. B. ASTM Stand.* 4, 1–27.
- [109] **Tiryakioğlu, M., Robinson, J. S., Salazar-Guapuriche, M. A., Zhao, Y. Y., and Eason, P. D.**, (2015). Hardness-Strength Relationships in the Aluminum Alloy 7010, *Mater. Sci. Eng. A*, 631, 196–200.
- [110] **Zhuo, L., Wang, Z., Zhang, H., Yin, E., Wang, Y., Xu, T., and Li, C.**, (2019). Effect of Post-Process Heat Treatment on Microstructure and Properties

- of Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy, *Mater. Lett.*, 234, 196–200.
- [111] **Mohammadi, M., and Asgari, H.**, (2018). Achieving Low Surface Roughness AlSi10Mg_200C Parts Using Direct Metal Laser Sintering, *Addit. Manuf.*, 20, 23–32.
- [112] **ASTM International. E2546-07**, (2007). Standard Practice for Instrumented Indentation Testing.
- [113] **Oliver, W. C., and Pharr, G. M.**, (1992). An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments, *J. Mater. Res.*, 7, 1564–1583.
- [114] **Sekhar, A. P., Nandy, S., Kumar Ray, K., and Das, D.**, (2018). Hardness - Yield Strength Relation of Al-Mg-Si Alloys, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 338.
- [115] **Rometsch, P. A., and Schaffer, G. B.**, (2002). An Age Hardening Model for Al-7Si-Mg Casting Alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 325, 424–434.
- [116] **Cahoon, J. R., Broughton, W. H., and Kutzak, A. R.**, (1971). The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements, *Metall. Trans.*, 2, 1979–1983.
- [117] **Tabor, D.**, (1951). *The Hardness of Metals*, Clarendon Press.
- [118] **Barlat, F., Glazov, M. V., Brem, J. C., and Lege, D. J.**, (2002). A Simple Model for Dislocation Behavior, Strain and Strain Rate Hardening Evolution in Deforming Aluminum Alloys, *Int. J. Plast.*, 18, 919–939.
- [119] **Rosenthal, I., Stern, A., and Frage, N.**, (2017). Strain Rate Sensitivity and Fracture Mechanism of AlSi10Mg Parts Produced by Selective Laser Melting, *Mater. Sci. Eng. A*, 682, 509–517.
- [120] **Zhang, X. X., Andrä, H., Harjo, S., Gong, W., Kawasaki, T., Lutz, A., and Lahres, M.**, (2021). Quantifying Internal Strains, Stresses, and Dislocation Density in Additively Manufactured AlSi10Mg during Loading-Unloading-Reloading Deformation, *Mater. Des.*, 198, 1–9.
- [121] **Thomas, D. S., and Gilbert, S. W.**, (2015). *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing: A Literature Review and Discussion*.
- [122] **Budynas, R. G., Nisbett, J. K., and Shigley, J. E.**, (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*.
- [123] **Yang, R. J., and Chen, C. J.**, (1996). Stress-Based Topology Optimization, *Struct. Optim.*, 12, 98–105.
- [124] **Kreisselmeier, G., and Steinhauser, R.**, (1979). Systematic Control Design by Optimizing a Vector Performance Index, *IFAC Proc. Vol.*, 12, 113–117.
- [125] **Duysinx, P., and Sigmund, O.**, (1998). New Developments in Handling Stress Constraints in Optimal Material Distribution, *7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [126] **Le, C., Norato, J., Bruns, T., Ha, C., and Tortorelli, D.**, (2010). Stress-Based Topology Optimization for Continua, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 41,

605–620.

- [127] **Martins, J. R. R. A., and Poon, N. M. K.,** (2005). On Structural Optimization Using Constraint Aggregation, *Proc. 6th World Congr. Struct. Multidiscip. Optim.*, 1–10.
- [128] **Raspanti, C. G., Bandoni, J. A., and Biegler, L. T.,** (2000). New Strategies for Flexibility Analysis and Design under Uncertainty, *Comput. Chem. Eng.*, 24, 2193–2209.
- [129] **Köhnen, P., Létang, M., Voshage, M., Schleifenbaum, J. H., and Haase, C.,** (2019). Understanding the Process-Microstructure Correlations for Tailoring the Mechanical Properties of L-PBF Produced Austenitic Advanced High Strength Steel, *Addit. Manuf.*, 30, 100914.
- [130] **Shao, J., Yu, G., He, X., Li, S., Chen, R., and Zhao, Y.,** (2019). Grain Size Evolution under Different Cooling Rate in Laser Additive Manufacturing of Superalloy, *Opt. Laser Technol.*, 119, 105662.
- [131] **Xu, Z., Wang, S., Wang, H., Song, H., Li, S., and Chen, X.,** (2020). Effect of Cooling Rate on Microstructure and Properties of Twin-Roll Casting 6061 Aluminum Alloy Sheet, *Metals (Basel)*, 10, 1–11.
- [132] **Maamoun, A. H., Xue, Y. F., Elbestawi, M. A., and Veldhuis, S. C.,** (2018). The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys, *Materials (Basel)*, 12.
- [133] **Pekok, M. A., Setchi, R., Ryan, M., Han, Q., and Gu, D.,** (2021). Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AA2024 Fabricated Using Selective Laser Melting, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 112, 175–192.
- [134] **Giovagnoli, M., Silvi, G., Merlin, M., and Di Giovanni, M. T.,** (2021). Optimisation of Process Parameters for an Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy: Limitations of the Energy Density-Based Approach on Porosity and Mechanical Properties Estimation, *Mater. Sci. Eng. A*, 802, 140613.
- [135] **Khorasani, A. M., Gibson, I., Awan, U. S., and Ghaderi, A.,** (2019). The Effect of SLM Process Parameters on Density, Hardness, Tensile Strength and Surface Quality of Ti-6Al-4V, *Addit. Manuf.*, 25, 176–186.
- [136] **Callister, W. D.,** (2006). *Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition Wiley Plus Set*, Wiley.
- [137] **Hadadzadeh, A., Shalchi Amirkhiz, B., Odeshi, A., Li, J., and Mohammadi, M.,** (2019). Role of Hierarchical Microstructure of Additively Manufactured AlSi10Mg on Dynamic Loading Behavior, *Addit. Manuf.*, 28, 1–13.
- [138] **Hansen, N.,** (2004). Hall-Petch Relation and Boundary Strengthening, *Scr. Mater.*, 51, 801–806.
- [139] **Cyr, E. D., Brahme, A., Mohammadi, M., Mishra, R. K., and Inal, K.,** (2018). A New Crystal Plasticity Framework to Simulate the Large Strain Behaviour of Aluminum Alloys at Warm Temperatures, *Mater. Sci. Eng. A*, 727, 11–28.

- [140] **Wang, Q. G.**, (2003). Microstructural Effects on the Tensile and Fracture Behavior of Aluminum Casting Alloys A356/357, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 34, 2887–2899.
- [141] **Zhang, X. X., Lutz, A., Andrä, H., Lahres, M., Gan, W. M., Maawad, E., and Emmelmann, C.**, (2021). Evolution of Microscopic Strains, Stresses, and Dislocation Density during in-Situ Tensile Loading of Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy, *Int. J. Plast.*, 139, 1–22.
- [142] **Mughrabi, H.**, (2016). The α -Factor in the Taylor Flow-Stress Law in Monotonic, Cyclic and Quasi-Stationary Deformations: Dependence on Slip Mode, Dislocation Arrangement and Density, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 20, 411–420.
- [143] **Liu, K., and Tovar, A.**, (2014). An Efficient 3D Topology Optimization Code Written in Matlab, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 50, 1175–1196.
- [144] **Wohlers, T. T.**, (2014). *Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Fort Collins, Col.
- [145] **Laureijs, R. E., Roca, J. B., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J. L., and Fuchs, E. R. H.**, (2017). Metal Additive Manufacturing: Cost Competitive beyond Low Volumes, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, 139.
- [146] **Svanberg, K.**, (1998). The Method of Moving Asymptotes - Modelling Aspects and Solution Schemes, *Lect. notes DCAMM course AdvaneecI Topics Struct. Optim.*, 24.