
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN PARÇALARIN İMALAT PARAMETRELERİNİN GEOMETRİK TOLERANSLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Yusuf SİYAMBAŞ

DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

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

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

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

Yusuf SİYAMBAŞ
05/07/2023

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN PARÇALARIN İMALAT PARAMETRELERİNİN GEOMETRİK TOLERANSLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Yusuf SİYAMBAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımının seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile eklemeli imalatında, imalat parametrelerinin mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve geometrik toleranslar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla ilk olarak, hacimsel enerji yoğunluğunun mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkilerine odaklanılmış ve farklı hacimsel enerji yoğunluklarında test parçaları üretilmiştir. Parçaların üretimi Taguchi L_9 ortogonal dizi deney tasarımına göre yapılmıştır. İmalat parametreleri olarak, üç farklı lazer gücü (250-300-350 W), üç farklı tarama hızı (900-1000-1100 mm/s), üç farklı tarama aralığı (0,17-0,19-0,21 mm) ve sabit katman kalınlığı (0,03 mm) değerleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, 68,62 J/mm^3 ve 36,07 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin azaldığı ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Ürün kalitesindeki bu düşüş yüksek ve düşük hacimsel enerji yoğunluklarında oluşan kusurlarla ilişkilendirilmiştir. Üretilen parçalardaki en düşük gözeneklilik seviyesi, en yüksek mekanik özellikler için 55,82 J/mm^3 ve en düşük yüzey pürüzlülüğü için 54,46 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tabanlı Gri ilişkisel analiz yöntemi ile çoklu yanıt optimizasyonu yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatı için en uygun imalat parametreleri 350 W lazer gücü, 1100 mm/s tarama hızı 0,19 mm tarama aralığı ve bu parametrelerin birleşimi olan 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğu olarak elde edilmiştir. Daha sonra belirlenen bu hacimsel enerji yoğunluğu esas alınarak, geometrik toleransların araştırılmasında kullanılan parçalar üretilmiştir. Parçaların üretimi on iki farklı lazer gücü ve tarama hızı ile sabit tarama aralığı ve katman kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda geometrik tolerans değerleri, yüksek ve düşük tarama gücü/tarama hızı kombinasyonlarında yüksek sapma ile sonuçlanmıştır. Geometrik toleransların araştırılmasında kullanılan delik konumları, delik çap ölçüsü, açısallıktan sapma, diklikten sapma, düzlemsellikten sapma ve paralellikten sapma gibi performans özellikleri için en düşük sapma miktarları 250/785-310/974 tarama gücü/tarama hızı imalat parametreleri aralığında elde edilmiştir. Bu değerler, imalat parametrelerinin orta değerleridir. Deneysel olarak elde edilen delik çap ölçüsü, açısallıktan sapma, diklikten sapma, düzlemsellikten sapma ve paralellikten sapma gibi performans çıktıları için bir bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bulanık mantık modeli ile göstergelerin başarılı bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli imalat, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü, gri ilişkisel analiz, geometrik toleranslar, bulanık mantık
Sayfa Adedi	:	132
Danışman	:	Doç. Dr. Yakup TURGUT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MANUFACTURING PARAMETERS ON GEOMETRIC TOLERANCES OF PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

(Ph. D. Thesis)

Yusuf SİYAMBAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

In this study, the effects of manufacturing parameters on mechanical properties, surface roughness, and geometric tolerances were investigated in the additive manufacturing of AlSi10Mg alloy by the selective laser melting (SLM) method. For this purpose, the effects of volumetric energy density on mechanical properties and surface roughness were focused, and test pieces were produced with different volumetric energy densities. The parts were fabricated according to the Taguchi L_9 orthogonal array experimental design. As manufacturing parameters, three different laser power (250-300-350 W), three different scanning speeds (900-1000-1100 mm/s), three different hatching distance (0.17-0.19-0.21 mm), and constant layer thickness (0.03 mm) values are used. As a result of the study, it was observed that the mechanical properties of the samples produced at volumetric energy densities of 68.62 J/mm^3 and 36.07 J/mm^3 decreased, and the surface roughness increased. This decrease in product quality has been associated with defects occurring at high and low volumetric energy densities. The lowest level of porosity in the produced parts was obtained at the volumetric energy density of 55.82 J/mm^3 for highest mechanical properties and 54.46 J/mm^3 for lowest surface roughness. Multiple response optimization was performed with the Taguchi-based Grey relational analysis method for mechanical properties and surface roughness. According to the experimental results, the most suitable fabrication parameters for additive manufacturing of AlSi10Mg alloy were obtained as 350 W laser power, 1100 mm/s scanning speed, 0.19 mm hatching distance and 55.82 J/mm^3 volumetric energy density, which is the combination of these parameters. Then, based on this determined volumetric energy density, parts used in the investigation of geometric tolerances were produced. The production of the parts was carried out with twelve different laser powers and scanning speeds, with a constant hatching distance and layer thickness. As a result of the study, geometric tolerance values resulted in high deviation in combinations of high and low scan power/scan speed. The lowest deviation amounts for performance properties such as hole positions, hole diameter size, deviation from angularity, deviation from perpendicularity, deviation from flatness and deviation from parallelism, which are used in the investigation of geometric tolerances, were obtained in the range of 250/785-310/974 scanning power/scanning speed manufacturing parameters. These values are the middle values of the manufacturing parameters. A fuzzy logic model was created for the experimentally obtained performance outputs such as hole diameter size, deviation from angularity, deviation from perpendicularity, deviation from flatness, and deviation from parallelism. It has been seen that indicators can be successfully predicted with the created fuzzy logic model.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Additive manufacturing, mechanical properties, surface roughness, grey relational analysis, geometric tolerances, fuzzy logic
Page Number	:	132
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Yakup TURGUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Yakup TURGUT'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın içerik ve kapsamının şekillenmesinde kıymetli görüş ve katkılarını esirgemeyen Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Alaattin KAÇAL ve Doç. Dr. Gültekin UZUN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde desteklerinden dolayı Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU'na, Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ'a, Öğr. Gör. Mehmet Serkan YILDIRIM'a, Ahmet Tolunay IŞIK'a ve Tuğba BİLGİN'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sürecinde laboratuvar imkanları için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İmalat Mühendisliği ve Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca FDK-2022-7432 proje kodu ile çalışmamıza maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

Son olarak, her konuda desteklerini hissettiğim ve varlıkları ile gurur duyduğum aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. EKLEMELİ (KATMANLI) İMALAT 23

3.1. Eklemeli İmalat Süreci 29

3.2. Metal Esaslı Eklemeli İmalat 30

3.2.1. Seçici lazer ergitme (SLM) 30

3.2.2. İmalat parametreleri 32

3.2.3. Metal esaslı toz çeşitleri 35

3.2.4. Eklemeli imalatta ikincil işlemler 36

3.2.5. Eklemeli imalatta oluşan kusurlar 37

3.2.6. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların mekanik ve yüzey özellikleri 42

4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI 45

4.1. Dövme Alüminyum Alaşımları 45

4.2. Döküm Alüminyum Alaşımları 47

4.3. AlSi10Mg Alaşımı 48

Sayfa

5. GEOMETRİK TOLERANSLAR VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ 51

5.1. Geometrik Toleranslar 51

5.1.1. Geometrik toleransların tanımlanması 51

5.2. Yüzey Pürüzlülüğü 58

6. DENEYSEL TASARIM, KARAR VERME VE TAHMİN TEKNİKLERİ 61

6.1. Taguchi Yöntemi 62

6.2. Gri İlişkisel Analiz 63

6.3. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) 66

7. MATERYAL VE METOT 73

7.1. Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü 73

7.1.1. Kullanılan toz malzeme 73

7.1.2. Kullanılan eklemeli imalat tezgâhı 74

7.1.3. İmalat parametreleri 75

7.1.4. Parça tasarımı ve üretimi 76

7.1.5. Çekme testi 77

7.1.6. Sertlik ölçümü 78

7.1.7. Yüzey pürüzlülüğü 78

7.1.8. Metalografik parça hazırlığı ve mikro yapı 79

7.2. Geometrik Toleranslar 80

7.2.1. İmalat parametreleri 81

7.2.2. Parça tasarımı ve üretimi 82

7.2.3. Geometrik toleransların belirlenmesi 83

Sayfa

8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 85

8.1. Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü 85

8.1.1. Çekme dayanımının değerlendirilmesi 86

8.1.2. Akma dayanımının değerlendirilmesi 87

8.1.3. Mikro sertliğin değerlendirilmesi 89

8.1.4. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi 90

8.1.5. Hacimsel enerji yoğunluğunun kusurlar ve mikro yapı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi 92

8.1.6. Gri ilişkisel analiz sonuçları 95

8.2. Geometrik Toleranslar 98

8.2.1. Delik konumlarının değerlendirilmesi 99

8.2.2. Delik çap ölçülerinin değerlendirilmesi 100

8.2.3. Açısallıktan ve diklikten sapmanın değerlendirilmesi 102

8.2.4. Düzlemsellikten ve paralellikten sapmanın değerlendirilmesi 103

8.2.5. Gri ilişkisel analiz destekli bulanık mantık sonuçları 105

9. SONUÇ VE ÖNERİLER 113

KAYNAKLAR 115

ÖZGEÇMİŞ 131

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Toz malzeme çeşitlerinin sınıflandırılması 36

Çizelge 4.1. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 47

Çizelge 5.1. Geometrik tolerans çeşitleri ve sembolleri 52

Çizelge 7.1. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi 74

Çizelge 7.2. AlSi10Mg tozunun ASTM B822'ye göre toz boyut dağılımı 74

Çizelge 7.3. İmalat tezgahının teknik özellikleri 75

Çizelge 7.4. Parçaların üretiminde kullanılan imalat parametreleri ve değerleri 75

Çizelge 7.5. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeler 76

Çizelge 7.6. Taguchi L_9 ortogonal deney tasarımı 76

Çizelge 7.7. Geometrik tolerans parçalarının üretiminde kullanılan imalat parametreleri 82

Çizelge 7.8. Parçaların üretiminde kullanılan deney tasarımı 82

Çizelge 8.1. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları 85

Çizelge 8.2. Gri ilişkisel analiz sonuçları. 96

Çizelge 8.3. Gri ilişkisel derece için yanıt tablosu. 96

Çizelge 8.4. Doğrulama deney sonuçları 97

Çizelge 8.5. Delik konumları ve delik çap değerleri. 98

Çizelge 8.6. Açısallık, diklik, düzlemsellik ve paralellikten sapma değerleri 98

Çizelge 8.7. Performans çıktıları için normalizasyon sonuçları 106

Çizelge 8.8. Performans çıktıları için gri ilişkisel katsayı, derece ve sıralama sonuçları. 106

Çizelge 8.9. Girdiler ve çıktı için üyelik dereceleri. 108

Çizelge 8.10. Bulanık mantık sisteminde oluşturulan kural tablosu 109

Çizelge 8.11. Deneysel ve tahmin sonuçlarının karşılaştırılması 111

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Fotopolimerizasyon yöntemi 24

Şekil 3.2. Malzeme püskürtme yöntemi 24

Şekil 3.3. Bağlayıcı püskürtme yöntemi 25

Şekil 3.4. Malzeme ekstrüzyon yöntemi 26

Şekil 3.5. Toz yatak füzyonu yöntemi 27

Şekil 3.6. Sac/levha laminasyonu yöntemi 28

Şekil 3.7. Doğrudan enerji biriktirme yöntemi 28

Şekil 3.8. Eklemeli imalat süreci 29

Şekil 3.9. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi 31

Şekil 3.10. SLM yönteminde kullanılan imalat parametreleri 32

Şekil 3.11 Enerji yoğunluğu parametrelerinin şekil üzerinde gösterilmesi 33

Şekil 3.12. Eklemeli imalatta merdiven etkisi 38

Şekil 3.13. Farklı imalat parametrelerinde üretilen parçalarda oluşan toplanma kusurları 39

Şekil 3.14. Parçada oluşan gözeneklilikler (a) füzyon eksikliği (b) anahtar deliği 40

Şekil 3.15. İnşa yönü boyunca SLM ile üretilen AA-7075'te oluşan sıcak çatlaklar 40

Şekil 3.16. Sıcaklık gradyan mekanizması 41

Şekil 4.1. Al-Si faz diyagramı 48

Şekil 5.1. Doğrusallık toleransının gösterimi 53

Şekil 5.2. Düzlemsellik toleransının gösterimi 53

Şekil 5.3. Dairesellik toleransının gösterimi 54

Şekil 5.4. Silindiriklik toleransının gösterimi 54

Şekil 5.5. Paralellik toleransının gösterimi 55

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.6. Diklik toleransının gösterimi 55

Şekil 5.7. Açısallık toleransının gösterimi 56

Şekil 5.8. Konumsal toleransın gösterimi 56

Şekil 5.9. Eş eksenlilik toleransının gösterimi 57

Şekil 5.10. Simetriklik toleransının gösterimi 57

Şekil 5.11. Geometrik toleransının temel biçimleri 58

Şekil 5.12. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün (Ra) şematiği 59

Şekil 5.13. Maksimum profil yüksekliğinin (Rz) şematiği 59

Şekil 5.14. Toplam profil yüksekliğinin (Rt) şematiği 60

Şekil 6.1. Bulanık mantık yönteminin aşamaları 66

Şekil 6.2. Üçgen üyelik fonksiyonu 67

Şekil 6.3. Yamuk üyelik fonksiyonu 68

Şekil 6.4. Mamdani yönteminin yapısı 69

Şekil 6.5. Sugeno yönteminin yapısı 69

Şekil 7.1. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde yapılan deneysel çalışmanın aşamaları 73

Şekil 7.2. Çekme numunesinin ölçüleri b) parçaların imalat platformundaki yerleşimi 77

Şekil 7.3. Geometrik toleransların belirlenmesinde yapılan deneysel çalışmanın aşamaları. 81

Şekil 7.4 a) Geometrik tolerans numunesinin ölçüleri b) parçaların imalat platformundaki yerleşimi 83

Şekil 8.1. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde yapılan deneysel çalışmanın aşamaları. 86

Şekil 8.2. Akma dayanımının imalat parametrelerine göre değişimi a) Ana etki grafiği, b) Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği 88

Şekil 8.3. Mikro sertlik değerinin imalat parametrelerine göre değişimi a) Ana etki grafiği, b) Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği. 89

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.4. Yüzey pürüzlülük değerinin imalat parametrelerine göre değişimi a) Ana etki grafiği, b) Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği 91

Şekil 8.5. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin yüzey görüntüleri..... 92

Şekil 8.6. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin XRD desenleri 93

Şekil 8.7. 43,85 hacimsel enerji yoğunluğunda üretilen numunenin EDS analizi..... 94

Şekil 8.8. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin kırık yüzey görüntüleri. 94

Şekil 8.9. Gri ilişkisel derece için S/N oranları grafiği..... 97

Şekil 8.10. Delik konumlarının imalat parametrelerine göre değişimi 99

Şekil 8.11. Delik çap ölçülerinin imalat parametrelerine göre değişimi..... 101

Şekil 8.12. Açısallıktan ve diklikten sapmanın imalat parametrelerine göre değişimi... 102

Şekil 8.13 Düzlemsellikten ve paralellikten sapmanın imalat parametrelerine göre değişimi 104

Şekil 8.14. Beş girdili ve bir çıktılı bulanık mantık yapısı 107

Şekil 8.15. Bulanık mantık (Mamdani) ağ yapısı 108

Şekil 8.16 Çaptan, açısallıktan, diklikten, düzlemsellikten ve paralellikten sapma için üyelik fonksiyonu 109

Şekil 8.17. Çoklu yanıt sonuçları için üyelik fonksiyonu..... 109

Şekil 8.18. Bulanık kural görüntüleyici 110

Şekil 8.19. Deneysel ve tahmin sonuçlarının karşılaştırılması 111

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. AlSi10Mg alaşım tozunun morfolojisi 49

Resim 7.1. AlSi10Mg alaşımının SEM görüntüsü 74

Resim 7.2. Kullanılan eklemeli imalat tezgâhı 74

Resim 7.3. Çekme test cihazı 77

Resim 7.4. Sertlik ölçme cihazı 78

Resim 7.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı 78

Resim 7.6. Metalografik hazırlıklarda kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı 79

Resim 7.7. SEM cihazı ve EDS aparatı 79

Resim 7.8. XRD cihazı 80

Resim 7.9. Geometrik toleransların ölçüldüğü CMM cihazı 84

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
E	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)
Fe	Demir
HV	Vickers sertliği
h	Tarama aralığı (mm)
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Ni	Nikel
P	Lazer gücü (W)
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (µm)
R_m	Çekme dayanımı (MPa)
R_p	Akma dayanımı (MPa)
Rt	Toplam profil yüksekliği (µm)
Rz	Maksimum profil yüksekliği (µm)
Si	Silisyum
t	Katman kalınlığı (mm)
v	Tarama hızı (mm/s)
Zn	Çinko

Kısaltmalar	Açıklamalar
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Amerikan makine mühendisleri topluluğu)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan test ve materyalleri topluluğu)
CAD	Computer Aided Desing (Bilgisayar destekli tasarım)

Kısaltmalar	Açıklamalar
CMM	Coordinate Measurement Machine (Koordinat ölçüm cihazı)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı sayısal denetim)
DED	Directed Energy Deposition (Doğrudan enerji biriktirme)
DLP	Dijital ışık işleme
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan metal lazer sinterleme)
EBM	Electron Beam Melting (Elektron ışını ergitme)
EDS	Energy Dispersive Spectrometry (Enerji dağılım spektroskopisi)
Eİ	Eklemeli imalat
FDM	Eriyik biriktirme modelleme
FL	Fuzzy Logic (Bulanık mantık)
GFRG	Grey-fuzzy Reasoning Grade (Gri-fuzzy ilişki derecesi)
GRC	Grey Relational Coefficient (Gri ilişkisel katsayı)
GRG	Grey Relational Grade (Gri ilişkisel derece)
GS	Gray System (Gri sistem)
HAZ	Heat Affected Zone (Isıdan etkilenmiş bölge)
HIP	Hot Isostatic Pressing (Sıcak izostatik presleme)
HT	Heat Treatment (Isıl işlem)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası standardizasyon kuruluşu)
LOM	Laminated Object Manufacturing (Lamine nesne imalatı)
PBF	Powder Bed Fusion **(**Toz yatak füzyonu)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
SHT	Solution Heat Treatment (Çözelti ısıl işlemi)
SLA	Stereolitografi

Kısaltmalar	Açıklamalar
SLM	Selective Laser Melting (Seçici lazer ergitme)
SLS	Selective Laser Sintering (Seçici lazer sinterleme)
XRD	X-ray diffraction analysis (X-ışını kırınımı analizi)

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri, karmaşık geometrili ve hafif yapılı parçaların üretimine olanak tanıması ile bir çok uygulamada geleneksel imalat yöntemlerinin yerini almıştır. Eklemeli imalat geleneksel imalat yöntemleri ile kıyaslandığında, yüksek tasarım özgürlüğü, talaşlı imalata göre düşük malzeme sarfiyatı, perçinleme ve kaynak gibi birleştirme işlemlerinin azaltılması gibi avantajlara sahiptir. Bu avantajlarla eklemeli imalat, saf metallerden alaşımlara, kompozitlerden polimerlere kadar çeşitli türdeki ürünlerin elde edilmesinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Her imalat yönteminde olduğu gibi eklemeli imalat yönteminde de bazı dezavantajlarla karşılaşılmaktadır. Bu dezavantajlar, üretim boyutunun ve malzeme çeşitliliğinin sınırlı olması, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve imalat sonrası ikincil işlemler (ısıl işlem, yüzey parlatma, talaşlı imalat vb.) olarak ifade edilmektedir [1, 2].

Eklemeli imalatta nihai ürünün kalitesi büyük oranda malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle toz morfolojisi ve içeriği eklemeli imalatta önemli bir kriterdir. Demir dışı alaşımlardan olan alüminyum alaşımları, metal malzemeler içerisinde savunma, otomotiv ve havacılık sektörlerindeki uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sektörlerdeki yaygın kullanımlarından dolayı alüminyum alaşımları eklemeli imalat teknolojisi için oldukça önemli malzemeler olarak kabul edilmektedir. Döküm gibi geleneksel imalat yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlı ürünlerin performansları, düşük soğuma hızlarında oluşan kaba mikro yapılar nedeniyle düşüktür ve bu durumda yetersiz mekanik özelliklere sebep olmaktadır [3]. Yüksek performanslı alüminyum alaşımlı parçaların imal edilmesinde uzun üretim süresi ve yüksek maliyetler nedeniyle geleneksel imalat yöntemlerinden dövme ve ekstrüzyon artık tercih edilmemektedir. Bu nedenle alüminyum alaşımlı parçaları yüksek kalitede ve karmaşık geometrilerde üretebilmesi için yeni bir teknoloji olan seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi geliştirilmiştir. Al-Si alaşımları arasında AlSi10Mg alaşımı, hafiflik, iyi şekillendirilebilirlik, iyi kaynaklanabilirlik ve korozyon dayanımı gibi üstün özelliklere sahiptir [4]. Bu alaşımın eklemeli imalatında ise seçici lazer ergitmenin yeri, oldukça önemlidir.

Seçici lazer ergitme (SLM), toz yatak füzyon kategorisine giren eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. SLM, metal esaslı eklemeli imalat yöntemlerinde en çok kullanılan

teknolojidir ve çeşitli toz alaşımlarından karmaşık geometrilerin ve tam yoğunluğa yakın parçaların üretimine olanak tanımaktadır [3]. SLM, ince mikro yapıların üretiminde yüksek verimliği ve yüksek soğuma hızı gibi üstün özelliklerinden dolayı otomotiv, biyomedikal ve havacılık alanları başta olmak üzere çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır [5]. Bu açıdan seçici lazer ergitme, geleneksel imalat yöntemlerinin sınırlamalarını aşmak ve alüminyum alaşımlarının eklemeli imalatı için uygun bir yöntemdir.

Eklemeli imalatta nihai ürünün tam yoğunlukta üretilmesi, istenilen en önemli sonuçlardan biridir. Tam yoğunlukta üretilemeyen ürünlerde kusurlar oluşmakta ve bu kusurlarda mekanik özellikleri, yüzey pürüzlülüğünü ve boyutsal doğruluğu olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz sonuçları ortadan kaldırmak ve nihai ürünün performans özelliklerini artırmak, imalat parametrelerinin doğru seçimine bağlıdır. Yadroitsev, SLM sistemlerinde parça imalatının en az 130 farklı imalat parametresinden etkilendiğini ifade etmiştir [6]. SLM çalışmalarda en çok araştırılan parametreler tarama hızı, lazer gücü, katman kalınlığı ve tarama aralığıdır. Birçok çalışmada bu parametrelerin, üretilmiş parçaların performans özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır [7, 8]. Bu çalışmalarda, SLM ile üretilmiş parçaların mikro yapıları ve mekanik özellikleri üzerindeki belirli bir imalat parametresinin veya birkaç imalat parametresinin araştırma eğiliminde olduğu görülmüştür. Aslında SLM ile üretilmiş parçaların kalitesi birçok parametreden etkilenir. SLM sürecinde bu parametrelerin etkisini bir arada gözlemlemek ve uygun bir üretim bölgesi sağlamak amacıyla hacimsel enerji yoğunluğu (VED) kapsamlı bir parametre olarak kullanılmalıdır. Eriyik havuzunun boyutu ve şekli, diğer değişkenlerin yanı sıra enerji kaynağı tarafından sağlanan ve toz yatağı tarafından emilen toplam enerji miktarı tarafından belirlenir [9]. Bu da toz yatak füzyon sistemlerinde (PBF) birbirine bağlı ve etkileşimli imalat parametreleri ile sağlanmaktadır. Özellikle PBF için imalat parametreleri özel bir algoritma tarafından dinamik olarak kontrol edilir ve bu da bireysel parametrelerin çalışılmasını oldukça zorlaştırır. Bu nedenle, araştırmacılar toplam enerji girdi seviyelerini hesaplamada teorik değişkenlere güvenirler. Mevcut değişkenler arasında ise en iyi yaklaşımlardan biri hacimsel enerji yoğunluğudur. Hacimsel enerji yoğunluğu (VED) Eş. 1 ile ifade edilmektedir. Denklemde, P lazer gücünü (W), v tarama hızını (mm/s), h tarama aralığını (mm) ve t katman kalınlığını ifade etmektedir.

$$VED = \frac{P}{v * h * t} \tag{1.1}$$

Genel olarak imalat işlemlerinde nominal ölçülerde parça üretmek oldukça zordur. Parça üretiminde boyut, biçim, yön ve konum sapmaları daima meydana gelmektedir. Bu sapmaların çok büyük olması parçanın kullanılabilirliğini azaltacaktır. İmal edilen parçanın işlevini yerine getirebilmesi için bu sapmaların mümkün olduğunca küçük veya kabul edilebilir bir değer aralığında bulunması gerekmektedir. Tasarımı yapılan parçaların üretiminde imalat yöntemi ve imalat parametrelerinin uyumu önemlidir. Özellikle birbiri içinde çalışan mekanizmaları oluşturan parçaların üretilmesinde düşük tolerans aralığının istenmesi imalat parametrelerinin belirlemesini zorunlu kılmaktadır. Çünkü istenilen tolerans aralığında üretilmeyen parçalar titreşim, sürtünme gibi olumsuzluklara sebep olarak sistemin kullanım ömrünü azaltacaktır. Bu durumda istenilen tolerans değerlerine ulaşmak için ilave işlemler gerekmekte, ilave işlemlerde zaman ve maliyet açısından külfet oluşturmaktadır. Bu nedenle parçaların istenilen tolerans değerleri aralığında ve ilave işlemsiz üretilmesi birçok açıdan fayda sağlamaktadır.

Eklemeli imalat doğası gereği karmaşık bir sürece sahiptir ve ürün performansı birçok parametreden etkilenir. Bu nedenle daha yüksek mekanik özellikler, daha düşük bir yüzey pürüzlülüğü ve daha düşük boyutsal sapmaların elde edilmesi için ideal imalat parametrelerini düzenlemek kolay olmamaktadır. Eklemeli imalat sürecinde, faktörler performans çıktılarını çok yönlü etkilediğinden tek bir ideal imalat parametreleri dizisi belirlemek çok zordur. Bu sebeplerden dolayı bahsedilen çözüme ulaşmak için çok amaçlı optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımının seçici lazer ergitme yöntemi ile eklemeli imalatında imalat parametrelerinin geometrik toleranslar üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak geometrik toleransların araştırılmasında kullanılan, parçaların üretiminde muhtemel oluşacak olumsuzlukları önlemek için mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili ön çalışmalar yapılmıştır. Bu ön çalışmalar ile AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatı için ideal hacimsel enerji yoğunluğu belirlenmiştir. Belirlenen bu hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı kalınarak geometrik toleransların araştırılmasında kullanılan numuneler üretilmiştir. Parçaların üretimi farklı lazer gücü ve tarama hızı ile sabit tarama aralığı ve katman kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel verilerin doğruluğunu kıyaslamak ve tahmin değerleri ile karşılaştırılması için bir bulanık mantık modeli oluşturulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Metal esaslı eklemeli imalatta istenilen nihai ürüne ulaşma sürecinde, etkin bir şekilde belirlenmeyen imalat parametreleri sonucunda düşük yüzey kalitesinin oluşması, ideal mekanik özelliklerin elde edilememesi, şekil ve boyutsal sapmaların meydana gelmesi gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılmaktadır. Bu gibi olumsuzlukları ortadan kaldırmak için ilave işlemlere ihtiyaç duyulmakta bu da imalat maliyetlerini artırmaktadır. İlave işlemlerle oluşan maliyeti ortadan kaldırmak ve nihai ürünün ilave işlemlere gerek duyulmadan istenilen kalitede üretilmesinde, optimum imalat parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Eklemeli imalat çalışmalarında yaşanan sorunların önüne geçmek, çözüm üretmek ve daha kaliteli parçalar üretmek amacı ile çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu konularla ilgili yapılan çalışmalar özetlenerek sunulmuştur.

Maamoun vd., Alüminyum alaşımının (AlSi10Mg) seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile eklemeli imalatında imalat parametrelerinin parça kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İmalat parametrelerinin bağıl yoğunluk, gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerindeki etkisini analiz etmek için bir deney tasarımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan imalat parametreleri dört farklı lazer gücü (200-300-350-370 W), üç farklı tarama hızı (1000-1300-1500 mm/s), üç farklı tarama aralığı (0,15-0,19-0,25 mm) ve sabit katman kalınlığı (0,03 mm) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, optimum bağıl yoğunluk için enerji yoğunluğu aralığının 50-60 J/mm^3 olduğu, yüksek ve düşük enerji yoğunluklarında gözeneklilik seviyesinin arttığı belirtilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün enerji yoğunluğundan önemli ölçüde etkilendiği ve minimum yüzey pürüzlülüğünün 65 J/mm^3 enerji yoğunluğunda 4,5 μm olarak elde edildiği belirtilmiştir. Boyutsal toleransların 0,15-0,195 mm gibi büyük bir değer arasında değişirken, istenilen tolerans değerlerinin daha yüksek tarama aralığı ve tarama hızları ile elde edilebileceği vurgulanmıştır [10].

Read vd., AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında enerji yoğunluğunun gözeneklilik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, hataları (gözenekler ve çatlaklar) en aza indirmesi ve imalat parametrelerinin etkisini değerlendirmek için istatistiksel bir yöntem kullanılmıştır. Farklı enerji yoğunluklarının elde edilebilmesi için, beş farklı lazer gücü (100-125-150-175-200 W), beş farklı tarama hızı (700-1025-1350-1675-2000 mm/s) ve beş farklı tarama aralığı (0,2-0,35-0,5-0,65-0,8 mm) parametreleri kullanılmıştır. Çalışma

sonucunda, 50 J/mm^3'ten daha düşük enerji yoğunluklarında toz tabakasının eksik ergimesinden kaynaklı yüksek gözenekliliğin oluştuğu belirtilmiştir. Enerji yoğunluğunun 50 J/mm^3 değerinden 60 J/mm^3 değerine kadar artması ile gözeneklilik seviyesinin azaldığı, enerji yoğunluğu 60 J/mm^3 değerini aştığında gözeneklilik seviyesinin arttığı belirlenmiştir. Yüksek enerji girişi metalin kolayca buharlaşmasına neden olarak gaz kabarcıklarının parça yüzeyinin altında sıkışması ile anahtar deliği gözenekliliğine neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında minimum gözeneklilik için ideal enerji yoğunluğu aralığının 50-60 J/mm^3 olduğunu söylemişlerdir [11].

Majed vd., AlSi10Mg alaşımlı parçalarının SLM yöntemi ile üretilmesinde imalat parametrelerinin yüzey kalitesine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada parçaların üretimi için üç farklı lazer gücü (320-360-400 W), üç farklı tarama hızı (600-750-900 mm/s) ve üç farklı örtüşme oranı (25-30-35 %) kullanılmıştır. Parametrelerin işlem üzerindeki etkisini belirlemek için anova analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, en düşük yüzey pürüzlülüğü 360 W lazer gücü, 750 mm/s tarama hızı ve %25 örtüşme oranında 3,35 µm olarak elde edilmiştir. Lazer gücündeki artış ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı, tarama hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve örtüşme oranındaki artış ile yüzey kalitesinin azaldığı belirtilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin lazer gücü olduğu, bunu sırası ile tarama hızı ve örtüşme oranının takip ettiği ifade edilmiştir [12].

Calignano vd., doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretilmesinde imalat parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Parça üretiminde altı farklı tarama hızı (800-850-900-950-1000-1250 mm/s) üç farklı lazer gücü (120-155-190 W), üç farklı tarama aralığı (0,1-0,15-0,20 mm) ve sabit katman kalığı (0,03 mm) parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, en düşük yüzey pürüzlülüğü 900 mm/s tarama hızı, 120 W lazer gücü ve 0,1 mm tarama aralığında elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca bilyalı dövme gibi imalat sonrası işlem ile yüzey pürüzlülüğünün azaltılabileceği vurgulanmıştır [13].

Ahmed vd., AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin bağıl yoğunluk üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Parça üretiminde kullanılan parametreler lazer gücü (320-380 W), tarama hızı (1550-1750 mm/s) ve tarama aralığı (0,1-0,15 mm) değişkenleridir. Çalışma sonucunda, en iyi bağıl yoğunluğun (%99,11) 350 W lazer

gücünde, 1650 mm/s tarama hızında, 0,13 tarama aralığında ve bu parametrelerin birleşimi olan 54,39 J/mm^3 enerji yoğunluğunda elde edildiği vurgulanmıştır [14].

Maamoun vd., AlSi10Mg alaşımlı parçalarının SLM yöntemi ile üretilmesinde imalat parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Test parçalarının üretiminde dört farklı lazer gücü (200-300-350-370 W), üç farklı tarama hızı (1000-1300-1500 mm/s), üç farklı tarama aralığı (0,15-0,19-0,25 mm) ve sabit katman kalınlığı (0,03 mm) değişkenleri kullanılmıştır. Üretilen parçalarının mikroyapısı, uygulanan enerji yoğunluğu ile önemli ölçüde değiştiği vurgulanmıştır. 50-60 J/mm^3'lük enerji yoğunluğunda oluşan kusurların minimum seviyede olması bu aralığın üretim için de ideal olduğu belirtilmiştir. Mikroyapı için ideal olan enerji yoğunluğu aralığının akma ve çekme dayanımı için de optimum olduğu aktarılmıştır [15].

Hyer vd., AlSi010Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin parçaların bağıl yoğunluğu ve sertliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Parça üretiminde kullanılan imalat parametreleri olarak beş farklı lazer gücü (150-350 W), yirmi üç farklı tarama hızı (100-10.000 mm/s), beş farklı tarama aralığı (0,09-0,17 mm) ve sabit katman kalınlığı (0,03 mm) değişkenleri kullanılmıştır. Üretilen parçalardaki yüksek yoğunluk (>%99) ve sertlik (114-120 VH) değerleri 32-54 J/mm^3 enerji yoğunluğu aralığında elde edildiği belirtilmiştir. Daha düşük enerji yoğunluğunda füzyon eksikliğinden kaynaklı gözeneklerin oluştuğu ve daha yüksek enerji yoğunluğunda yüzey altında sıkışmış gazlardan oluşan anahtar deliği gözenekliliğin oluştuğu vurgulanmıştır [16].

Kimura ve Nakamoto, A356 (AlSi7Mg0,3) alaşımlı parçaların SLM yöntemi ile üretilmesinde imalat parametrelerinin ürün kalitesine etkisini araştırmışlardır. Ayrıca optimum enerji yoğunluğu koşulları altında üretilen parçaların mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerinde ısıl işlemlerinin (T5 ve T6) etkilerini incelemişlerdir. İmalat parametreleri olarak dört farklı lazer gücü (200-250-300-370 W), dört farklı tarama hızı (800-1400-1600-1800 mm/s), beş farklı tarama aralığı (0,08-0,1-0,12-0,14-0,16-0,18 mm) ve sabit katman kalınlığı (0,03 mm) değişkenleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, en yüksek bağıl yoğunluğun ve mekanik özelliklerin 50-100 J/mm^3 enerji yoğunluğu aralığında elde edildiği belirtilmiştir. Uygulanan ısıl işlemler ile süneklik değerinin arttığı, akma ve çekme mukavemetinin azaldığı ayrıca ısıl işlem görmüş numuneler döküm yöntemi ile

üretilen numunelerle karşılaştırıldığında yüksek akma ve çekme dayanımlarını koruduğu belirtilmiştir [17].

Liu vd., AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüksek güçlü lazer toz yatak füzyonu (HP-LPBF) ile üretilmesinde katman kalınlığının kusur oluşumuna ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Test parçalarının üretiminde beş farklı katman kalınlığı (0,05-0,1-0,15-0,2-0,25 mm) değeri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, katman kalınlığının düşük değerlerinde (0,05-0,10 mm) bağıl yoğunluğun en yüksek seviyede olduğu (%99,8) ve katman kalınlığının 0,05'ten 0,25 mm'ye artan değerlerinde bağıl yoğunluğun giderek azaldığı belirtilmiştir. Özellikle katman kalınlığı 0,25 mm'ye ulaştığında toz yatağının tamamen ergitilememesi sonucunda füzyon eksikliği gözenekliliğinin oluştuğu vurgulanmıştır. Ayrıca, HP-LPBF ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri döküm yöntemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı numunelerden daha üstün olduğu belirtilmiştir [18].

Aboulkhair vd., AlSi10Mg alaşımından yüksek yoğunlukta parçalar üretmek için imalat parametrelerini araştırmışlardır. Parçalardaki gözeneklilik seviyesinin gözlenmesi için beş farklı tarama aralığı (0,05-0,1-0,15-0,2-0,25 mm), dört farklı tarama hızı (250-500-750-1000 mm/s), sabit lazer gücü (100 W) ve katman kalınlığı (0,04 mm) değerlerinde küp parçalar üretilmiştir. Çalışma sonucunda, 0,05 ve 0,1mm tarama aralığında bitişik eriyik havuzları arasında yeterli örtüşmenin sağlandığından daha küçük tarama aralığının kullanılması tavsiye edilmiştir. Bu tarama aralıklarında tarama hızının etkisi araştırılmış ve oluşan gözenek tipinin kullanılan tarama hızı ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Metalurjik gözeneklerin düşük tarama hızlarında oluşma eğiliminde olduğu, anahtar deliği gözeneklerinin yüksek tarama hızı ile oluştuğunu aktarmışlardır. Ayrıca artan tarama hızı ile yüzeyde meydana gelen toplanma kusurların oluştuğunu ve bu yüzey durumunun tekrarlı tarama stratejisi ile azaltılabileceğini söylemişlerdir [19].

Rhein vd., AlSi10Mg alaşımlı parçaların doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ile üretilmesinde imalat parametrelerinin kusurlar ve yorulma performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numunelerin üretiminde, altı farklı lazer gücü (220-250-260-310-340-370 W), sekiz farklı tarama hızı (600-800-1000-1100-1200-1300-1400-1600 mm/s), üç farklı katman kalınlığı (0,03-0,06-0,09 mm), iki farklı tarama aralığı (0,16-0,19 mm) ve üç farklı inşa yönü (dikey, 45°, 60°) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, 220-370 W lazer gücü aralığında artan lazer güçlerinde, kusur boyutunun azaldığı ve bu durum da yorulma

performansını pozitif yönde etkilediği belirtilmiştir. Regresyon analizi sonucunda kusur boyutu ve yorulma performansı üzerinde inşa yönünün ve tarama hızının, tarama gücü ve katman kalınlığına göre daha düşük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Üretim sırasındaki katman kalınlığının kusur oluşumunda en fazla etkiye sahip olduğu, düşük katman kalınlığının yorulma performansını iyileştirdiği vurgulanmıştır. Sertlik, çekme dayanımı ve süneklik gibi mekanik özelliklerin, artan gözeneklilik seviyesi ile azaldığı belirtilmiştir. Mikroyapı ve kırık yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi sonucunda füzyon eksikliğinin ve anahtar deliği gözenekliliğinin erken kopmaya sebep olduğu ifade edilmiştir [20].

Öter, AlSi10Mg alaşımlı parçaların DMLS yöntemi ile üretilmesinde imalat parametrelerinin yüzey kalitesi, mekanik özellikler ve geometrik hassasiyet üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında yüzey kalitesinin ve boyutsal doğruluğun belirlenmesinde prizmatik parçalar, mekanik özelliklerin belirlenmesinde silindirik çekme parçaları üretilmiştir. Bu numunelerin üretiminde beş farklı lazer gücü (150-200-250-300-370 W), beş farklı tarama hızı (400-700-1000-1300-1600 mm/s), sabit tarama aralığı (0,19 mm) ve katman kalınlığı (0,03 mm) parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin 49,93 J/mm^3 enerji yoğunluğunda 5,07 µm olarak elde edildiği, artan ve azalan enerji yoğunluğu değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirtilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için uygun olan enerji yoğunluğunun optimum mekanik özellik (akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik) değerleri için de uygun olduğu aktarılmıştır. Mekanik özellikler için ideal olan imalat parametreleri ile boyutsal doğruluğun araştırılmasında kullanılan parçalar üretilmiştir. Düşük ve orta enerji yoğunluğu değerlerinde üretilen parçaların yüksek enerji yoğunluğunda üretilenlere kıyasla daha iyi boyutsal sonuçlar verdiği, yüksek enerji yoğunluğunda üretilen parçalarda çarpılmalardan kaynaklı boyutsal hassasiyetin azaldığı belirtilmiştir [21].

Stegman vd., nikel alaşımlı parçaların (Inconel 718) üretilmesinde enerji yoğunluğunun mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 50×10×1,5 mm boyutlarında dikey olarak hizalanmış çekme numunelerinin üretiminde üç farklı lazer gücü (300-325-350 W), üç farklı tarama hızı (750-1000-1250 mm/s), üç farklı tarama aralığı (0,1- 0,130-0,160 mm), sabit katman kalınlığı (0,05 mm) ve sabit lazer nokta boyutu (0,150 mm) parametreleri kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin karşılaştırılmasında 30, 46 ve 93 J/mm^3 enerji yoğunluklarında üretilen parçalar kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, bu alaşımın eklemeli

imalatında 46 J/mm^3 enerji yoğunluğunun bir eşik değer olduğunu ve bu değerin altında füzyon eksikliğinden kaynaklı mekanik özeliklerin azaldığı belirtilmiştir. Enerji yoğunluğunun eklemeli imalat sürecinin karmaşık fiziğini yakalama kabiliyetinden yoksun olsa bile mekanik özellikler açısından parça kalitesini tanımlamak için ana parametre olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır [22].

Kaplan, seçici lazer ergitme yöntemi ile destek yapısız olarak üretilen çıkıntılı parçalardaki boyutsal değişimleri araştırmıştır. Farklı tarama türü, çıkıntı genişliği ve çıkıntı yüksekliğinde üretilen parçaların SEM görüntüleri ile boyutsal değişimleri incelenmiştir. Ayrıca çıkıntı parçası, boşluk yapılı olarak üretilerek hafifletilmiş ve ağırlığın boyutsal sapma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda 0º 45º, 90º tarama türünde boyutsal değişimin daha az olduğu, çıkıntı genişliğinin artması ile boyutsal değişimin arttığı belirtilmiştir. Çıkıntı yüksekliğinin artması, çıkıntı yüzeyi ile imalat platformu arasındaki mesafesinin azalmasına ve bu durumun da boyutsal değişimin üzerinde olumlu katkılar sağladığı söylenmiştir. Çıkıntı unsurunun boşluklu üretilerek hafifletilmesinin boyutsal değişim üzerinde birincil derecede etkili olmadığı vurgulanmıştır [23].

Sharma vd., AlSi10Mg alaşımlı parçaların seçici lazer ergitme ile üretilmesinde imalat parametrelerinin parçaların yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Lazer gücü (300-350-400 W), tarama hızı (1500-1600-1700 mm/s), tarama aralığı (0,1-0,175-0,25 mm) ve inşa açısı (0º, 45º, 90º) gibi imalat parametrelerini karakterize etmek için cevap yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak bir deney tasarımı oluşturulmuştur. İmalat parametrelerinin etki oranlarının belirlenmesinde anova analizi kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda en iyi yüzey pürüzlülüğünün, en yüksek lazer gücü, en düşük tarama hızı, tarama aralığı ve inşa açısı değerlerinde elde edildiği belirtilmiştir. Yoğunluk açısından incelendiğinde, en yüksek yoğunluğun en yüksek lazer gücü, en düşük tarama hızı, tarama aralığı ve en yüksek inşa açısı değerlerinde oluştuğu vurgulanmıştır. Çalışma ile en düşük yüzey pürüzlülüğü ve en yüksek yoğunluk değeri için enerji yoğunluğunun 44 J/mm^3 olduğu, tarama aralığının hem yüzey pürüzlülüğü hem de yoğunluk için en etkili parametre olduğu aktarılmıştır [24].

Kuai vd., SLM yöntemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüzey morfolojisi, mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerine yeniden ergitmenin etkilerini araştırmışlardır. İmalat işleminde kullanılan parametreleri lazer gücü (370 W), tarama hızı (1300 mm/s), tarama

aralığı (0,19 mm), katman kalınlığı (0,03 mm) ve iki farklı tarama stratejisi (zigzag tarama, zigzag ve 67° döndürülmüş) olarak belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, yeniden ergitme sürelerindeki artışın lazer enerji yoğunluğunun artması ile tamamen ergimeyen toz parçacıklarının ergimesine ve küreselleşmenin azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bu durumunda, numunelerin yüzey kalitesinin iyileşmesini ve pürüzlülük değerinin azalmasını sağladığı belirtilmiştir. Yeniden ergitme sayısı arttıkça metalde kusur oluşumuna sebep olan gazların azalması ile gözenek sayısının azaldığı ve numunelerin yoğunluğunun arttığı vurgulanmıştır. İki tarama stratejisinde de üretilen numunelerin sertlik değerleri birbiri ile yakın değerlerde olduğu belirtilmiştir. Yeniden ergitme işleminin nihai ürüne yaklaşma sürecinde önemli katkısının olduğu vurgulanmıştır [25].

Bağcı vd., DMLS yöntemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı vida parçalarının boyutsal doğruluğu üzerinde imalat parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Üretilen vidanın boyutsal doğruluğunu üç kısımda (çap, boy, diş boyu) değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma, üç farklı lazer gücü (270-330-370 W), üç farklı tarama hızı (900-1300-1600 mm/s) üç farklı ışın ofseti (0,02-0,04-0,06 mm), üç farklı inşa açısı (0°, 30°, 45°) parametrelerine bağlı olarak Taguchi L_9 ortogonal deney dizininde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, diş boyutundaki minimum sapma (0,2 mm) 370 W lazer gücü, 1300 mm/s tarama hızı, 0,02 mm ışın ofseti ve 45° inşa açısı parametrelerinde elde edildiği belirtilmiştir. İşlem üzerinde en etkili parametrenin ışın ofseti olduğu vurgulanmıştır. Boyda oluşan minimum sapma (0,03 mm) değeri 370 W lazer gücü, 1600 mm/s tarama hızı, 0,04 mm ışın ofseti ve 45° inşa açısı parametrelerinde elde edildiği ve işlem üzerinde en etkili parametrenin tarama hızı olduğu ifade edilmiştir. Çapta oluşan minimum sapma miktarı (0,01 mm) 370 W lazer gücü, 1300 mm/s tarama hızı, 0,02 mm ışın ofseti ve 45° inşa açısı parametrelerinde elde edildiği ve işlem üzerinde en etkili parametrenin ışın ofseti olduğu aktarılmıştır [26].

Hu vd., lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı gibi imalat parametrelerinin hacimce %5 TiCN ile güçlendirilmiş AlSi10Mg alaşımlı kompozitinin bağıl yoğunluğu, mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bağıl yoğunluk için en iyi sonucu veren imalat parametrelerine göre mekanik özellikler ve mikroyapının değerlendirilmesi için test parçaları üretilmiştir. Ayrıca üretilen numuneleri T6 ısıl işlemi öncesi ve sonrası olmak üzere inceleyip, ısıl işlemin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini de araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, en yüksek bağıl yoğunluk değerinin (%98,2) 370 W lazer gücü, 1760 mm/s tarama hızı, 0,063 mm tarama

aralığı ve 0,03 mm katman kalınlığı parametreleri ile elde edildiği belirtilmiştir. Isıl işlemin AlSi10Mg-TiCN kompozitinin mikroyapısındaki değişimi gözlemlemek için SEM görüntüleri incelenmiştir. Isıl işlemsiz mikroyapı ile karşılaştırıldığında, T6 ısıl işleminin hücre yapısını tamamen azalttığını ve Al matrisinde homojen olarak dağılmış kaba Si parçacıklarının ortaya çıkması ile sonuçlandığı belirtilmiştir. Si parçacıklarının kabalaşması mukavemeti azaltabileceğini aynı zamanda sünekliği arttırabileceğini söylemişlerdir. Isıl işlem ile çekme dayanımı, basma dayanımı ve sertlik değeri düşerken süneklik değerinin arttığı vurgulanmıştır. Saf AlSi10Mg alaşımı ile karşılaştırıldığında, AlSi10Mg-TiCN kompozitinin çekme dayanımı, basma dayanımı ve sertlik değerleri daha yüksek değerlerde iken süneklik değerinin daha düşük olduğu ifade edilmiştir [27].

Wu vd., SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların mikroyapısal değişimi ve tribolojik özellikleri üzerinde ergime modlarının etkisini incelemişlerdir. Parçaların üretimi, iletim modu (düşük enerji yoğunluğu, 42,03 J/mm^3) ve anahtar deliği modu (yüksek enerji yoğunluğu, 83,33 J/mm^3) olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Numuneleri iki ergitme modu altında elde etmek için degişken lazer gücü, tarama hızı ve sabit lazer ışını çapı, tarama aralığı, katman kalınlığı parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca, SLM yöntemi ile üretilen numenlerin mikroyapılarının tribolojik özellikler üzerindeki etkisini anlamak ve karşılaştırma yapmak için döküm yöntemi ile de numuneler üretmişlerdir. Çalışma sonucunda, düşük enerji yoğunluğunda oluşan yüksek pürüzlülüğün eriyiğin yüksek viskozitesi ve düşük ıslanabilirliğinden kaynaklandığını, yüksek enerji yoğunluğunda daha düşük pürüzlülüğün Al'nin buharlaşması ve eriyiğin yeniden akışı ile Si dağılımının değişmesinden kaynaklı meydana geldiğini aktarmışlardır. Döküm yöntemi ile üretilen numunenin sürtünme katsayısı 0,35 değerinde ve yüksek aşınma oranı ($10{,}05\times10^{-4}$ mm^3/Nm) gösterdiği belirtilmiştir. Düşük enerji yoğunluğunda üretilen numunenin sürtünme katsayısı döküm yöntemi ile üretilene yakın bir değer (0,36) iken çok daha düşük aşınma oranı ($6{,}96\times10^{-4}$ mm^3/Nm) gösterdiği aktarılmıştır. Enerji yoğunluğunun yüksek seviyesinde üretilen numunede ölçülen sürtünme katsayısı (0,32) en düşük değerde iken aşınma oranı (3,82×10-4 mm^3/Nm) önemli ölçüde azaldığı vurgulanmıştır. Yüksek enerji yoğunluğunda düşük aşınma oranını rastgele dağıtılan Si nanoparçacıklarının sürtünme çiftinin temas alanını azaltmasına atfetmişlerdir. Döküm numunelerinde görülen aşınmanın yapışma ile aşınma (adhesive), SLM numunelerinde ise Si ağ yapısından kaynaklı aşındırıcı ile aşınma (abrasive) mekanizmalarının ön planda olduğunu gözlemlemişlerdir [28].

Zhang vd., SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlı numunelerinin inşa yönü boyunca doğrudan yaşlandırmanın (DA) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Parça üretiminde, lazer gücü (275 W), tarama hızı (1600 mm/s) katman kalınlığı (0,03 mm) ve farklı yaşlandırma sıcaklıkları (130-150-170-190 ºC / 4 saat) parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, yaşlandırma işlemi sonrasında gözenekliliğin arttığı ve en yüksek gözenekliliğin en yüksek yaşlandırma sıcaklığında (190 ºC) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Gözeneklilik seviyesinin artmasının parçaların yoğunluğunun azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. 130 °C'de yaşlandırılmış parçaların mikrosertliğinin ısıl işlemsiz olarak imal edilen parçaların mikrosertliğinden %10 daha yüksek olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte yaşlandırma sıcaklığının daha da artmasıyla mikrosertlik önemli ölçüde azalmıştır. Düşük sıcaklıkta yaşlandırma işleminden sonra çekme dayanımı ve süneklik önemli ölçüde arttığı ifade edilmiştir. Yaşlandırma sıcaklığının 150 °C'den 190 °C'ye çıkması ile mekanik özellikler kademeli olarak azalmıştır. 130 ºC doğrudan yaşlandırma sıcaklığının kusurların büyümesinin dengelenmesi ve hücre yapısının iyileştirilmesi nedeni ile optimum değer olduğunu vurgulamışlardır [29].

Karakılınç vd., yaptıkları derleme çalışmasında, toz boyutunun ve geometrisinin eklemeli imalat ile üretilen parçaların kalitesine etkisini incelemişlerdir. Toz beslemeli eklemeli imalat metotlarının kendine has çalışma prensiplerinin olmasından kaynaklı toz dağılımı ve toz boyut farklılıklarının olduğunu, seçici lazer ergitme yönteminde (SLM) 15-63 µm arasında toz boyutunun kullanıldığını, küresel şekilli tozların yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk üzerinde önemli etkisinin olması ile daha çok tercih edildiğini belirtmişlerdir. Uygun geometride ve boyutta toz kullanımının üretilen parçaların mekanik özellikleri, gözeneklilik seviyesi ve yoğunluk gibi ürün kalitesini etkileyen özellikleri üzerinde anlamlı katkılarının olduğunu söylemişlerdir [30].

Zhang v0d., farklı enerji yoğunluklarında üretilen 316L paslanmaz çelik parçaların ürün kalitesini araştırmışlardır. Oluşan enerji yoğunluklarını kısmi ergime (37,88-75,76 J/mm^3), tam ergime (75,76-151,52 J/mm^3) ve aşırı ergime (151,52 J/mm^3'ten büyük) olmak üzere üç bölgeye ayırmışlardır. Üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü, yoğunluğu, mikro yapısı ve mekanik özelliklerinin enerji yoğunluğundan etkilendiğini ve tam ergime bölgesinde olan 119,05 J/mm^3 enerji yoğunluğunda en düşük gözenekliliğin, en yüksek bağıl yoğunluğun ve yüksek mekanik özelliklerin elde edildiğini ifade etmişlerdir [31].

Duman ve Kayacan, imalat parametrelerine göre üretilecek parçaların mekanik özelliklerini tahmin etmek için bulanık mantık modeli (Fuzzy logic) geliştirmişlerdir. Oluşturulan modelde giriş değişkenleri lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı ve çıkış değişkenleri çekme dayanımı, sertlik, bağıl yoğunluk olarak belirlemişlerdir. Çıkış değişkenlerinin tahmin edilmesinde, literatürde 316L paslanmaz çelik tozunun eklemeli imalatı ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar kullanılmıştır. Geliştirilen modelin literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında, bağıl yoğunluk için %78, çekme dayanımı için %95, sertlik için %80 doğrulukla tahminler yapılabileceğini, araştırmacıların optimum imalat parametrelerini tespit etmeye dayalı çalışmalar yapmalarını minimuma indirerek maliyet açısından olumlu katkılar sağlayacağını ifade etmişlerdir [32].

Liu vd., 316L paslanmaz çelik parçaların SLM metodu ile üretilmesinde imalat parametrelerinin Z yönündeki büzülme üzerindeki etkisini cevap yüzey yöntemi ile araştırmışlardır. Numune üretiminde üç farklı lazer gücü (90-120-150 W), üç farklı tarama hızı (400-600-800 mm/s), üç farklı katman kalınlığı (0,02-0,03-0,04 mm) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, lazer gücünün Z yönündeki büzülme üzerinde en etkili parametre olduğunu, bunu sırası ile tarama hızı ve katman kalınlığının takip ettiğini aktarmışlardır. Optimize edilmiş imalat parametreleri değerlerinin 135 W lazer gücü, 550 mm/s tarama hızı ve 0,02 mm katman kalınlığı olduğunu ve bu parametrelerle Z yönünde meydana gelen büzülme oranının %2,35 olduğunu belirtmişlerdir [33].

Zhou vd., derin kriyojenik işleminin lazer toz yatak füzyonu (LPBF) ile üretilen AlSi10Mg alaşımının mekanik özellikleri ve kalıntı gerilimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Eklemeli imalat sonrası bir kısım numune ısıl işleme (T6), bir kısım numunede derin kriyojenik (-196 °C'de 24 saat) işleme tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, kalıntı gerilmelerin ısıl işlemle %76,5'e, derin kriyojenik işlemle %72,7'ye kadar azaltılabileceği belirtilmiştir. Sertlik değerinin ısıl işlemle önemli oranda azaldığı (66,4 HV), kriyojenik işlemle sertlik değerinin işlemsiz numunenin sertlik değerine yakın çıktığı vurgulanmıştır. Numunelerinin mekanik özellikleri akma dayanımı (YS) elastisite modülü, çekme dayanımı (UTS) ve süneklik açısından değerlendirmişlerdir. Farklı işlemler altındaki sonuçlarının sertlik analizi ile tutarlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte ısıl işlem sonrası numunelerin akma dayanımı 280,8 MPa'dan 159,9 MPa'a, çekme dayanımı 442 MPa'dan 219,5 MPa'a ve elastisite modülü 72,5 GPa'dan 60,1GPa'a düşerken süneklik değeri %7,5'ten %22,9'a önemli bir artış olduğunu aktarmışlardır. Kriyojenik işlem görmüş ve

işlemsiz numunenin mekanik özellikler açısından benzerlik göstermesinin benzer mikroyapı ile ilişkili olduğunu, ısıl işlem görmüş numunenin düşük mekanik özellikler sergilemesini ısıl işlem ile oluşan kaba mikroyapıdan kaynaklandığını söylemişlerdir [34].

Siyambaş ve Turgut, yaptıkları literatür araştırması çalışmasında, AlSi10Mg alaşımlı parçaların seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmesinde imalat parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda enerji yoğunluğunun ürün kalitesi üzerindeki etkisinin daha belirleyici bir faktör olduğunu, düşük gözeneklilik seviyesi için enerji yoğunluğu 50-75 J/mm^3 değer aralığında olduğunu, eklemeli imalat ile üretilen parçaların geleneksel üretim yöntemlerine göre mekanik özellikler açısından daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca düşük yüzey pürüzlülüğü için enerji yoğunluğunun 50-65 J/mm^3 aralığında olduğunu, ısıl işlem ile yüzey pürüzlülüğünün daha da azaltılabileceğini belirtmişlerdir [35].

Karabulut, Inconel 718 alaşımından farklı kalınlıkta üretilen çekme ve çentik darbe test parçaları üzerinde ilave işlemlerin etkisini araştırmıştır. İlave işlem olarak parçalar frezeleme ve sürüklemeli yüzey işlem operasyonlarına tabi tutulmuş ve bu ilave işlemlerden sonra parçalara çekme ve çentik darbe testi uygulanmıştır. Parçalara uygulanan ilave işlemlerle yüzey kısmındaki ergimemiş metal tozların temizlenerek daha iyi yüzey kalitesinin elde edildiği belirtilmiştir. Mekanik özelliklerin (sertlik, akma dayanımı, kopma dayanımı, tokluk) ilave işlemlerle önemli oranda arttığı vurgulanmıştır. Bu artış ilave işlemlerle yüzey kalitesindeki iyileşme ile ilişkilendirilmiştir [36].

Top, SLM yöntemi ile bir bakır alaşımı olan bronz (CuSn10) toz malzemesi kullanılarak üretilen parçaların mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerini araştırmıştır. Parçaların üretiminde farklı imalat parametreleri (tarama gücü, tarama hızı ve yönü, katman kalınlığı) kullanılmış ve imalat sonrası parçalar ısıl işlemlere tabi tutulmuştur. Parçalara metalografik çalışmalar için ilave işlemler (bakalite alma, parlatma ve dağlama) uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, imalat parametrelerinin parçanın mekanik ve mikroyapı özelliklerini doğrudan etkilediğini, en iyi mekanik özelliklerin çift tarama yönünde elde edildiğini, eklemeli imalatın mekanik özellikler açısından geleneksel üretim yöntemlerine göre daha iyi performans sergilediğini ve bu durumunda korozyon özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, eklemeli imalat ile üretilen parçaların mekanik

özelliklerinin daha iyi olmasını oluşan gözenek miktarının mikro boyutta olması ile ilişkilendirilmiştir [37].

Kayacan, imalat platform yerleşimi, sıcaklıklar ve parça geometrilerinin boyutsal değişime ve kalıntı gerilmelere etkisini araştırmıştır. Parça üretimi sabit imalat parametrelerinde Ti6Al4V toz malzemesi kullanılarak farklı geometrilerde yapılmıştır. Kalıntı gerilmelerde ve boyutsal değişimlerde en etkili parametreler ani kesit değişimleri, yüksek soğuma modülü ve parça yüksekliği olduğu belirtilmiştir. Parça boyutunun artması ve imalat platformundan uzaklaşılması, kalıntı gerilmelerin artmasında etkili olduğunu gözlemlemiştir. Daha düşük boyutlu parçalarda kalıntı gerilmelerin daha az olmasını imalat platformuna yakın olması ile büzülmenin daha az ortaya çıkması ile ilişkilendirmiştir. İmalat sırasında meydana gelen sıcaklık ve parça üzerindeki sıcaklık dağılımdan kaynaklı kalıntı gerilmelerin ortaya çıkması ve bu durumunda parçaların boyutsal değişimi üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, ilave soğutucular ile parçada ortaya çıkan sorunların %70 oranında azaltılabileceği aktarılmıştır [38].

Doh vd., eklemeli imalat sonrası farklı ilave işlemlere ve inşa yönelimlerine göre üretilmiş maraging çeliğinin mekanik özelliklerini çekme ve yorulma testleri ile araştırmışlardır. İmalat için katman kalınlığı 0,04 mm'ye ve diğer parametreler EOS™ firmasının önerilerine göre ayarlanmıştır. Maraging çeliğinin anizotropik özelliklerini gözlemlemek için numuneler x ve z yönlerinde basılmış ve numuneler ilave işlemsiz, ısıl işlemli, yüzey işlemli, ısıl işlem ve yüzey işlemli olmak üzere dört farklı koşulda hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda, ilave işlemsiz numuneye kıyasla, ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem ve yüzey işlemli numunenin çekme ve akma dayanımı önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, maraging çeliğinin çekme dayanımındaki artma inşa yöneliminden etkilenmediği ifade edilmiştir. Yorulma testi için tüm ilave işlemli numunelerin yorulma ömrü ilave işlemsiz numuneye kıyasla her yapı yönelimi için arttığı vurgulanmıştır. Bu gelişimi inşa yönelimi ve imalat sonrası işlemlerle maraging çeliğinin mikroyapısında meydana gelen değişimlere atfetmişlerdir [39].

Oliveira vd., toz yatak füzyon (PBF) tekniği ile H13 toz malzemesi kullanılarak üretilen eğilme parçaları üzerinde mekanik özellikleri araştırmışlardır. Parçalar, optimize edilmiş parametreler ve farklı enerji yoğunluklarında (200-400-600 J/mm^3) üretilmiş, XRD ve SEM ile analiz edilmiştir. Mikroyapıları, kusur oluşumları ve yoğunlaşmaları eğilme davranışları

ve kırılma mekanizmaları ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonucunda, sertlik değerinin 400 J/mm^3 enerji yoğunluğunda en yüksek değere ulaştığı belirtilmiştir. 600 J/mm^3 enerji yoğunluğunda üretilen parçaların düşük sertlik değeri gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bu durum alt tabakaya doğru yüksek bir ısı akışını ortaya çıkarmakta ve içsel temperlemeyi arttırdığı ifade edilmiştir. Bu etki işlem sırasında dislokasyonların varlığının yok edilmesini, aşırı doygun martenzitin tavlanmasını ve katmanların hızlı katılaşmasından kaynaklanan artık gerilmelerin giderilmesini destekleyen doğal bir ısıl işleme neden olmakta ve böylece numunenin sertliğinin azalmasına atfedilmiştir. 400 J/mm^3 ile üretilen numunede en yüksek yoğunluk ve eğilme gerilmesi değerinin elde edildiğini aktarmışlardır. Buna karşılık düşük ve yüksek enerji yoğunluklarında (200-600 J/mm^3) üretilen numunelerde kırılmadan önce deformasyon meydana geldiğini ve bu davranışı düşük ve yüksek enerji yoğunluklarında oluşan gözeneklilik ile açıklamışlardır [40].

Sanchez vd., Inconel 718 nikel toz alaşımının eklemeli imalatında inşa oryantasyonu, tarama stratejisi ve ısıl işlemin sürünme performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Test parçalarının üretimi üç farklı inşa oryantasyonu (0°-45°-90°), iki farklı tarama stratejisi (menderes ve şerit tarama) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve üretilen parçaların bir kısmı ısıl işleme tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, ısıl işlem, inşa oryantasyonu ve tarama stratejisi değişkenlerinin tümü sürünme performansını büyük ölçüde etkilediği belirtilmiştir. 90° menderes tarama stratejisi ile üretilen numunelerde ısıl işlem görmüş emsallerine kıyasla 5 kat daha düşük bir sürünme ömrü elde edildiği vurgulanmıştır. Isıl işlem ile elde edilen bu performansı, ısıl işlem sırasında ortaya çıkan ve sürünme sırasında dislokasyon hareketini engelleyen γ ve δ çökeltileri ile açıklamışlardır. Şerit tarama stratejisi ile üretilen numunelerin menderes tarama stratejisi ile üretilenlere kıyasla sürünme ömründe %58'lik bir artış meydana geldiği aktarılmıştır. Şerit tarama ile oluşan bu ömür artışını lazer örtüşme bölgelerinin sayısının fazlalığı ile ilişkilendirmişlerdir [41].

Mavi, CoCr alaşımın eklemeli imalatında imalat parametrelerinin parçaların boyutsal doğruluğu, yüzey kalitesi ve yoğunluğu üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı parametreleri ve bu parametrelerin etkileşimi olan enerji yoğunluğuna göre bir deney tasarımı yapılmıştır. Ayrıca optik mikroskop görüntüleri ile yüzey dokusu incelenerek parçaların kullanılabilirliği araştırılmış ve yüzey kalitesi ile ilişkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, tarama aralığının azalması ile kesit alanındaki sapma miktarının arttığı, enerji yoğunluğunun kesit alanındaki sapma miktarı ile güçlü ve

pozitif yönde bir etkisinin olduğu belirtilmiştir. Üst yüzeyde, tarama aralığı ve tarama hızının artması pürüzlülük değerlerinin (Ra, Rz) artmasına neden olurken, lazer gücünün artması pürüzlülük değerlerinin azalmasına neden olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca yüzey görüntülerinden elde edilen verilerin ölçülen pürüzlülük değerleri ile tutarlı olduğunu söylemiştir [42].

Dedeakayoğulları ve Kaçal, SLM yöntemi ile Ti6Al4V toz malzemesi kullanılarak delik unsurlu olarak üretilen prizmatik parçaların delinmesinde delik kalitesini araştırmışlardır. Delik delme deneylerinde kullanılan parçaların üretimi sabit imalat parametreleri (lazer gücü 230 W, tarama hızı 1500 mm/s, tarama aralığı 0,1 mm, katman kalınlığı 0,04 mm) ve bu parametrelerin etkileşimi olan sabit enerji yoğunluğunda (38,33 J/mm^3) gerçekleştirilmiştir. Delme deneylerinde 6 mm çapında 140° uç açılı TiAlN kaplamalı ve kaplamasız matkaplar ve dört farklı kesme hızı (25-50-75-100 m/dak) dört farklı ilerleme hızı (0,06-0,09-0,12-0,15 mm/dev) şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız takımlarda yüksek kesme kuvvetlerinin oluşması çaptan sapma, silindiriklikten sapma ve dairesellikten sapma değerlerini olumsuz yönde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Kaplamalı matkaplarda tam tersi sonuçların elde edildiği belirtilmiştir. Kaplamasız matkaplarda, 100 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerleme hızında silindiriklik ve dairesellik değerlerinde minimum sapmanın oluştuğu vurgulanmıştır. Kaplamalı matkaplarda 75 m/dak kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme hızında benzer sonuçların elde edildiği aktarılmıştır. Kaplamalı takımın çap sapması kaplamasız takıma göre %76 az daha olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaplamasız matkaplarda düşük kesme hızlarında kaplamalı matkaplarda ise yüksek kesme hızlarında daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Eklemeli imalat ile delik unsurlu olarak üretilen Ti6Al4V parçaların delme işlemine tabi tutulduğunda delik bütünlüğü ve yüzey pürüzlülüğü beklentilerini karşılayabileceğini aktarmışlardır [43].

Knoop ve Schoeppner, FDM (Eriyik Yığma Modelleme) yöntemi ile ABS-M30 (termoplastik) malzeme kullanarak oluşturdukları model üzerinde farklı çaplara (3-10-18-30-50-80 mm) sahip deliklerin ve silindirlerin geometrik doğruluğunu araştırmışlardır. FDM işleminde parça hizalamasına bağlı olarak farklı geometrik özellikler ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu nedenle imalat parametreleri sabit tutularak, test parçaları hem x hem de y eksenleri boyunca ve z yönünde dik olarak üretilmiştir. Çalışma sonucunda, çap değerlerinin artması ile üç eksende de üretilen numunelerde ölçülen boyutsal sapmaların arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca x ve y eksenlerinde üretilen silindirlerin daireselliğinde, z yönünde

üretilenlere kıyasla daha küçük sapmalar oluştuğu vurgulanmıştır. Oluşan bu sapmaların katman katman üretim süreciyle ve silindirlerin z yönünde üretilmesi için destek yapısının gerekli olması ile açıklanabileceğini belirtmişlerdir [44].

Tezel, geleneksel (döküm) ve eklemeli imalat gibi iki farklı yöntemle üretilen polyamid (PA6G) malzemelere delik delme işlemi ve ardından raybalama işlemi uygulayarak üretim yönteminin, raybalama payının, ilerleme hızının delik kalitesi ve boyut kalitesine etkisini araştırmıştır. Her iki imalat yöntemi ile üretilen polyamid parçalardaki deliklerin yüzey pürüzlülüğü, raybalama payından ve artan ilerleme hızından etkilendiği aktarılmıştır. Ayrıca eklemeli imalat yöntemi ile oluşturulan parçaların raybalama işleminden sonra istenilen delik kalitesine ulaştığı vurgulanmıştır [45].

Dsouza, ABS malzemesi kullanarak FFF (Eriyik Yığma Modelleme) yöntemi ile üretilen parçalar üzerinde imalat parametrelerinin geometrik doğruluk (düzlük, dairesellik, silindiriklik, kalınlık) üzerindeki etkisini incelemiştir. Parça üretimi için imalat parametreleri ekstruder sıcaklığı (220-240 ºC) ve dolgu oranı (%70-%100) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, dolgu oranının geometrik bütünlük üzerinde anlamlı bir etkisinin olduğu, ekstruder sıcaklığının ise büyük ölçüde önemsiz olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, iyi bir geometrik doğruluk elde etmek için gerekli dolgu oranının %70-80 arasında olduğu belirtilmiştir. Dolgu oranının artması ile geometrik doğruluğun azaldığı ve bu azalmayı parça içindeki malzeme miktarının artması ile parçanın bükülme eğiliminin artmasına atfetmiştir [46].

Singh ve Bharti, PLA malzemesinin FDM yöntemi ile üretilmesinde gri ilişkisel analiz (GRA) ve Taguchi metotlarını kullanarak çekme dayanımı, eğilme dayanımını ve aşınma direncini aynı anda etkileyen optimize edilmiş imalat parametrelerini bulmayı amaçlamışlardır. İmalat için kullanılan parametreler, ekstrüder sıcaklığı, dolgu yoğunluğu, tarama hızı ve katman kalınlığıdır. Bu parametrelerin her biri için dört farklı değer kullanılmış ve numune üretimi L_{16} ortogonal dizine göre yapılmıştır. Çalışma sonucunda, 220 ºC ekstrüder sıcaklığı, 0,3 mm katman kalınlığı, %90 dolgu yoğunluğu ve 50 mm/s tarama hızı parametreleri ile en yüksek gri ilişkisel derecenin elde edildiği aktarılmıştır. Anova analizine göre işlem üzerinde en etkili parametrenin tarama hızı ardından sırası ile ekstrüder sıcaklığı ve katman kalınlığı olduğu belirtilmiştir. Dolgu yoğunluğunun gri ilişkisel derece üzerinde etkisinin önemsiz olduğunu gözlemlemişlerdir. Doğrulama

deneyleri sonucunda, Taguchi analizinden elde edilen parametreler için elde edilen çekme ve eğilme dayanımı değerlerinin maksimum olduğunu, aşınma oranının ise önemli ölçüde daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır [47].

Ünal, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 18Ni300 maraging çeliğinin yüzey özelliklerine termokimyasal borlama işleminin etkisini araştırmıştır. Borlama işlemi farklı sıcaklıklarda (800-900-1000 ºC) ve farklı sürelerde (3-6-9 saat) gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemine tabi tutulan numuneler XRD, mikrosertlik ve SEM yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Borlama sıcaklığının ve süresinin artması ile gözeneklilik miktarının, çökelti miktarının ve büyüklüğünün arttığı, borür bölgesinde oluşan fazların yapısının düz yapıdan dişli yapıya dönüştüğü belirtilmiştir. Artan sıcaklık ile yapıdaki çatlak miktarının arttığı ve bu çatlakların büyüklüğünün zamanla arttığı vurgulanmıştır. Ayrıca, borlama sıcaklığının ve süresinin artması ile mikrosertlik değerinin arttığı aktarılmıştır [48].

Yapılan literatür araştırması sonucunda, eklemeli imalat ile üretilen nihai ürünlerin kalitesinin önemli ölçüde imalat parametrelerinden etkilendiği gözlenmiştir. Eklemeli imalat sürecinde kullanılan lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı, tarama deseni, inşa yönü, toz karakteristiği ve imalat ortamı gibi parametrelerin ürün kalitesinin belirlenmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bazı çalışmalarda, lazer parametrelerinin etkisinin bir arada değerlendirilmesi için enerji yoğunluğu değişkeninin kullanıldığı görülmüştür. Mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerine yapılan çalışmalarda, belirli bir lazer parametresinin etkisinden ziyade parametrelerin bir arada kullanıldığı enerji yoğunluğu değişkeninin kapsamlı olarak araştırıldığı tespit edilmiştir. Enerji yoğunluğu ile ilgili yapılan çalışmalarda, her bir alaşım için belirli bir enerji yoğunluğu değerinin olduğunu ve bu değerin alt ve üst değerlerinde ürün kalitesinin düştüğü görülmüştür. İdeal enerji yoğunluğunda üretilmeyen parçalarda kusurların oluştuğu ve mikroyapının olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. Düşük enerji yoğunluğunda, eriyik havuzunun yeterince ergimemesinden kaynaklı füzyon eksikliği gözenekliliğin oluştuğu ve yüksek enerji yoğunluğunda metalin kaynama sıcaklığına ulaşması ile buharlaşmasından kaynaklı anahtar deliği gözenekliliğinin oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca parçalara uygulanan ikincil işlemlerle (talaşlı imalat, ısıl işlem, yüzey parlatma) yüzey kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

AlSi10Mg alaşımı, özellikle havacılık, savunma ve otomotiv endüstrilerindeki yaygın kullanımları düşünüldüğünde bu alaşımın eklemeli imalatı üzerine çalışma yapmanın gereklilik olduğu anlaşılmaktadır. Bu neden ile çalışmada AlSi10Mg alaşımı seçilmiştir. SLM yöntemi, karmaşık geometrili yapıların üretimdeki başarısı ve AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüksek yoğunlukta üretilmesindeki yeteneği ile eklemeli imalatta tercih edilen bir yöntemdir. Bu kapsam ile çalışmada SLM yöntemi kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışmada literatüre ek olarak ilk etapta, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü açısından en ideal hacimsel enerji yoğunluğu belirlenmiştir. Bu amaçla, lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı gibi imalat parametreleri çekme dayanımı, akma dayanımı, mikro sertlik ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için aynı anda optimize edilmiştir. Bu kapsamda Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için optimum hacimsel enerji yoğunluğu değeri belirlendikten sonra bu enerji yoğunluğuna bağlı kalınarak, farklı lazer gücü/tarama hızı parametrelerinde prizmatik parçalar üretilerek bu parçaların geometrik doğrulukları araştırılmıştır. Ayrıca deneysel olarak elde edilen geometrik performans çıktılarının karşılaştırılması için bir bulanık mantık modeli oluşturulmuştur.

3. EKLEMELİ (KATMANLI) İMALAT

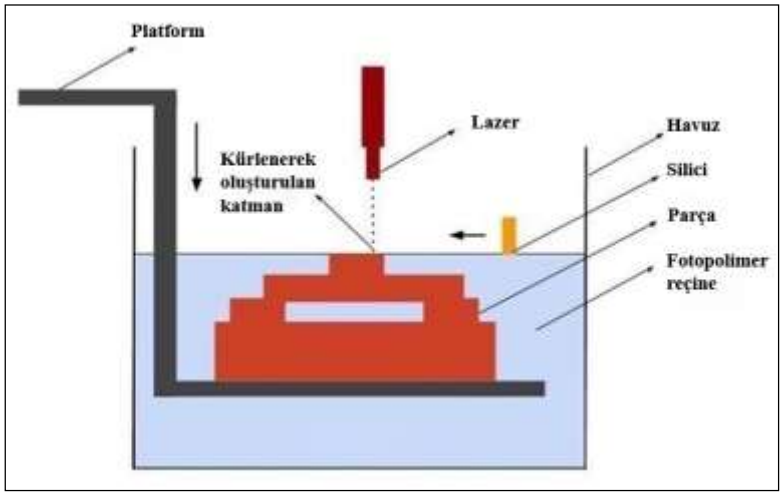
Günümüz imalat endüstrisinde hem küçük hem de büyük ölçekte ürünlerin imalatında daha verimli ve etkili yollara duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Son zamanlardaki teknolojik gelişmeler ile büyük bir ilerleme gösteren imalat yöntemlerinden biri de eklemeli imalat yöntemidir. ISO/ASTM 52900:2015 standardına göre eklemeli (katmanlı) imalat, talaşlı üretim ve biçimlendirerek şekillendirme yöntemlerinin aksine üç boyutlu (3B) model verilerinden parçalar üretmek için malzemeleri katman katman birleştirme işlemidir [49]. Bu işlem aynı zamanda hızlı prototipleme, hızlı üretim ve doğrudan dijital üretim olarak da bilinmektedir. ASTM 52900:2015 standardına göre başlıca eklemeli imalat yöntemleri yedi ana kategoriye ayrılmıştır. Bunlar;

- Fotopolimerizasyon
- Malzeme püskürtme
- Bağlayıcı püskürtme
- Malzeme ekstrüzyon
- Toz yatak füzyonu
- Sac/levha laminasyonu
- Doğrudan enerji biriktirmedir.

Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon teknolojisi, sıvı monomerlerin ışık vasıtası ile katılaşmasına dayanmaktadır. Fotopolimerizasyon veya stereolitografi (SLA), ışıkla sertleşebilen reçineyi kürlemek için ışık kullanan bir üç boyutlu baskı teknolojisidir (Şekil 3.1). Bu teknoloji ışığa maruz kaldığında polimerize olan malzemelerle sınırlıdır [50]. Fotopolimerler ve reçineler bu teknoloji kullanılarak işlenebilmektedir [51]. Fotopolimerizasyon yöntemi Şekil 3.1'de gösterildiği gibi lazer ışını üretilecek katmanın kesitine göre sıvı reçine yüzeyini tarar ve temas ettiği reçine katmanını katılaştırır. İlk katman yazdırıldıktan sonra platform katman kalınlığı kadar aşağı hareket eder ve sonraki katmanın kürleştirilme işlemi başlar. Bu, katman katman biriktirme işlemi, parça tamamen üretilene kadar devam eder. Sertleştirme kaynağındaki değişikliklere bağlı olarak fotopolimerizasyon süreçleri stereolitografi (SLA), dijital ışık işleme (DLP) ve hacimsel 3D baskı şekilde sınıflandırılmaktadır [52]. Yöntemde,

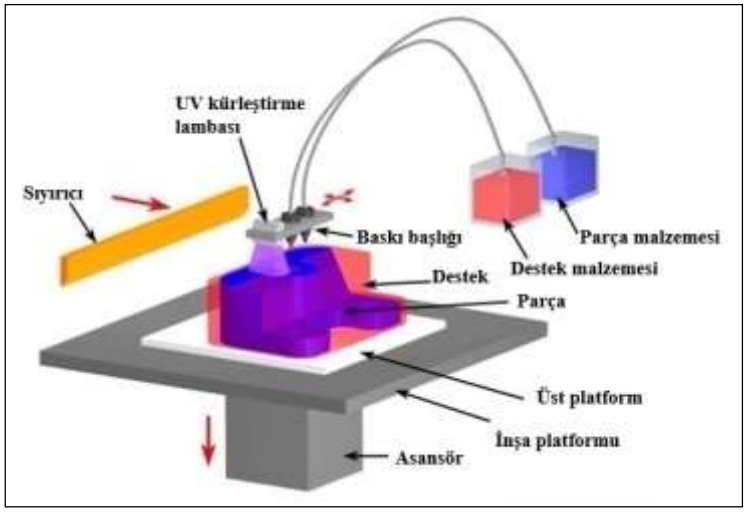
boyutsal doğruluk ve büyük hacimli parçaların üretimi gibi avantajlar elde edilirken, işlem sonrası kürleme, destek yapıları ve uzun işlem süresi gibi dezavantajlarla da karşılaşılmaktadır.



Şekil 3.1. Fotopolimerizasyon yöntemi [53]

Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme işleminde, standart mürekkep püskürtmeli yazıcı mantığı ile parçalar üretilmektedir. Malzeme püskürtme teknolojisi çok çeşitli renkleri ve malzemeleri bir araya getirerek sert ve yumuşak polimerik malzemelerin tek bir işlemde üretilmesine olanak tanımaktadır (Şekil 3.2).

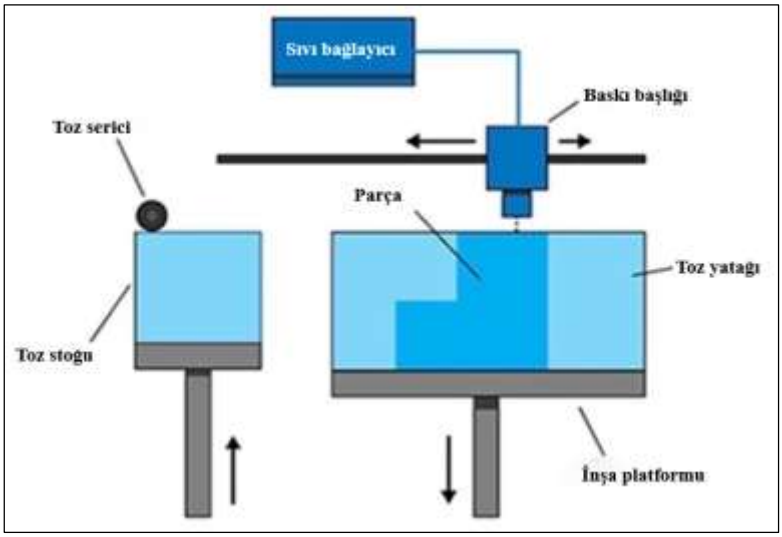


Şekil 3.2. Malzeme püskürtme yöntemi [54]

Yöntemde, malzeme modelin katman katman oluşturulduğu yapı yüzeyine veya platforma püskürtülür. Malzeme katmanları daha sonra ultraviyole (UV) ışık kullanılarak kürlenir veya sertleştirilir. Malzemenin platforma damlacıklar halinde bırakılması kullanılabilecek malzeme çeşitliliğini sınırlamaktadır. Polimerler ve mumlar yapışkan yapıları ve damla oluşturma yetenekleri nedeniyle uygun ve yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu yöntemde, damlacıkların yüksek doğrulukta biriktirilmesinden dolayı düşük malzeme sarfiyatı, tek bir işlem altında birden fazla malzeme renginin kullanılması gibi avantajlar ön plana çıkarken, destek malzemesinin gerekliliği, kullanılan malzeme çeşitliliğinin azlığı da dezavantajlar olarak ortaya çıkmaktadır [1].

Bağlayıcı püskürtme

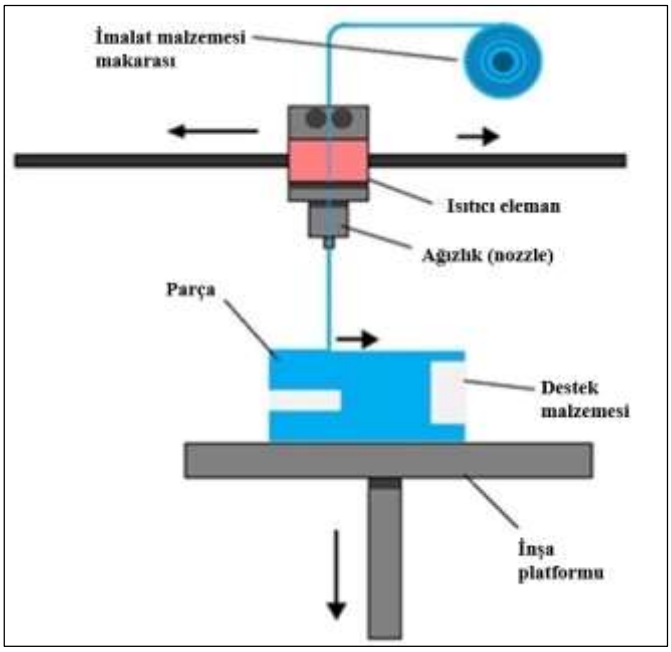
Bağlayıcı püskürtme, parçanın toz yatağı platformunda oluşturulduğu ve toz malzemenin silindir yardımıyla inşa platformu üzerine yayıldığı bir eklemeli imalat işlemidir [55]. Bağlayıcı püskürtme işleminde bir toz bazlı ve bir de bağlayıcı olmak üzere iki malzeme kullanılmaktadır. Bir baskı kafası makinenin x ve y eksenleri boyunca yatay olarak hareket eder ve inşa ve bağlama malzemesinin değişen katmanlarını biriktirir (Şekil 3.3). İlk katman tamamlandıktan sonra inşa platformu katman kalınlığına göre aşağı doğru hareket ettirilir ve silindir bir sonraki katman için inşa platformu oluşturmak üzere tozu yayar. Bu katman katman biriktirme işlemi parça üretilene kadar devam eder. Numune üretildikten sonra kuruması için beklemeye alınır. Karmaşık şekilli parçaların üretimine olanak tanıdığı için bilimsel ve endüstriyel alanlarda özel ilgi görmektedir.



Şekil 3.3. Bağlayıcı püskürtme yöntemi [56]

Malzeme ekstrüzyon

Eriyik biriktirme modellemesi (FDM) yaygın bir malzeme ekstrüzyon işlemidir. Malzeme bir ağızlıktan çekilip ısıtılır ve ardından katman katman biriktirilir. Ağızlık (nozzle) yatay olarak hareket edebilir ve her yeni katman yerleştirildikten sonra bir platform dikey olarak yukarı ve aşağı yönlü hareket etmektedir (Şekil 3.4). Bu yöntem birçok ucuz, yerli ve hobi amaçlı 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Malzeme ekstrüzyon prosesinde nihai ürün kalitesini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin başarılı bir şekilde kontrol edilmesi ile yöntem büyük potansiyele ve uygulanabilirliğe sahiptir. Malzeme ekstrüzyonun diğer tüm 3B baskı süreçlerine benzer olsa da malzemenin bir ağızlıktan sabit basınç altında ve sürekli bir akışla biriktirilmesi farklılık göstermektedir. Doğru sonuçların alınması için bu basıncın sabit ve sabit bir hızda tutulması gerekir [57]. Malzeme ekstrüzyon işleminin avantajları arasında nihai bir üretim modeline yakın, iyi yapısal özelliklere sahip modeller üretebilen ve kolayca temin edilebilen ABS plastiğinin kullanımı yer almaktadır.

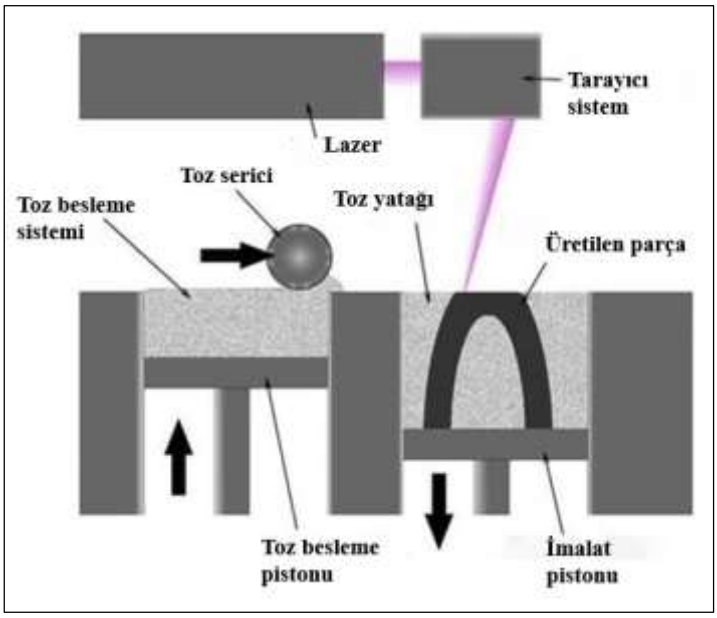


Şekil 3.4. Malzeme ekstrüzyon yöntemi [56]

Toz yatak füzyonu

Toz yatak füzy0onu (PBF), eklemeli imalatta en çok kullanılan tekniklerden biridir (Şekil 3.5). Toz yatağı füzyon işlemi plastik, cam, metaller ve alaşımları dahil olmak üzere farklı malzemelerin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca imalatta kullanılan tozun geri

dönüştürülebilir olması PBF sürecinin en iyi özelliklerinden biridir. PBF'de üç boyutlu ürünlerin üretilmesinde toz malzemeyi eritmek için bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. PBF tekniğinde kullanılan ısı kaynakları termal, elektron veya lazerdir [58]. Bu nedenle toz yatak füzyonu, doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), elektron ışını ergitme (EBM), seçici ısı sinterleme (SHS), seçici lazer ergitme (SLM) ve seçici lazer sinterleme (SLS) gibi alt bölümlere ayrılmıştır. Tüm PBF işlemleri toz malzemenin önceki katmanların üzerine yayılmasını gerektirir. Bunu sağlamak için bir silindir veya bir bıçak dahil olmak üzere farklı mekanizmalar kullanılmaktadır. PBF tekniğinin uygun adımlarını ve parametrelerini (lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı, örtüşme oranı vb.) doğru şekilde uygulandığında imal edilen bileşen son ürün olarak kullanılmaktadır. [58] Parçaların katman katman imalatı nedeniyle yüzey özelliği diğer imalat süreçlerine göre çok iyi değildir.

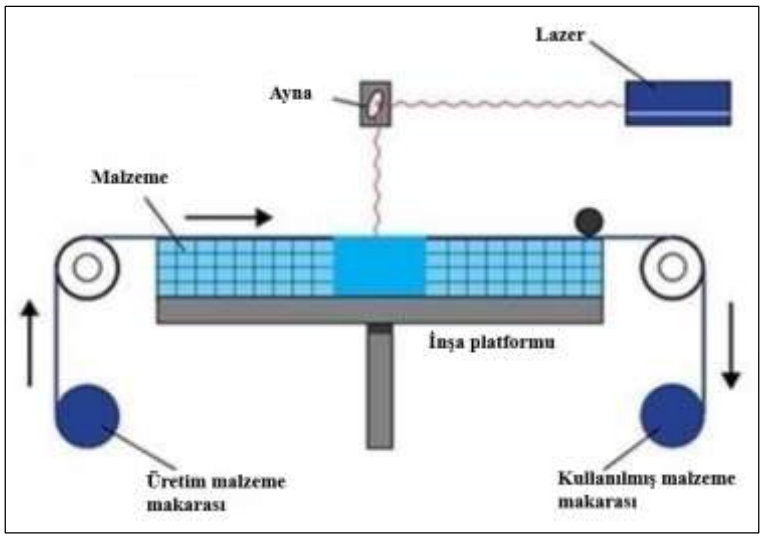


Şekil 3.5. Toz yatak füzyonu yöntemi [56]

Sac/levha laminasyonu

Sac/levha laminasyon işlemleri ultrasonik eklemeli imalat (UAM) ve lamine nesne imalatını (LOM) içermektedir [59]. Ultrasonik eklemeli imalat işlemi ultrasonik kaynak kullanılarak birbirine bağlanan metal levhalar veya şeritler kullanmaktadır (Şekil 3.6). Kaynak işlemi sırasında bağlanmamış metalin çıkarılması için ek işlemler gerekmektedir. Lamine nesne üretiminde (LOM), katman katman biriktirme yaklaşımı kullanır ancak kaynak yerine malzeme ve yapıştırıcı kullanır. Lamine objeler genellikle estetik ve görsel modeller için

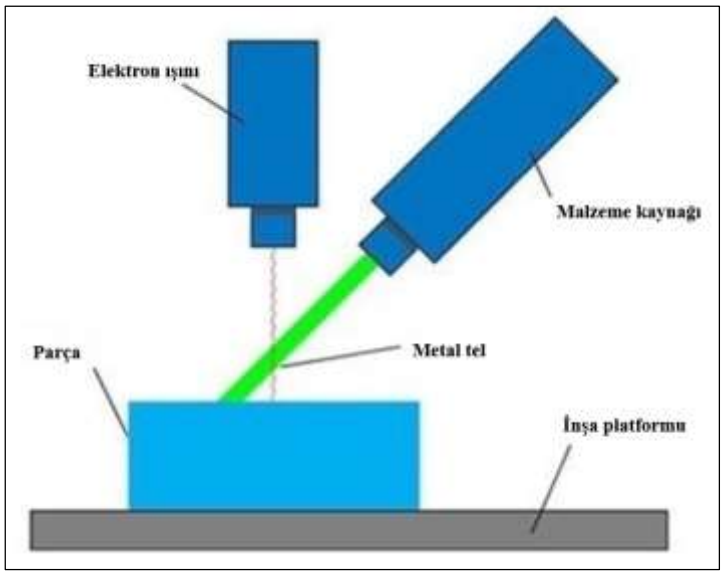
kullanılır ve yapısal kullanıma uygun değildirler. Ultrasonik eklemeli imalat yöntemi (UAM) düşük sıcaklıklarda alüminyum, bakır, paslanmaz çelik ve titanyum gibi metaller kullanılarak yapılmakta ve iç geometrilerin oluşturulmasına izin vermektedir. [60]. İşlemde farklı malzemeler bağlanabilir ve metal erimediği için nispeten daha az enerji gerekir.



Şekil 3.6. Sac/levha laminasyonu yöntemi [61]

Doğrudan enerji biriktirme

Doğrudan enerji biriktirme (DED) sürecinde genellikle hammadde olarak toz veya tel, enerji kaynağı olarak lazer/elektron ışını kullanılmaktadır (Şekil 3.7) [62].

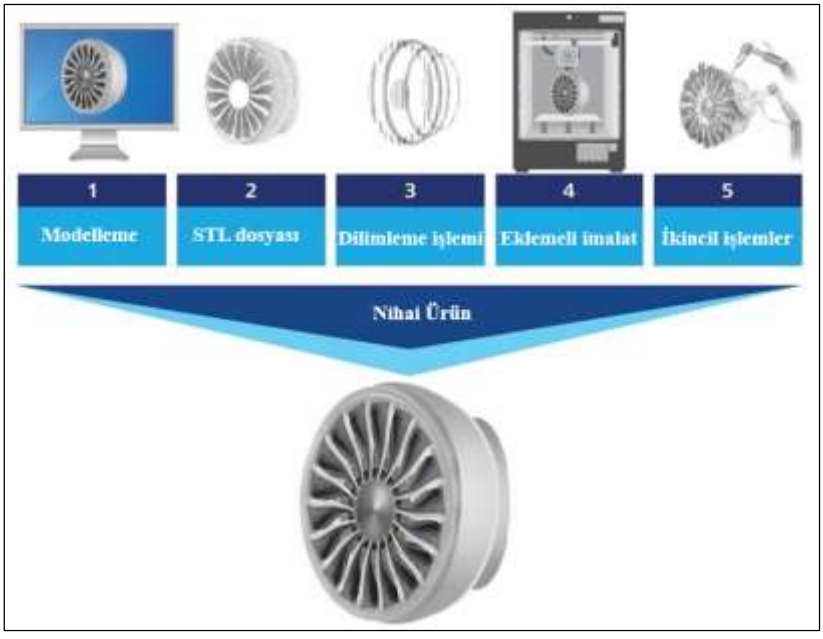


Şekil 3.7. Doğrudan enerji biriktirme yöntemi [63]

İşlem prensipte malzeme ekstrüzyonuna benzemekte ancak ağızlık birden fazla yönde hareket edebilme ve belirli bir eksene bağlı kalmama gibi özelliklerle farklılık göstermektedir. Isıtma kaynağı bir eriyik havuzu oluşturmak ve aynı anda malzemeyi eriyik havuzuna eritmek için bir alt tabakaya odaklanır. Belirtilen imalat yönündeki her DED geçişi katılaştırılmış bir malzeme katmanı oluşturur. İlk katmanın yazdırılmasından sonra DED kafası yukarı veya platform aşağı doğru bir katman kalınlığı kadar hareket etmektedir. Bu işlem imalat bitene kadar tekrarlanır. Yöntemin uygulamaları yapısal parçaların onarımını ve bakımını içermektedir.

3.1. Eklemeli İmalat Süreci

Üç boyutlu baskı süreci; modelleme, yazdırma ve sonlandırma işlemi olmak üzere üç ana adıma ayrılmıştır. Modelleme işlemi ile gerçekleştirilmek istenen ürün bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak çizilir. Tasarım aşaması parça boyutlarının, dokusunun, renginin ve diğer parametrelerin oluşturulduğu yerdir. Tasarımı tamamlanan çizim eklemeli imalat yazıcıları tarafından tanınan standart bir dosya formatı olan stereolitografik (STL dosyası) dosya formatında kaydedilir [64]. Yazdırma aşamasında ürün lazerle ergitme, elektron ışını eritme, seçici ısı sinterleme vb. eklemeli imalat yöntemleri ile üretilir. Parça basıldıktan sonra gerek duyulması halinde ikincil işlemler uygulanır ve nihai ürün elde edilir. Şekil 3.8'de eklemeli imalat sürecinin işlem sırası verilmiştir.



Şekil 3.8. Eklemeli imalat süreci [65]

Eklemeli imalatın katman katman oluşturma stratejisi birden fazla parçanın ayrı ayrı üretilerek montaj edilmesi ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Ayrıca, eklemeli imalat teknolojileri geleneksel yöntemlere kıyasla nihai bileşenler veya parçalar oluşturmak için birden fazla adıma ve çok sayıda özel üretim tezgahına olan ihtiyacı da azaltmıştır. Eklemeli imalat, geleneksel yöntemlerle üretilemeyen karmaşık parça geometrilerinin imalatını mümkün kılmıştır. Bu karmaşık geometriler, iç boşluklar, ince duvarlı kanatlar ve kafesler yapıları gibi özel geometrilerden oluşmakta ve bu bileşenlerin araç sistemlerinde kullanılması ile ağırlık azalmasından kaynaklı yakıt tüketimi verimli hale gelmektedir.

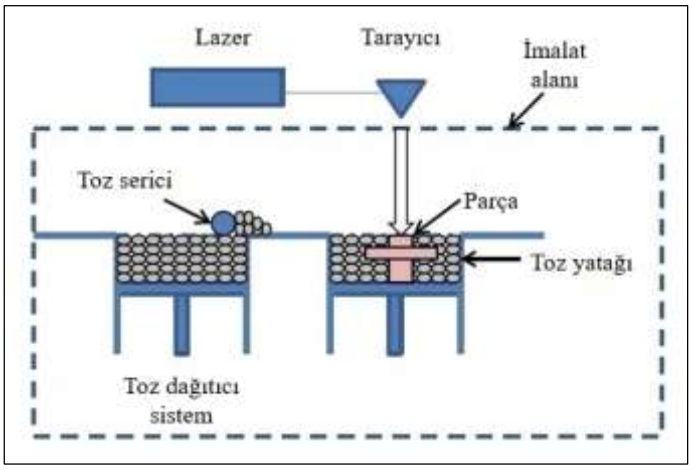
3.2. Metal Esaslı Eklemeli İmalat

Metal esaslı eklemeli imalat, bir enerji kaynağı ile metalik tozun veya telin katman katman eritilmesi yoluyla üç boyutlu (3B) nesnelerin imal edildiği modern bir üretim sürecidir. Toz yatak füzyonu (PBF), metal esaslı eklemeli imalatta en çok kullanılan tekniklerden biridir. Bu proseste toz yatağına serilen malzeme lazer veya elektron ışınından odaklanmış bir termal enerji ile seçici olarak eritilir veya sinterlenir [66]. Seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışını ile ergitme (EBM) en yaygın PBF yöntemleri arasındadır. PBF yöntemlerinde, bir toz dağıtma mekanizması ile metalik toz katmanlarının metal malzemelerden yapılmış olan bir inşa alanına yayılmasıyla bir toz yatağı oluşturulur [67, 68]. Isı kaynağı daha sonra ilk CAD verilerine göre tozu seçici olarak sinterler (kısmi eritme) veya eritir (tam eritme). Ayrıca PBF işleminde, metallerin oksidasyonunu veya diğer istenmeyen reaksiyonların önlenmesinde genellikle vakumlu ya da argon gibi inert gazlar içeren kapalı bir imalat ortamı kullanılmaktadır. [69, 70].

3.2.1. Seçici lazer ergitme (SLM)

Seçici lazer ergitme (SLM), toz yatak füzyon kategorisine giren eklemeli imalat yöntemlerinden biridir (Şekil 3.9). Bu toz yataklı füzyon işleminde metalik tozu seçici olarak eritmede yüksek yoğunluklu bir lazer ışını kullanılmaktadır. İmal edilecek parçalar genellikle aynı/benzer malzemelerden yapılmış bir alt plaka veya bir platform üzerinde üretilir. Üretim sonrası parçanın taban plakasından kolay sökülebilmesi için taban plakası ile üretilen parça arasına destek yapıları adı verilen içi boş yapılar tasarlanmaktadır [71]. SLM sürecinde parça üretiminde yer alan farklı adımlar bulunmaktadır. İlk adım, üretilecek parçaya tam olarak benzeyen bir 3B CAD modeli oluşturmayı içerir. Lazer sistemi parça

imalatı hakkında katman bazında bilgiye ihtiyaç duyduğundan CAD verileri katmanlara (2B katmanlara ayırma/dilimleme) bölünmektedir. Bu bölünmüş/dilimlenmiş veriler parçanın üretilmesi için kullanılır. SLM sürecindeki ikinci adım parçanın imalatını içermektedir. İnce bir toz tabakası taban plakasına veya özel olarak tasarlanmış bir yükleyici kurulumu ile önceden yayılmış toz tabakasının üzerine yayılır. Yükleyici daha sonra lazerin yolundan uzaklaştırılır ve lazer ışını etkinleştirilir. Lazer ışını toz yatağını üç boyutlu CAD verilerinin belirttiği şekilde seçici olarak eritir. Platform daha sonra diğer imalat parametrelerine ve işlenecek toz malzemeye göre tanımlanan katman kalınlığında aşağı yönlü indirilir. Bu işlem tüm parça üretilene kadar tekrarlanır. İşlemin tamamlanmasının ardından taban plakası üretilen parça ile birlikte imalat ortamından çıkarılır ve destek yapılarından ilave işlemlerle ayrılır.



Şekil 3.9. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi [72]

SLM yöntemi herhangi bir kalıp veya kesici takım kullanmadan parçaları üretme yeteneğine sahiptir. Yöntemin bu avantajı, tasarım ve üretim döngüsü içerisinde geçen süresinin azalması ile maliyetler açısından tasarruf sağlamaktadır. [73]. Ayrıca, SLM işlemi tozun elenmesine ve yeniden kullanımına imkân sunduğundan metal/alaşım tozları tekrar tekrar kullanılmaktadır. Geri dönüşüm kabiliyeti minimum malzeme sarfiyatına yol açtığından çevre dostu bir yöntem olarak kabul edilmektedir. [74, 75]. SLM yöntemi çeşitli toz malzemeleri (metaller, alaşımlar, sermetler, kompozitler) herhangi bir işlem gerektirmeden üretme kabiliyeti nedeniyle imalat, otomobil, havacılık, ilaç, elektronik ve spor sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır [76, 77]. SLM yöntemi geleceğin teknolojisi olarak görülse de yüzey kalitesi, üretim süresi, kusurlar gibi dezavantajlarla hala karşılaşılmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için üretilen parçalara parlatma cilalama, ısıl işlemler,

yüzey taşlama gibi imalat sonrası ilave işlemler uygulanmaktadır [78]. Bu ilave işlemlerle, zaman ve maddi açıdan kayıplar meydana gelmektedir. Ayrıca, SLM metodu ileri bir mühendislik uygulaması olduğu için kullanılan makine ve toz malzeme maliyetleri oldukça yüksektir.

3.2.2. İmalat parametreleri

SLM yönteminde ideal eriyik havuzu metal tozların uygun imalat parametrelerinin kullanımı ile oluşmaktadır. Uygun olmayan imalat parametrelerinin kullanımı sonucunda üretilen parçalarda düşük yüzey kalitesi, yüksek boyutsal sapmalar ve mekanik özellikleri olumsuz etkiyen kusur mekanizmaları meydana gelmektedir. Bu sorunlar nihai ürünün kalitesini ve kullanım ömrünü olumsuz etkilemektedir. Metal esaslı eklemeli imalatta giriş parametrelerinin son (nihai) ürün üzerinde güçlü bir etkisi vardır (Şekil 3.10). Bu giriş parametreleri tarama hızı, lazer gücü, katman kalınlığı, tarama aralığı, tarama deseni, inşa yönü, toz karakteristiği gibi değişkenler olarak kullanılırken çıkış parametreleri; mekanik özellikler, geometrik doğruluk, bağıl yoğunluk, metalürjik yapı ve yüzey pürüzlülüğü olarak belirtilmektedir [32].

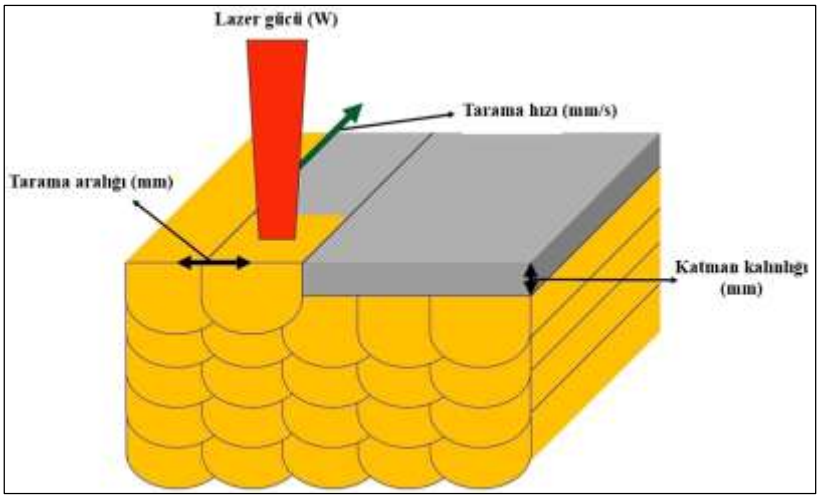


Şekil 3.10. SLM yönteminde kullanılan imalat parametreleri [71]

Enerji yoğunluğu (E)

Eriyik havuzunun boyutu ve şekli enerji kaynağı tarafından sağlanan ve toz yatağı tarafından emilen toplam enerji miktarı tarafından belirlenir [79]. Bu da toz yatak füzyon yöntemlerinde birbirine bağlı ve etkileşimli proses parametrelerine bağlıdır [9]. SLM

yönteminde amaç tamamen yoğun bir malzeme üretmektir. Bu amaca ulaşmak için malzemenin tam erimesini ve katmanlar arasındaki örtüşmeyi sağlayan yeterli bir enerji girişi gereklidir. Bu gereksinimleri karşılayan faktör enerji yoğunluğudur (Şekil 3.11). Enerji yoğunluğu, ergitme aşamasında birim hacimdeki toz malzemeye uygulanan enerji miktarı olarak tanımlanır ve Eş. 3.1 ile ifade edilir.



Şekil 3.11. Enerji yoğunluğu parametrelerinin şekil üzerinde gösterilmesi [80]

$$E = \frac{P}{v * h * t} \tag{3.1}$$

Eş. 3.1'de; E enerji yoğunluğunu (J/mm^3), P lazer gücünü (W), v tarama hızını (mm/s), h tarama aralığını (mm) ve t katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir. Eşitliğe göre lazer gücü artarsa veya tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı azalırsa işlemin enerji yoğunluğu artar. SLM sürecinde optimum bir enerji yoğunluğu değeri bulunmakta ve bu değer kullanılan toz alaşımına ve imalat tezgahına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [11].

Lazer gücü (W)

Lazer ile üretilen ve toz malzemeye uygulanan lazer gücü, üretilen parçanın mekanik ve boyutsal özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Lazer gücü enerji yoğunluğu üzerinde en etkili parametredir [81]. Malzemeye sağlanan enerjinin kapsamı SLM'deki lazer gücü tarafından kontrol edilir [19]. Al alaşımları yüksek oranda yansıtıcı malzemedir ve bu tür

malzemeler için tam erime için daha yüksek lazer gücü gerekmektedir. Eriyik havuzunda malzemenin eksik ergitilmesi ergitme verimini etkiler ve nihai üründe kusurların oluşmasına neden olur. Lazer gücü, ürünün yapısal bütünlüğüne katkıda bulunan tarama yolunun boyutunu ve kararlılığını da etkiler. Eş. 3.1'de enerji yoğunluğunun lazer gücüyle doğru orantılı olduğunu görülmektedir. Lazer gücünün artması ergitme havuzda daha fazla toz malzemenin erimesine ve yoğunluğun artmasına neden olur [82]. Lazer gücünün belirli bir değeri aşması ile ergitme havuzda malzeme buharlaşması meydana gelmekte ve beraberinde düşük yoğunluk oluşmaktadır [81].

Tarama hızı (mm/s)

Tarama hızı birim zamanda toz malzeme üzerine uygulanan enerji miktarını belirlemektedir. Tarama hızı Eş. 3.1'de gösterildiği gibi enerji yoğunluğu ile ters orantılıdır. Çok düşük bir tarama hızı aşırı enerji yoğunluğuna yol açabilir ve SLM sürecinde ergitme havuzda malzeme buharlaşmasına ve sıçramasına neden olabilir. Bu durum da yüksek gözenek oranıyla sonuçlanmaktadır. Çok yüksek bir tarama hızı toz malzemenin tamamen erimesi için yetersiz enerji yoğunluğuna ve füzyon eksikliği kusurlarına neden olmaktadır. Tarama hızının düşük ve yüksek değerlerinde oluşan kusurlar nihai ürünün kalitesi etkilemektedir.

Tarama aralığı (mm)

Tarama aralığı, inşa edilmiş parçanın komşu katmanları arasındaki mesafedir. Tarama aralığının enerji yoğunluğu üzerinde tarama hızına benzer bir etkisi vardır. Daha büyük tarama aralığında üretilen parçaların yoğunluğu maksimum değere kadar artar ve sonra azalır. Bu azalma malzemeler için ideal olan enerji yoğunluğu değerinin aşılması ile oluşan kusurlar ile açıklanmaktadır. Tarama aralığının toz yatak füzyonu (PBF) ile üretilen parçaların yoğunluğu üzerindeki etkisi örtüşme oranı ile açıklanabilir. Örtüşme oranı iki bitişik tarama izi arasındaki örtüşen bölgeyi gösterir [83]. Tarama aralığı azaldıkça örtüşme oranı artmaktadır. Küçük bir tarama aralığı kullanıldığında toz yatak füzyonunda yüksek bir örtüşme oranı ve bitişik tarama izleri arasında karşılık gelen büyük bir örtüşme bölgesi oluşur. Küçük bir tarama aralığı Eş.3.1'e göre büyük bir lazer enerji yoğunluğuna sebep olur. Bu enerji yoğunluğu artışı üst üste binen bölgede yüksek bir ısı girdisi üretilmesine ve beraberinde malzeme buharlaşmasına ve sıçramalara neden olarak düşük yoğunluklu parçaların üretilmesine neden olur [81, 83]. Büyük bir tarama aralığı kullanıldığında hem

düşük örtüşme oranı hem de düşük enerji yoğunluğu elde edilir. Yetersiz enerji yoğunluğu üst üste binen bölgedeki toz parçacıklarını tamamen erimemesine neden olur. Bu durum da füzyon eksikliği kusurlarına ve düşük bağıl yoğunluğa sebep olur [81, 83].

Katman kalınlığı (mm)

Katman kalınlığı, üretim sırasında imalat platformu üzerine serilen toz malzeme kalınlığını ifade etmektedir. Metal toz boyutu SLM'deki katman kalınlığını etkilemektedir. Toz boyutunun dağılımı ile ilgili olarak küçük parçacıkların küçük boşlukları doldurması sonucunda paketleme yoğunluğu ve toz uyumluluğu üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Küçük ve dar parçacık boyutu dağılımı eriyik havuzunda homojenliğe yol açarak daha yüksek parça yoğunluğuna neden olur [84]. Katman kalınlığı toz yatak sistemlerde metal esaslı malzemelerde 100 µm altındaki değerlerde iken, polimerlerde 50-150 µm arasındadır [23]. Yüksek katman kalınlıklarında üretilen parçalarda katmanlar arası birleşmelerde boşluklar oluşmakta ve bu kusur parçanın mekanik özelliklerini olumsuz etkilenmektedir.

3.2.3. Metal esaslı toz çeşitleri

Metal esaslı eklemeli imalat yöntemlerindeki teknolojik gelişmelerle kullanılan metal toz malzeme çeşitliliği de artmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinde paslanmaz çelikler, alüminyum, nikel, kobalt-krom ve titanyum alaşımları olmak üzere 29 farklı metal toz malzemesi bulunmaktadır [85]. Toz yataklı füzyon yöntemlerinde metal toz özelliklerinin önemi giderek artmaktadır. Tozun nasıl aktığı ve paketlendiğinin toz yatağı oluşumu üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Toz özelliklerindeki değişiklikler düzgün olmayan katmanlaşmaya, artan kusurlara, istenmeyen mekanik özelliklere ve düşük yüzey kalitesine neden olmaktadır [85]. Eklemeli imalat işlemlerinde güvenilir bir performans sergileyecek toz özellikleri belirleyebilmek, ürün kalitesi açısından önemlidir. Çizelge 3.1'de yaygın olarak kullanılan toz malzeme çeşitleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Toz malzeme çeşitlerinin sınıflandırılması [86]

Sınıflandırma	Toz malzeme
Titanyum alaşımları	Titanyum Grade 2/Ti6Al4V/Ti6Al4V ELI/TiAl6Nb7
Alüminyum alaşımları	AlSi10Mg/AlSi7Mg/AlSi12
Nikel alaşımları	Inconel 718-625-713-738/Hastelloy X
Paslanmaz çelikler	SS 304-316L-410/15-5 PH/17-4 PH
Kobalt alaşımları	ASTM F75/CoCrWC
Takım çelikleri	AISI 420/Marage 300/AISI D2-A2-S7
Bakır alaşımları	CC 480 K
Değerli metaller	Altın alaşımları/Gümüş alaşımları

3.2.4. Eklemeli imalatta ikincil işlemler

Eklemeli imalat yöntemi katman katman biriktirme ve merdiven etkisi nedeni ile geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla yüzey kalitesi açısından daha düşüktür. Düşük yüzey kalitesi eklemeli imalat prosesinde çözülmesi gereken önemli bir sorundur [87, 88]. Farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen ürünlerde farklı yüzey pürüzlülüğü oluşmaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların ilave işlemsiz istenilen yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özelliklerin elde edilmesi zaman almaktadır [89, 90]. Genellikle, eklemeli imalat yöntemlerinin yetersiz anlaşılması, oluşan sorunların en temel nedenidir. Örneğin, seçici lazer eritme (SLM) yönteminde, toz yatağı ile erimiş havuz ve toz ile lazer ışını arasındaki etkileşim mekanizmalarının yanı sıra karmaşık metalurjik ve termofiziksel işlemler nedeniyle ergitme süreçlerinin anlaşılması zordur [91]. İmalat işlemleri sırasında gözeneklilik, çatlaklar, istenmeyen toz dağılımı gibi iç kusurlar ve katmanlar arasında termal gerilmeler oluşacaktır. Bu kusurların nihai parçaların mikro yapısı ve mekaniği üzerinde ciddi etkileri vardır [92-94]. Bu nedenle üretilen parçalara, üretim sonrası mekanik özellikleri ve yüzey kalitesini iyileştirmek ve amaçlanan kullanımlarını sağlamak için genellikle ilave işlemler gerekmektedir [95-97].

Eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçalar için termal son işlemler kalıntı gerilmeleri ve çatlamayı azaltmakta ve mikro yapıyı homojenleştirmektedir [98, 99]. Örneğin, AlSi10Mg alaşımlı parçalar için çözelti ısıl işlemi (SHT), sıcak izostatik presleme (HIP) ve T6 ısıl işlem (HT) gibi termal son işlemler, parça kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir. HIP, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı üretim teknolojisini birleştiren termomekanik bir

yöntemdir [91]. Üretilen parçalar yüksek sıcaklık ve basınçla her yöne eşit olarak preslenir. Bu nedenle, üretilen parçalar yüksek yoğunluğa ve mükemmel performansa sahiptir. HIP, toz yataklı füzyon (PBF) sistemleri tarafından üretilen parçalardaki doğal kusurları ve gözenekleri iyileştirebilmekte veya ortadan kaldırabilmektedir [100].

Lazer parlatma/cilalama, eklemeli imalat metodu ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için kullanılan bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Lazer cilalama sırasında enerji kaynağı malzeme yüzeyine ışın verdiğinde yüzey morfoloji hızla erime sıcaklığına ulaşmaktadır. Sıvı malzeme yerçekimi ve yüzey geriliminin etkisiyle erimiş havuz oluşumundan sonra aynı seviyede yeniden dağılır [91]. Lazer ışını yüzeyi taramayı bıraktığında ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) sıcaklığı hızla düşer ve erimiş havuzun katılaşmasına neden olur ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü azalır [101-103]. Lazer cilalama, yığın (katman katman biriktirme) özelliklerini değiştirmeden veya etkilemeden yüzey morfolojisini değiştiren bir işlemdir [104].

Talaşlı imalat yöntemleri, çeşitli endüstrilerde fonksiyonel parçaların yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılan geleneksel üretim teknikleridir. Talaşlı imalat, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların iyi işlenebilirlikleri nedeniyle son işlem olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [91]. Yapılan bir çalışmada, doğrudan enerji biriktirme (DED) yöntemi ile üretilen ASTM A131 çelik parçalarının sonradan işlenmesinde (frezelenmesi) CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. Frezeleme işleminden sonra iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü 22,78 μm'den 0,6 μm'ye düşmüş ve yüksek kesme hızında daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiştir [105].

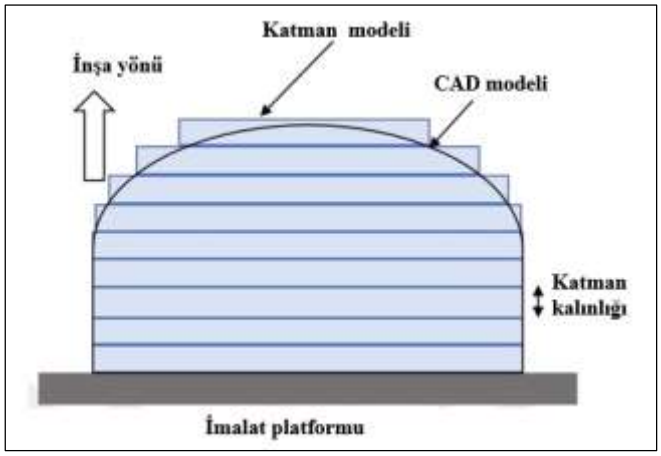
3.2.5. Eklemeli imalatta oluşan kusurlar

Eklemeli imalat sırasında malzemede kusurlar oluşabilmektedir. Bu tür kusurların nedenini bilmek ve bunlara karşı etkili önlemler almak nihai ürünün kalitesi açısından önemlidir. Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı ve soy gaz türü gibi eklemeli imalat sürecini etkileyen birçok değişken vardır. Eklemeli imalatta, yüzey kusurları ve iç kusurlar olmak üzere iki ana kusur türü bulunmaktadır [106]. Yüzey kusurları, uygun olmayan imalat parametrelerinin seçiminden kaynaklanan yüzey pürüzlülüğü ve merdiven etkisini içermektedir [107]. İç kusurlar ise uygun olmayan imalat parametrelerinin kullanımı ile

ortaya çıkan gözeneklilik ve çatlaklardır. Eklemeli imalat sürecinde ortaya çıkan en yaygın kusurlar aşağıda verilmiştir.

Merdiven etkisi

Topografik bir kusur olarak da sınıflandırılabilen merdiven etkisi eklemeli imalat süreçlerine özgüdür [108]. İnşa yönüne göre eğimli hem yukarı hem de aşağı bakan yüzeylerde meydana gelen olguya merdiven etkisi denir (Şekil 3.12). Doğal olarak üst yüzeyler gibi inşa platformuna paralel yüzeyler bu durumdan etkilenmez. Bu kusur özellikle inşa platformuna göre 45°'den daha az bir açıyla aşağıya bakan yüzeyler için pürüzlülüğü arttırır. Toz yatak füzyon yöntemleri ile üretilen parçaların yüzey topolojisi imalat sırasındaki yerleşim durumuna (oryantasyon) önemli ölçüde bağlıdır.

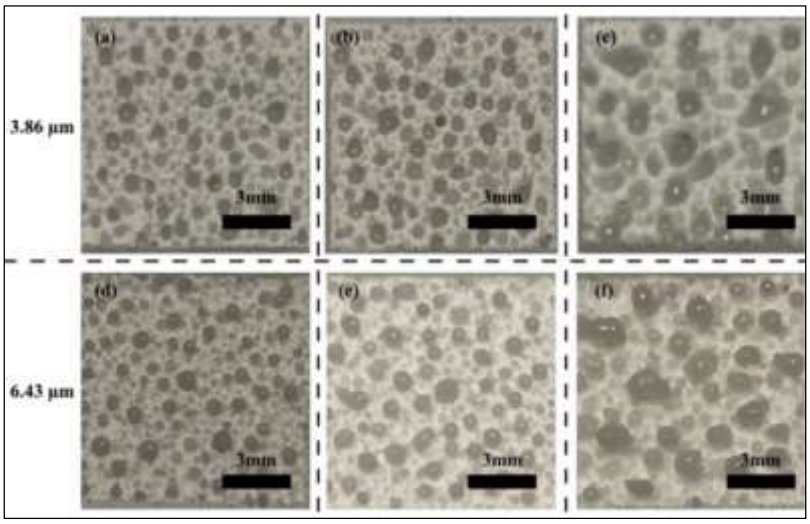


Şekil 3.12. Eklemeli imalatta merdiven etkisi [21]

Toplanma kusuru

Eklemeli imalat işlemlerinde sıvı metal alt tabaka ile temasın zayıf olduğu durumlarda yüzey gerilimi nedeniyle küresel bir geometriye büzülmektedir. Bu küre oluşumu toplanma olarak adlandırılır [109]. Al alaşımlarının yüzeylerinde zayıf temastan kaynaklı toplanma oluşumu düşük parça kalitesine yol açan pürüzlü yüzeylerle sonuçlanmaktadır [110]. Yüksek mukavemetli Al alaşımlarının eklemeli imalatında oluşan toplanma kusuru ergitme ve sinterleme işlemleriyle ilişkilidir. Damlacık sıçraması ve düşük ıslanabilirlik seviyesi yüksek mukavemetli Al alaşımlarının eklemeli imalatında toplanma kusuruna neden

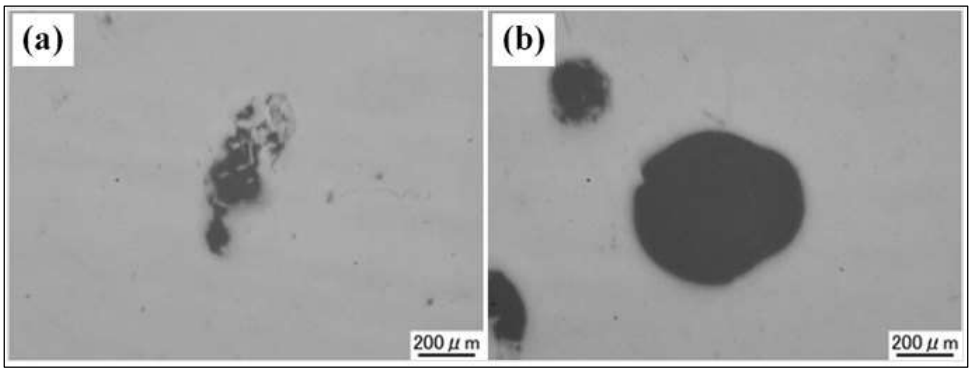
olmaktadır [110]. Alt eriyik havuzunda yeterli erime seviyesine ulaşıldığında toplanma azalma eğilimi gösterir [111]. Şekil 3.13'te toplanma kusurları verilmiştir.



Şekil 3.13. Farklı imalat parametrelerinde üretilen parçalarda oluşan toplanma kusurları [112]

Gözeneklilik

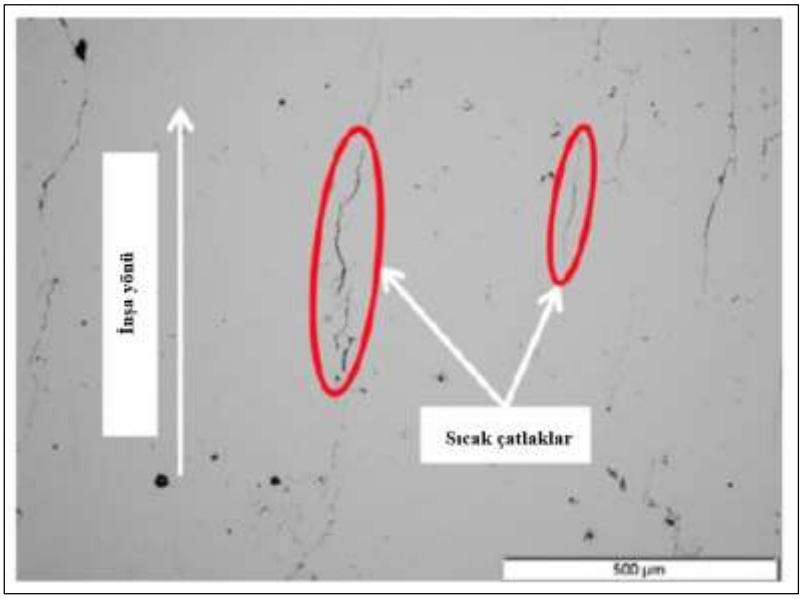
Gözeneklilik üretilmiş parçaların mekanik özellikleriyle bağlantılı en önemli kusurlardan biridir. Bu kusur füzyon eksikliği (katmanlar arası) ve anahtar deliği (katman içi) gözenekliliği olmak üzere iki şekilde oluşmaktadır. Füzyon eksikliği gözenekliliği imalat malzemesini (toz, tel) ergitmek için yeterli enerji girişinin olmaması nedeniyle oluşmakta ve erimemiş bölgelere yol açmaktadır. Füzyon eksikliği gözenekliliği genellikle büyük ve düzensiz şekillidir ve daha yüksek katılaşma soğutma hızları nedeniyle oluşur [113]. Anahtar deliği gözenekliliği yüksek enerji girişinin metalin kolayca buharlaşmasına neden olması ile gaz kabarcıklarının parça yüzeyinin altında sıkışması ile oluşmaktadır. Bu kusur imalat sırasında gaz tutulmasını teşvik eden inert koruyucu gaz kullanımıyla bağlantılıdır [114, 115]. Füzyon eksikliği ve anahtar deliği gözenekliği Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Gözeneklilik ayrıca imalatta kullanılan toz özelliklerine ve homojenline de bağlıdır [116]. Kullanılan tozlarının düzgün bir boyut dağılımı yoksa nihai parçada daha fazla gözenekliliğe yol açacaktır. Minimum gözeneklilik için tozların şekil/boyut aralığının ve imalat sırasında optimum imalat parametrelerinin kullanılması önemlidir. Gözeneklilik hem nitel hem de nicel olarak ölçülebilir. Arşimet prensibi, X-ışını bilgisayarlı tomografi ve optik mikroskop yaygın olarak kullanılan ölçüm teknikler arasındadır.



Şekil 3.14. Parçada oluşan gözeneklilikler (a) füzyon eksikliği (b) anahtar deliği [17]

Çatlaklar

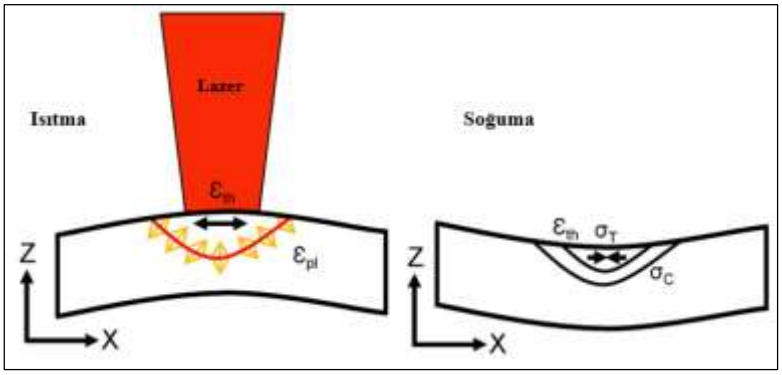
Gerilme ve diğer kırılganlık faktörlerinin ortak etkisi altında malzemenin atomik bağı yok olmaktadır. Yeni bir arayüz oluşturulduğunda oluşan boşluklara çatlak denir (Şekil 3.15). Metal parçaların işlenmesi ve kullanımı sırasında sıcak çatlaklar, soğuk çatlaklar, yeniden ısıtma çatlakları ve lamel yırtılması gibi çeşitli çatlaklar ortaya çıkmaktadır [117]. Sıcak ve soğuk çatlaklar eklemeli imalat işlemi sırasında meydana gelebilecek yaygın kusurlardır. Sıcak çatlak oluşumuna erimiş havuzun tamamen katılaşmadan önce metallerin farklı soğuma büzülme oranları neden olmaktadır. Sıcak çatlakların şekli düzensizdir ve yaygın sıcak çatlaklar arasında katılaşma çatlakları ve sıvılaşma çatlakları bulunur [118]. Sıcak çatlakların oluşumunda alaşım elementleri ve imalat parametreleri ana faktörlerdir [119].



Şekil 3.15. İnşa yönü boyunca SLM ile üretilen AA-7075'te oluşan sıcak çatlaklar [120]

Kalıntı gerilmeler

Toz yatak füzyon (PBF) tekniklerinde hızlı soğutma oranları martensitik dönüşümün gerçekleşmesine izin vermesi ile düşük süneklikte parçalar elde edilmektedir [80]. Bu hızlı soğutma aynı zamanda kırılgan martensit ile birleştiğinde üretilmiş parçanın çatlamasına ve delaminasyonuna yol açabilen artık gerilmelerin oluşmasına da neden olmaktadır [121, 122]. İmalat parametreleri bu sorunu çözmek için optimize edilebilir. Yapılan çalışmalar, enerji yoğunluğunun azalması ile artık gerilmelerin büyüklüğünün azaldığını belirtse de [123, 124], en yaygın azaltma stratejisi inşa platformu ön ısıtmasının kullanılmasıdır ve bu ön ısıtma ilave işlemsiz numunelerde çatlama kusurlarını önlemeye yardımcı olmaktadır [125, 126]. Toz yatak füzyon sistemlerinde artık gerilmelerin oluşumu iki mekanizma kullanılarak tanımlanmaktadır. Birincisi, işlenen tabakanın hemen altında bulunan katılaşmış tabakalar içinde artık gerilmelerin oluşumunu sağlayan sıcaklık gradyan mekanizmasıdır (Şekil 3.16) [127]. Sıcaklık gradyan mekanizması levhaların düz çizgiler boyunca lazerle bükülmesinde yaygındır. Lazer ışını tarafından üst yüzeyin hızlı ısınması ve oldukça yavaş ısı iletimi nedeniyle dik bir sıcaklık gradyanı oluşur [80]. Bu sıcaklık artışı nedeniyle malzeme mukavemeti aynı anda azalır. Isıtılmış üst tabakanın genleşmesi alttaki malzeme tarafından sınırlandırıldığından elastik sıkıştırma gerilmeleri oluşur [127]. Malzemenin akma dayanımına ulaşıldığında üst tabaka plastik olarak sıkıştırılır. Mekanik kısıtlamaların yokluğunda lazer ışınından uzağa doğru bir bükülme oluşacaktır. Soğutma sırasında plastik olarak sıkıştırılmış üst tabakalar küçülmeye başlar ve lazer ışınına doğru bir bükülme açısı gelişir [127]. Artık gerilmeleri oluşturan ikinci mekanizma erimiş üst tabakaların soğuma aşamasıdır. Ayrıca eriyik havuzunda meydana gelen hacim büzülmesidir. Bu deformasyon yine alttaki malzeme tarafından engellenir ve böylece eklenen üst katmanda çekme gerilimi ve altta basınç gerilimi oluşur.



Şekil 3.16. Sıcaklık gradyan mekanizması [127]

3.2.6. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların mekanik ve yüzey özellikleri

Toz yatak füzyon (PBF) yöntemleri, metal esaslı eklemeli imalat çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İmal edilen ürünlerde istenen özellikleri elde etmek için optimum imalat parametreleri son derece önemlidir. Toz özellikleri, lazer tipi, imalat ortamı vb. gibi birçok imalat parametresi söz konusudur ve giriş parametreleri PBF yöntemlerini oldukça karmaşık hale getirmektedir [128]. Bu nedenle istenilen ürün özelliklerinin elde edilmesinde imalat parametrelerinin optimize edilmesi gerekliliği vardır. Çekme dayanımı üretilen parçanın kalitesini değerlendirmede dikkate alınan önemli bir faktördür. Eklemeli imalatta aynı anda birçok parametre söz konusudur. Bu nedenle her bir parametrenin çekme dayanımı üzerindeki etkisini gözlemlemek esastır. Toz boyutu mekanik özellikler üzerinde önemli bir parametredir. Küçük toz parçacıklarının kullanımı en az gözenekli ve düşük iç kusurlu parçaların oluşumuna olanak tanıyarak daha yoğun ürünlerin elde edilmesini sağlar [129]. Chen vd., yaptıkları çalışmada, 55,55 J/mm^3 enerji yoğunluğu ile farklı boyutlardaki toz parçacıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 16 μm'lik toz boyutu ile üretilen parçanın 610 MPa'lık bir değer ile en yüksek çekme dayanımı elde edildiği vurgulanmıştır [130]. Düşük enerji yoğunluğunda, yetersiz erime nedeniyle sıvı eriyik havuzunun viskozitesi düşüktür [131]. Bu nedenle sıvı metalin yayılması zordur ve bu durumda gözenekliliğe neden olmaktadır. Daha yüksek bir enerji yoğunluğu seviyesinde sıvı oluşumu daha yoğun bir yapı oluşturan sıvı metalin düzgün yayılması için yeterlidir. Ancak her toz malzemenin eklemeli imalatı için ideal enerji yoğunluğu değeri bulunmaktadır. Bu değer dışına çıkıldığında kusur oluşumu meydana gelmekte ve nihai ürün olumsuz etkilenmektedir. Gor vd., SS316L toz malzemesinin eklemeli imalatında 125 J/mm^3 enerji yoğunluğu ile en yüksek çekme dayanımının elde edildiğini bildirmişlerdir. Enerji yoğunluğunun artan değerlerinde anahtar deliği gözenekliliğinin oluştuğunu ve bu kusurun çekme dayanımını azalttığını söylemişlerdir [129]. Sertlik birçok endüstriyel uygulamada dikkate alınan en önemli yüzey özelliğidir. Toz boyutu tek başına sertlik üzerinde fazla bir etkiye sahip değildir ancak inşa yönü sertlik değerinde değişkenlik göstermektedir. Chen vd., XY inşa yönünde üretilen numunenin sertlik değerinin (276 HV), YZ (286 HV) ve XZ (291 HV) inşa yönünde üretilen numunelere göre daha düşük olduğunu aktarmışlardır [130]. Sertlik değeri, gözeneklilik ile oldukça ilişkilidir. Bu nedenle, gözenekliliği azaltan parametreler daha yüksek sertlik ile sonuçlanacaktır. Tucho vd., gözeneklilik, tarama hızı ve tarama aralığının sertlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Enerji yoğunluğu arttıkça numunenin sertliğinin belirli bir seviyeye kadar doğrusal olarak arttığını ve daha yüksek

enerji yoğunluğunda oluşan gaz tutucu gözenekler nedeniyle azaldığını belirtmişlerdir. Maksimum sertlik değerinin 80 J/mm^3 enerji yoğunluğunda elde edildiğini gözlemlemişlerdir [132]. Tarama aralığı sertlik seviyesini etkilemektedir. Gor vd., 50-200 µm tarama aralığında yapılan çalışmaları derlemişlerdir. Daha düşük tarama aralığının lazer tarama izleri arasında daha fazla örtüşme oranına sahip olacağını ve bu durumunda izler arasında tam ergimeyi sağlayacağını belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek tarama aralığında daha fazla gözeneklilik oluşmuştur. Yüksek sertlik değeri için düşük tarama aralığı (70-80 µm) değerinin kullanılması gerektiğini ortaya koymuşlardır [129].

Eklemeli imalat ile üretilen parçalarının kalitesi genellikle yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk ve bağıl yoğunluk gibi özellikler ile değerlendirilmektedir. Bu parçaların yüzey ve boyutsal kalitesini iyileştirmek için fiziksel süreci etkileyen değişkenlerin iyi bilinmesi gerekmektedir [133]. Boyutsal doğruluğu düşük bir parçanın, montaj işlemi zordur ve ilave işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca pürüzlü yüzeyin parçaların yorulma performansını ve çekme dayanımını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Literatürün gözden geçirilmesi ile tarama hızı, lazer gücü, katman kalınlığı, tarama aralığı ve örtüşme oranının lazer tabanlı olarak üretilen ürünlerinin yüzey kalitesini ve boyutsal doğruluğunu etkileyen önemli parametreler olduğu ortaya konulmuştur [13, 133, 134]. Tain vd., imalat parametrelerinin parçalarının yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Düşük tarama hızının ve yüksek lazer gücünün toplanma oluşumunu azaltabileceğini ve yüzey kalitesini iyileştirebileceğini belirtmişlerdir [133]. Mumtaz ve Hopkinson, yüksek lazer güçlerinin yüzey kalitesini düşürdüğünü ve tarama hızı açısından genellikle düşük tarama hızlarının tercih edilmesi gerektiğini söylemişlerdir [135]. Calignano vd., AlSi10Mg alaşımlı numunelerin eklemeli imalatında imalat parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Taguchi yöntemi ile tarama hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu ve ikincil işlemlerle yüzey kalitesinin daha da artacağını aktarmışlardır [13].Wang vd., tarama iz genişliğinin, enerji yoğunluğunun ve katman kalınlığı değişkenlerinin üretilen parçaların yüzey kalitesi için önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yeniden ergitme ile yüzey kalitesinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir [136]. Nguyen vd., farklı katman kalınlıklarında üretilen Inconel 718 parçaların boyutsal doğruluğunu araştırmışlardır. Daha yüksek boyutsal doğruluğun daha düşük katman kalınlığı ile elde edildiğini belirtmişlerdir [134].

4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyumun, çeliğe mükemmel bir alternatif olarak kabul edilmesi ve imalat sanayisindeki yaygın kullanımı ile hem endüstriyel hem de akademik çalışmalarda kullanılmaktadır. Alüminyum, saf bir element olarak yüksek dayanıklılık için yeterince güçlü olmayabilir. Bu nedenle istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi ve endüstriyel uygulamalara uygun hale gelebilmesi için alaşımlanması gerekmektedir. Alüminyumun alaşımlanmasında genellikle silisyum, bakır, mangan, çinko ve magnezyum alaşım elementleri kullanılmaktadır [56].

Genel olarak alüminyum alaşımı dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bu grupların her ikisi de ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem uygulanamayan türlere ayrılmaktadır. Alüminyumun yaklaşık %85'i dövme alaşımlarda kullanılmaktadır [137]. Döküm alaşımların düşük erime noktaları nedeniyle üretilmeleri nispeten ucuzdur, ancak dövme alaşımlarına göre daha düşük çekme dayanımına sahiptir. Alüminyum alaşımlarının tanımlanmasında bir numaralandırma/tanımlama sistemi bulunmaktadır. Dövme ve döküm alüminyum alaşımları tanımlanmasında farklılıklar vardır. Dövme alaşımları 4 haneli, döküm alaşımları 3 haneli ve 1 ondalıklı sistem ile ifade edilmektedir. Alaşımların tanımlama sistemi, dövme alaşımlar ve döküm alaşımlar olmak üzere başlıklar altında kısaca açıklanmıştır.

4.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

1xxx (Saf alüminyum)

Bu alaşım serisi %99 veya daha yüksek saflıkta alüminyumdan oluşmaktadır. Yüksek düzeyde şekillendirilebilir olan alüminyum paketleme işlemlerinde kullanılan folyo ve şerit yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu seriye ısıl işlem uygulanmaz.

2xxx (Al-Cu)

Bu serinin başlıca alaşım elementi bakırdır. 2xxx serisi ısıl işlem görebilen bir alüminyum alaşımıdır ve özellikle yüksek sıcaklıkta yüksek mukavemet özelliği ile bilinmektedir. Bu özelliğinden dolayı kamyon ve uçak gövde parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. Bu

serinin korozyon dayanımının düşük olması boyama veya kaplanma gibi ilave işlem gerektirmektedir [138]. 2xxx serisinin en yaygın kullanılan alaşımı Al 2024'tür.

3xxx (Al-Mn)

Bu serinin başlıca alaşım elementi mangandır. 3xxx serisi iyi korozyon direncine, iyi şekillendirilebilirliğe ve yüksek sıcaklıklarda kullanım için uygundur. Bu seriye ısıl işlem uygulanmaz. Pişirme kaplarının imalatında, ısı eşanjörleri için çatı kaplamalarında ve içecek kutularının üretiminde kullanılmaktadır [139]. 3xxx serisinin en yaygın kullanılan alaşımları Al 3003 ve 3004'tür.

4xxx (Al-Si)

Hem ısıl işlem hem de ısıl işlem içermeyen tek seridir. Silisyum alüminyuma eklendiğinde erime noktasını düşürür ve eridiğinde akışkanlığını arttırır. Bu özellik sert lehimleme için kullanılan dolgu malzemeleri için istenilir. Genel olarak bu alaşım serisi dolgu malzemesi olarak kullanılır. Bu seriye sadece silisyum ilavesi ile ısıl işlem uygulanmaz ancak magnezyum ve bakır ilaveleri ile ısıl işlem uygulanabilmektedir. Pistonlar ve motor blokları bu alaşımdan yapılan en yaygın ürünlerdir [140]. 4xxx serisinin en yaygın kullanılan alaşımı Al 4043'tür.

5xxx (Al-Mg)

Serinin başlıca alaşım elementi magnezyumdur. Isıl işlem ve yaşlandırma uygulanamaz. 5xxx serisi tuzlu suda bile korozyona karşı oldukça dirençlidir ve kriyojenik sıcaklıklarda yüksek tokluğunu koruyabilmektedir [141]. Bu özelliklerinden dolayı kriyojenik tank ve mutlak sıcaklıklara yakın sistemlerin imalatında kullanılmaktadır. 5xxx serisinin en yaygın kullanılan alaşımı Al 5182'dir.

6xxx (Al-Mg-Si)

Alüminyuma magnezyum ve silisyumun eklenmesi bu alaşıma ısıl işlem görme kabiliyeti kazandırır. Bu serinin yüksek ekstrüde edilebilirliği onu yapısal ve mimari uygulamalarda kullanılabilir hale getirir. Bu alaşım şekillendirilebilir ve kaynaklanabilir. İyi korozyon

direncine sahiptir. Otomotiv parçaların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [142]. 6xxx serisinin en yaygın kullanılan alaşımı Al 6061'dir.

7xxx (Al-Zn)

Serinin başlıca alaşım elementi çinkodur. 7xxx serisi ısıl işlem görebilir ve iyi tokluk değerine sahiptir. Serinin önemli alaşımları Al 7050 ve 7075'tir. Bu alaşımlar genellikle uçak, havacılık ve spor ekipmanları gibi yüksek performanslı uygulamalarda kullanılır. Korozyon dayanımları düşüktür [143].

8xxx (Diğer elementlere sahip alaşımlar)

8xxx serisinde başlıca elementler Fe, Li ve Ni'dir. Bu seriye ısıl işlem uygulanabilir ve Fe ve Ni element ilaveleri ile iyi bir elektrik iletkenliği sağlanır. Li ilavesi bu alaşıma yüksek mukavemet kazandırır ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 8xxx serisinin en yaygın kullanılan alaşımları Al 8500, 8510 ve 8520'dir.

4.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımlarının tanımlama sistemi, 3 basamaklı ve ondalık gösterim xxx.x'e (356.0) dayanmaktadır. İlk rakam (**X**xx.x), alüminyum alaşımına eklenen ana alaşım elementini gösterir. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [138]

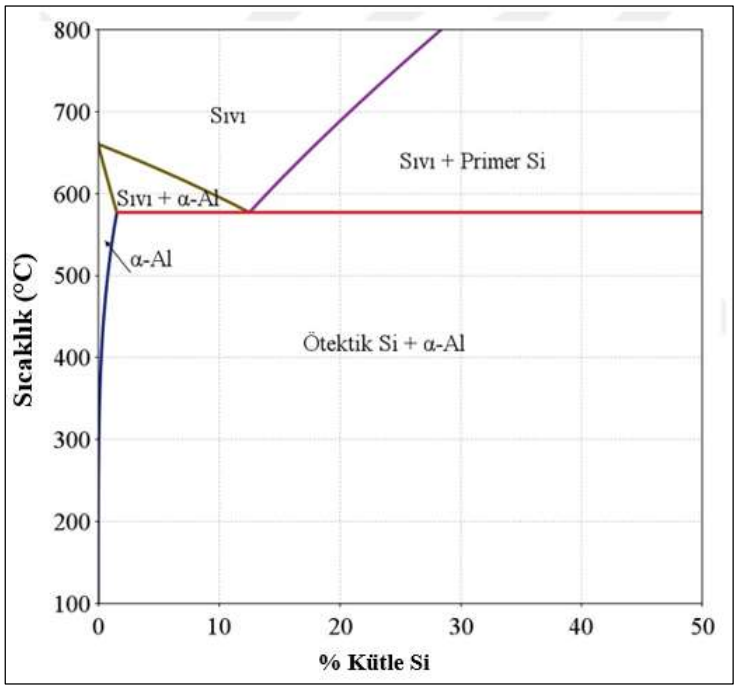
Alaşım serisi	Alaşım elementi
1xx.x	%99 ve üzeri saflıkta alüminyum
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silisyum, bakır ve magnezyum
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

İkinci ve üçüncü rakamlar (x**XX**.x), alaşımın saflık derecesini belirtir. Ondalık kısım (xxx.**X**), alaşımın üretim yöntemini ifade etmektedir. Örneğin, ondalık kısım 0 ise alaşım

döküm yöntemi ile üretilmiştir. Büyük harf ön eki alaşımın modifiye edildiğini belirtmektedir. Bu tanımlama 356.0 ve A356.0 örneğinde gösterilmiştir.

4.3. AlSi10Mg Alaşımı

Nihai ürünün kalitesi malzeme özelliklerine, toz morfolojisi ve içeriğine bağlı olduğundan malzeme eklemeli imalatın önemli bir parçasıdır [144]. AlSi10Mg alaşımı eklemeli imalatta yaygın şekilde kullanılan bir alüminyum alaşımıdır. Ötektik altı alüminyum alaşımları grubu altında AlSi10Mg mükemmel döküm kabiliyeti, yüksek korozyon direnci ve hafifliği gibi birçok özelliğinden dolayı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde oldukça tercih edilen bir malzemedir. [145, 146]. Genellikle bu alaşım yüksek yüklere maruz kalan ince duvarlara ve karmaşık geometrilere sahip döküm parçaların imalatında kullanılır. Bu alaşımdan yapılan parçalar gerektiğinde kaynaklanabilir, işlenebilir ve kaplanabilir [147]. Al-Si alaşımında Si'nin ağırlığı %11-13 arasında olduğunda alaşım ötektik, Si %11'den az olduğunda alaşım ötektik altı ve %13'ten fazla olduğunda alaşım hiperötektik olarak bilinir. [148]. Silisyumun (Si) alüminyuma (Al) eklenmesi katılaşma sırasındaki büzülmenin azalmasına ve akışkanlık gibi özelliklerini iyileştirmektedir. Şekil 4.1'de Al-Si faz diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.1. Al-Si faz diyagramı [150]

İki element özellikle 577 ºC'lik bir sıcaklıkta %12,6 silisyumda ötektik reaksiyon oluşturur [145]. Bununla birlikte Si'nin sert fazlarının eklenmesi nedeniyle Al-Si alaşımının işlenebilirliği azalır. Alaşıma Mg elementinin eklenmesi alaşımın ısıl işleme tabi tutulmasına olanak tanıyarak Mg-Si çökeltisinin oluşumuna yol açacaktır. Ayrıca Mg ilavesi alaşımın dayanımını ve çözünürlüğünü arttırır, korozyon direncini iyileştirir, kaynaklanabilirliği ve işlenebilirliği arttırır [149]. Magnezyum Al-Si alaşımına alaşımlandığında Mg_2Si'nin çökelmesi meydana gelmektedir. Bu alaşımlamanın amacı, matrisin mekanik özelliklerinden ödün vermeden güçlenmesini sağlamaktır [145]. Alüminyum alaşım tozlarının lazer ışınını iyi yansıtması, büyük ısı transferi sergilemesi ve kolayca oksitlenmesi gibi olumsuzlukları ile SLM sürecini zorlaştırmaktadır [149, 151]. Gaz atomizasyonu ile üretilen AlSi10Mg alaşım tozu 20-63 µm toz boyutu ile otomotiv ve havacılık endüstrilerinde çeşitli uygulamalar için eklemeli imalatta başarıyla kullanılmaktadır [152]. Resim 4.1'de eklemeli imalatta kullanılan AlSi10Mg alaşımının örnek toz morfolojisi verilmiştir. Bu alaşım kullanılarak üretilen parçaların belirgin mikroyapısı ve çekme özellikleri ısıl işlem uygulanarak geliştirilebilir. AlSi10Mg alaşımındaki ötektik Si'nin şekli ve boyutu parçanın mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir [153]. Döküm AlSi10Mg alaşımı ile karşılaştırıldığında, Si fazının çok ince yapısı ve dağılımı nedeniyle eklemeli imalat ile üretilen parçalar daha iyi mekanik özellikler sergilemektedir [145, 154].



Resim 4.1. AlSi10Mg alaşım tozunun morfolojisi [155]

5. GEOMETRİK TOLERANSLAR VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

5.1. Geometrik Toleranslar

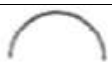
Genel olarak imalat işlemlerinde nominal ölçülerde parça üretmek oldukça zordur. Parça üretiminde daima boyut, biçim, yön ve konum sapmaları meydana gelmektedir. Bu sapmaların çok büyük olması parçanın kullanılabilirliğini azaltacaktır. İmal edilen parçanın işlevini yerine getirebilmesi için bu sapmaların mümkün olduğunca küçük veya kabul edilebilir bir değer aralığında bulunması gerekmektedir. Tasarımı yapılan parçaların üretiminde imalat yöntemi ve imalat parametrelerinin uyumu önemlidir. Özellikle birbiri içinde çalışan mekanizmaları oluşturan parçaların üretilmesinde düşük tolerans aralığının istenmesi imalat parametrelerinin belirlemesini zorunlu kılmaktadır. Çünkü istenilen tolerans aralığında üretilmeyen parçalar titreşim, sürtünme gibi olumsuzluklara sebep olarak sistemin kullanım ömrünü azaltacaktır. Bu durumda istenilen tolerans değerlerine ulaşmak için ilave işlemler gerekmekte, ilave işlemlerde zaman ve maliyet açısından külfet oluşturmaktadır. Bu nedenle parçaların istenilen tolerans değerleri aralığında ve ilave işlemsiz üretilmesi birçok açıdan fayda sağlamaktadır.

Geometrik boyutlandırma ve toleranslandırma (GD&T), parçalardaki özellikler için geometri gereksinimlerini verimli ve doğru bir şekilde iletmek için mekanik çizimlerde kullanılan bir sembol dilidir. GD&T otomotiv, havacılık, elektronik ve imalat endüstrisinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. ISO 1101 geometrik toleransların ifade edilmesinde kullanılan uluslararası bir standarttır.

5.2.1. Geometrik toleransların tanımlanması

Bilindiği üzere makine parçaları silindirik ve düzlem yüzeyli kısımlardan oluşmaktadır. Ancak bu kısımları şekil ve çalışma konumları bakımından ideal tamlık derecelerinde yapmak pek mümkün olamamaktadır. Fakat makine parçalarının işlevlerini yerine getirebilecek şekilde toleranslandırılarak yapılması mümkün olmaktadır. Bu toleranslandırma sembollerle gösterilen şekil (form), yönelim, konum ve yalpalama (salgı) toleransları olarak ISO 1101 ile standartlaştırılmıştır (Çizelge 5.1.).

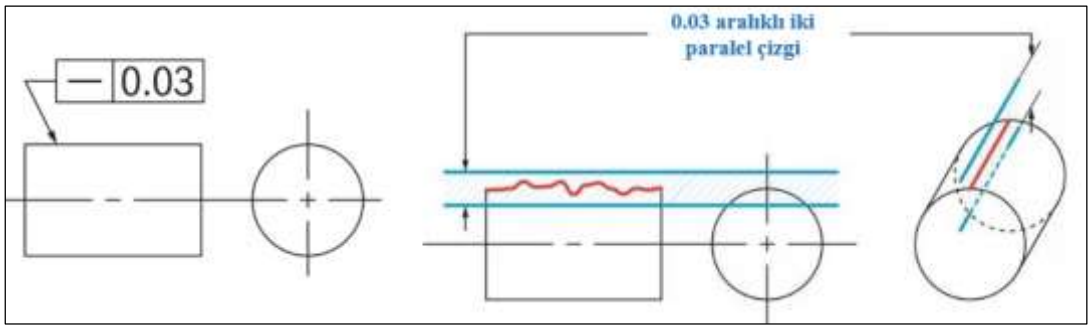
Çizelge 5.1. Geometrik tolerans çeşitleri ve sembolleri [156]

Toleranslar	Toleranslandırılan özellik	Sembol
Şekil toleransları	Doğrusallık	
	Düzlemsellik	
	Dairesellik	
	Silindiriklik	
	Bir çizginin şekli	
	Bir yüzeyin şekli	
Yönelim toleransları	Paralellik	
	Diklik	
	Eğiklik (Açısallık)	
Konum toleransları	Bir elemanın konumu	
	Eş eksenlilik	
	Simetriklik	
Yalpalama (Salgı) toleransları	Yalpalama	
	Toplam yalpalama	

Şekil toleransı gerçek bir yüzeyin istenilen geometrik formdan ne kadar farklı olmasına izin verildiğini belirtir. Bu toleranslar herhangi bir düzleme göre verilmezler. Tolerans değerleri belirlenirken boyut toleransının değeri göz önüne alınmalıdır. Bu toleranslar, doğrusallık, düzlemsellik, dairesellik, silindiriklik, bir çizginin şekli ve bir yüzeyin şekli olarak ifade edilirler.

Doğrusallık

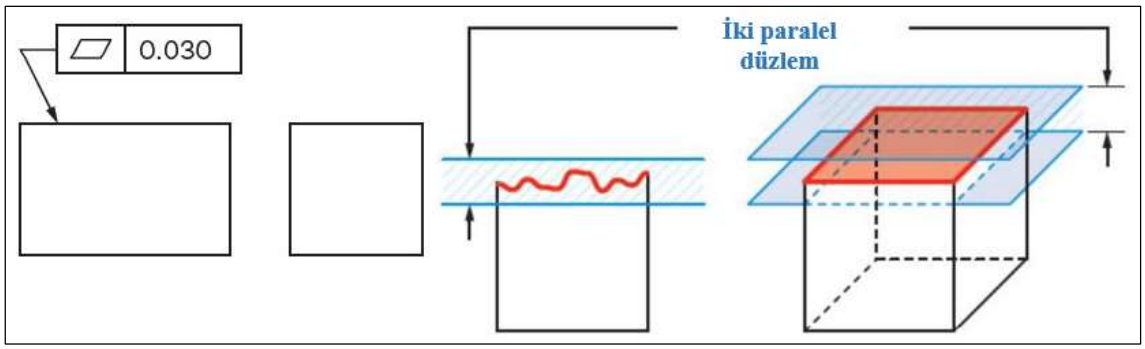
Doğrusallık iki boyutlu bir geometrik toleranstır ve bir yüzeyde kabul edilebilir dalgalanmayı belirtir. Doğrusallık, bir yüzeyin veya bir eksenin bir düz çizgi boyunca uzanması gereken durumdur (Şekil 5.1.).



Şekil 5.1. Doğrusallık toleransının gösterimi [157]

Düzlemsellik

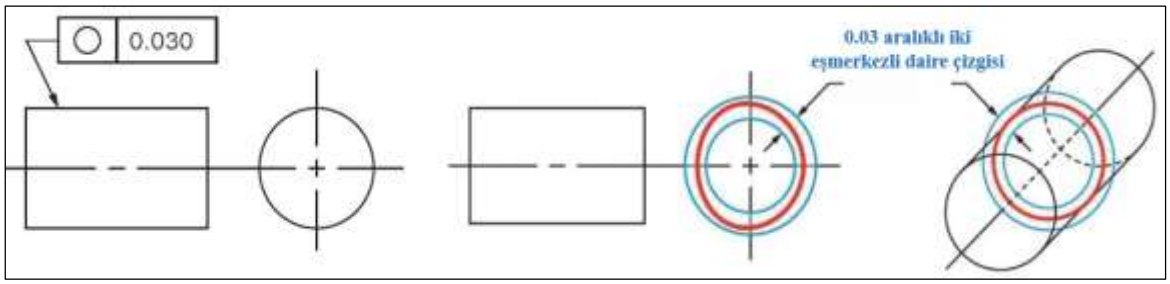
Diğer veriler veya özelliklerden bağımsız olarak bir yüzeyin ne kadar düz olduğunu gösteren yaygın bir semboldür. Düzlemsellik iki paralel düzlem arasındaki dalgalanmayı ifade etmektedir (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2. Düzlemsellik toleransının gösterimi [157]

Dairesellik

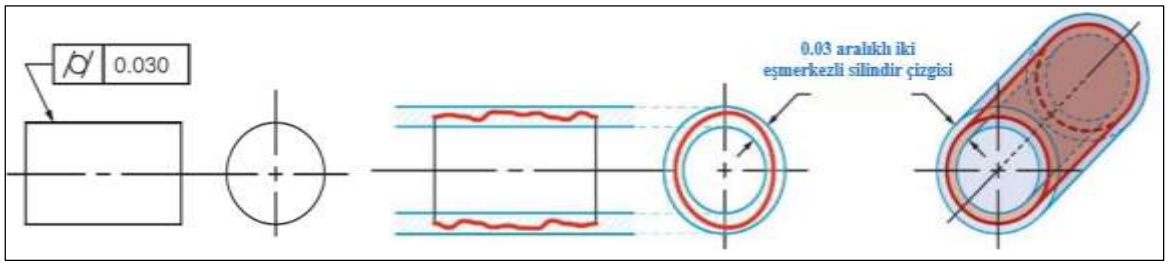
Dairesellik toleransı, yüzeylerde eş merkezli iki daire arasında kabul edilebilir dairesel sapmayı ifade etmektedir (Şekil 5.3.). Dairesellik bir nesnenin gerçek bir daireye ne kadar yakın olması gerektiğini açıklamak için kullanılır. Bazen yuvarlaklık olarak adlandırılan dairesellik bir dairenin genel biçimini kontrol eden iki boyutlu bir toleranstır ve bir referans unsurundan bağımsızdır.



Şekil 5.3. Dairesellik toleransının gösterimi [157]

Silindiriklik

Silindirlik sembolü bir nesnenin gerçek bir silindire ne kadar yakın olduğunu açıklamak için kullanılır (Şekil 5.4). Silindiriklik genellikle iyi daireselliğe ve düzlüğe sahip olması gereken pim gibi parçalar için kullanılır. Dairesellik sadece enine kesitler için geçerliyken, silindiriklik tüm yüzey için aynı anda geçerlidir. Silindiriklik herhangi bir veri özelliğinden bağımsızdır.

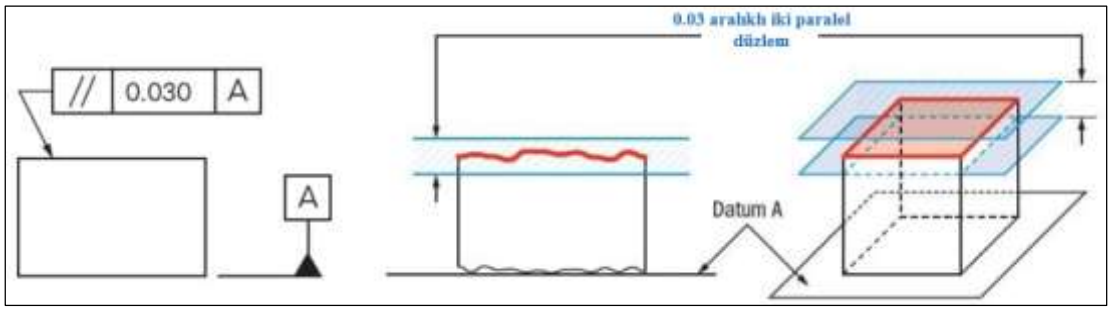


Şekil 5.4. Silindiriklik toleransının gösterimi [157]

Yönelim toleransı bir referansa göre formun oryantasyonunu belirleyen geometrik bir toleranstır. İki çizginin veya iki düzlemin paralelliği, dikliği ve açısallığı bir referans düzlemi kullanılarak ölçülür.

Paralellik

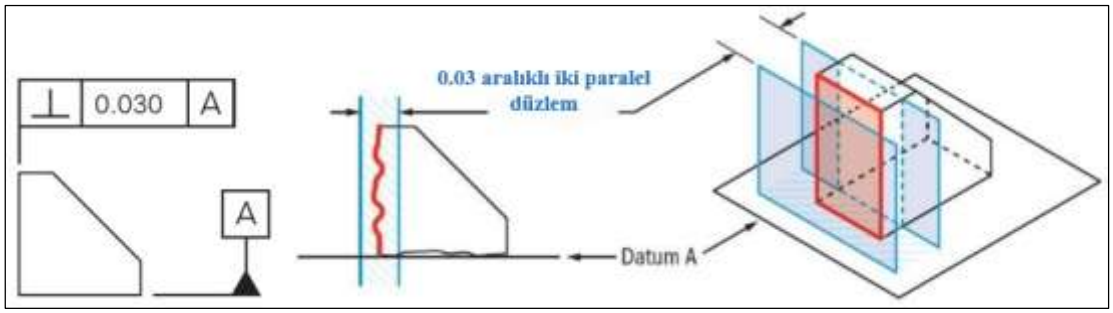
Paralellik referans verilen bir özelliğin bir referans yüzeyi veya çizgisine paralel yönelimini tanımlayan oldukça yaygın bir semboldür (Şekil 5.5). Paralellik tolerans bölgesi bir referans düzleminden veya bir eksenden tüm noktalarda eşit uzaklıkta bulunan bir yüzey veya merkez düzleminin durumudur.



Şekil 5.5. Paralellik toleransının gösterimi [157]

Diklik

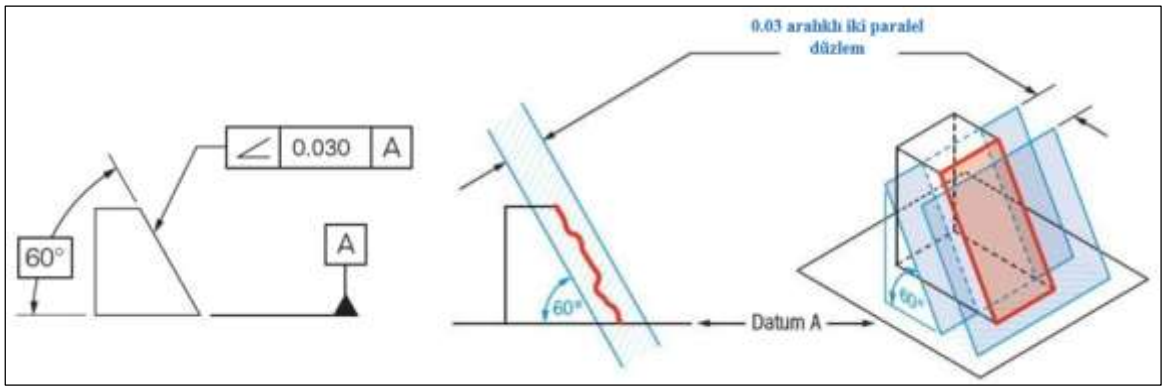
Diklik toleransı bir yüzeyin, eksenin veya düzlemin 90°'lik bir açıdan ne kadar sapabileceğini kontrol eden üç boyutlu geometrik bir toleranstır (Şekil 5.6). Diklik iki boyutlu (2B) çizgiye referans verebilir ancak daha yaygın kullanımı başka bir referans düzlemine dik olan bir yüzey düzleminin oryantasyonunu tanımlar.



Şekil 5.6. Diklik toleransının gösterimi [157]

Eğiklik (Açısallık)

Açısallık referanslı bir açıda bir özelliğin diğerine özel oryantasyonunu tanımlayan semboldür (Şekil 5.7). Ayrıca açısallık tolerans bölgesi bir yüzeyin, eksenin veya düzlemin tasarım özelliklerinde açıklanan açıdan ne kadar sapabileceğini kontrol eden üç boyutlu bir geometrik tolerans olarak tanımlanmaktadır.

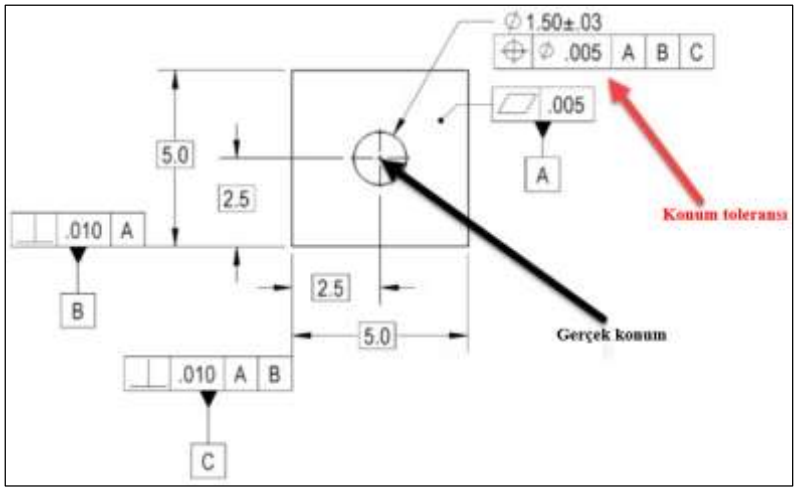


Şekil 5.7. Açısallık toleransının gösterimi [157]

Konum toleransı unsurun bir referansa göre konumunu (gerçek konumu) belirler. Konum toleransını belirtmek için her zaman bir veri gereklidir. Konum toleransları üç tolerans bölgesi ile belirtilebilir. Bunlar konum, eş merkezlilik ve simetri toleranslarıdır.

Bir elemanın konumu

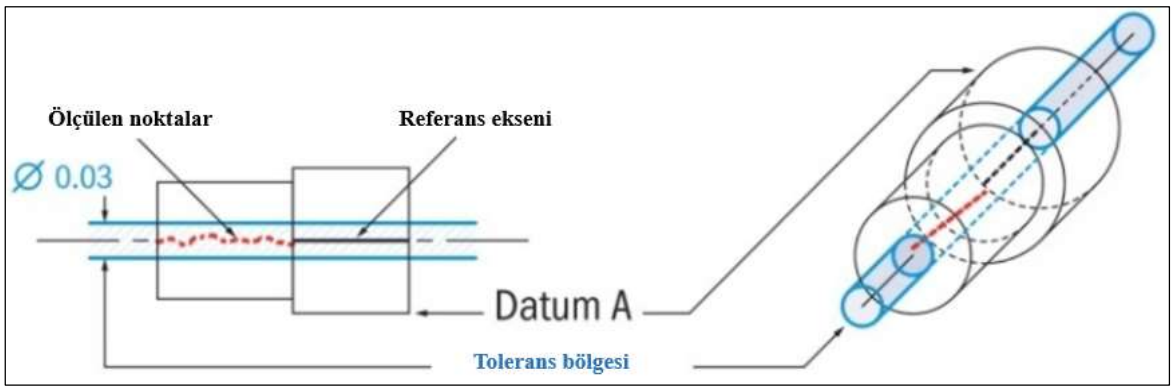
Konumsal tolerans bir özelliğin konumunun gerçek konumundan ne kadar sapabileceğini kontrol eden üç boyutlu bir geometrik toleranstır (Şekil 5.8). Konumsal toleranslar delik veya kama kanalı gibi referans düzlemlerinden boyut unsurlarının yerini belirlemek için ve unsurları bir referans eksenine yerleştirmek için kullanılır. Silindirik unsurlar için konum tolerans bölgesi unsurun ekseninin içinde olması gereken bir silindirdir. Diğer unsurlar için konum toleransları unsurun merkez düzlemi iki paralel düzlem arasındaki boşluğa sığmalıdır.



Şekil 5.8. Konumsal toleransın gösterimi [157]

Eş eksenlilik

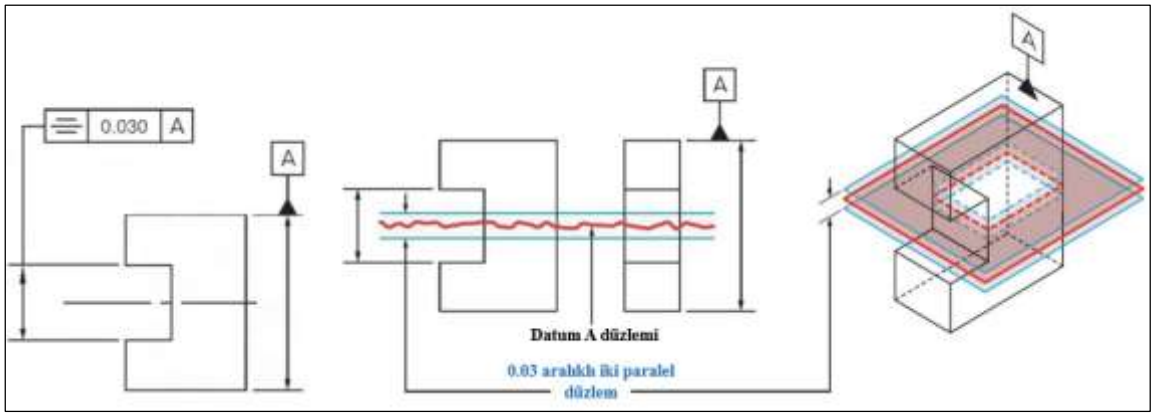
Eş eksenlilik referans alınan bir silindirik unsurun tüm türetilmiş medyan noktalarının içine girmesi gereken bir referans ekseni tarafından tanımlanan üç boyutlu (3B) silindirik bir tolerans bölgesidir (Şekil 5.9). Unsurun tamamı boyunca tüm ortanca noktalar bu tolerans bölgesinde olmalıdır.



Şekil 5.9. Eş eksenlilik toleransının gösterimi [157]

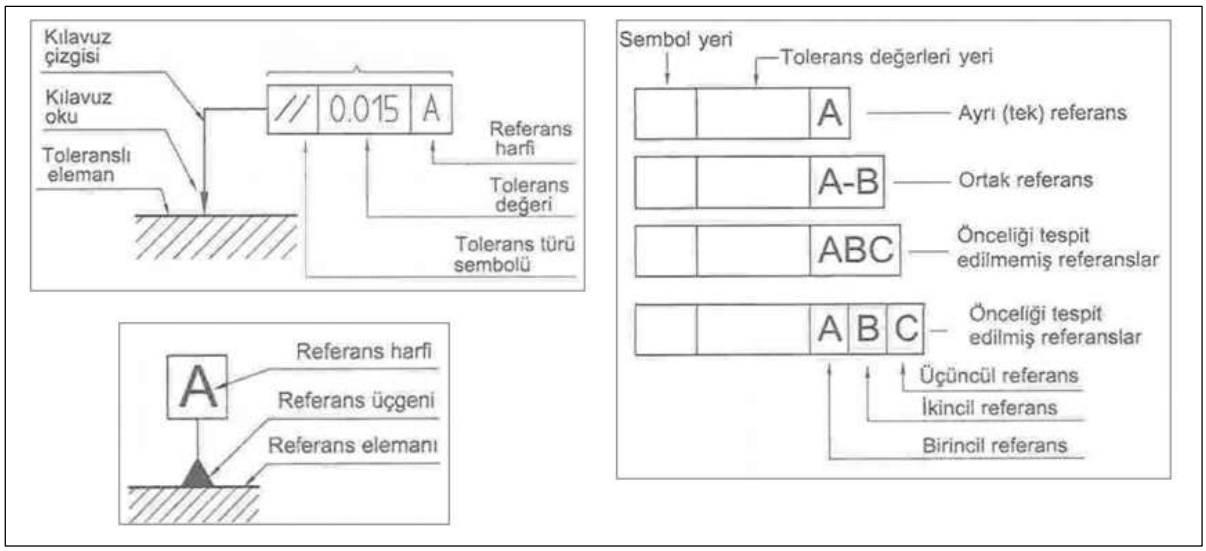
Simetriklik

Simetri toleransı bir parçadaki iki özelliğin bir referans düzlemi boyunca tek tip olmasını sağlamak için kullanılan üç boyutlu (3B) bir toleranstır (Şekil 5.10). Simetri toleransı iki özellik arasındaki medyan noktaların belirli bir merkez düzlemden veya eksenden ne kadar sapabileceğini kontrol eder. Simetri toleransı dairesel olmayan unsurlara uygulanır.



Şekil 5.10. Simetriklik toleransının gösterimi [157]

Geometrik toleranslar, bir işin yapım resmi üzerine gelişigüzel konulmaz. Bunun için standartlarda (TSE 1304 ISO 1101) belirlenmiş şekiller ve yöntemler uygulanır. Şekil ve konum toleransları normlaştırılmış çerçevelere yazılır. Bu çerçevelerde toleransa ait sembol, tolerans değeri, referans alınan yer (referans elemanı) bulundurulur (Şekil 5.11).



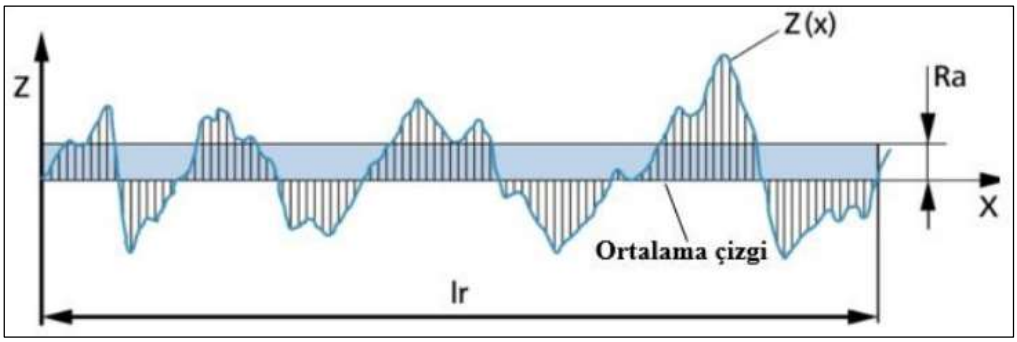
Şekil 5.11. Geometrik toleransının temel biçimleri

5.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü yüzeyin dokusunu belirlemek için kullanılan bir ölçüdür. Malzemelerin yüzey kaliteleri performanslarında önemli bir rol oynamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü fazla ise sürtünme ile sonuçlanan aşınmaya yol açacaktır. Pürüzlü yüzeylerin metalik malzemelerin yorulma performansını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle dinamik yükler altında çalışacak parçalarda yüksek yüzey kalitesi aranmaktadır. Ayrıca istenilen mekanik ve geometrik özelliklerin elde edilebilmesi için öncelikli olarak yüzey kalitesinin belirlenmesi önemlidir. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde kullanılan terimler aşağıda açıklanmıştır.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü

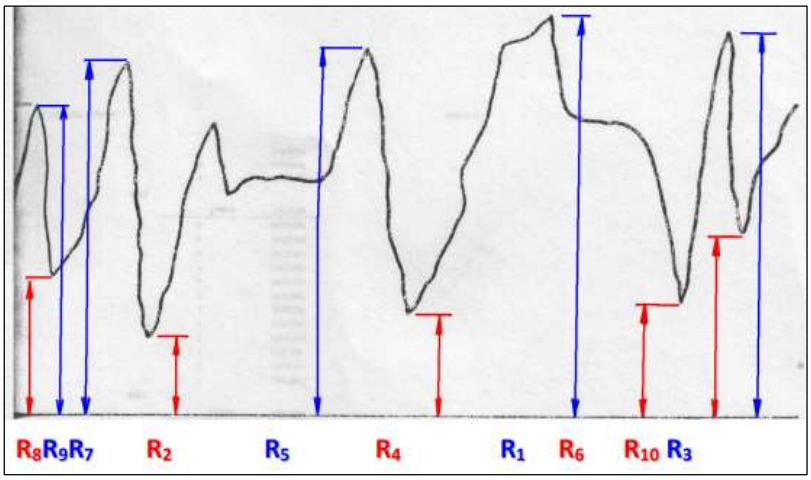
Aritmetik ortalama pürüzlülük (Ra), ölçüm uzunluğu (Ir) boyunca profil ortalama çizgisinden pürüzlülük düzensizliklerinin (Zx) ortalama mutlak sapması olarak tanımlanır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün (Ra) şematiği [158]

Maksimum profil yüksekliği

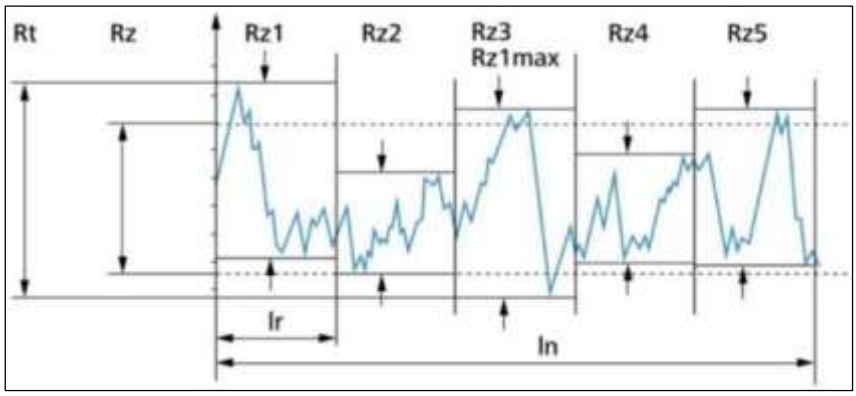
Maksimum profil yüksekliği (Rz), ölçüm uzunluğu içindeki en yüksek profilli beş tepe yüksekliği ve en derin beş vadi derinliklerinin mutlak değerlerinin ortalamasıdır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Maksimum profil yüksekliğinin (Rz) şematiği [159]

Toplam profil yüksekliği

Profilin toplam yüksekliği (Rt), ölçüm uzunluğu boyunca maksimum profil tepe yüksekliği ile maksimum profil vadi derinliği arasındaki dikey mesafedir (Şekil 5.14). Genellikle beş referans uzunluğunu kapsamaktadır.



Şekil 5.14. Toplam profil yüksekliğinin (Rt) şematiği [158]

6. DENEYSEL TASARIM, KARAR VERME VE TAHMİN TEKNİKLERİ

Bir deneysel çalışmada amaç, kesin çıkarımlarda bulunmak ya da üzerinde çalışılan konuya ilişkin bazı hipotezler hakkında bilgi sunmaktır. İstatistiksel yöntemler deneysel çalışmalarda kullanıldığında, karar verilirken göz önüne alınacak riskin büyüklüğünü ortaya koyabilir. Karar verme, istatistiksel yöntemlerin kullanımına dayandığında veri toplamayı gerektirir. Bu nedenle verinin toplanma yöntemi büyük önem kazanır. Bir deneyin tasarlanması, temel olarak deneyde izlenecek sıra (yol, düzen) olarak tanımlanır. Deneysel tasarımlar veri toplamadaki hatayı azaltmaya yardım ederler. Deneysel olarak çalışılacak bir projede, tasarım ve çözümleme evresindeki her bir aşamanın dikkatlice uygulanması gerekir [160].

Deneysel bir çalışmadan en iyi çıktı, sistematik bir yaklaşım dikkate alındığı zaman elde edilir. Farklılıklar olmasına rağmen genel olarak deneysel bir çalışma; problemin tanımı, bağımlı ya da yanıt değişkenlerinin seçimi, bağımsız değişkenlerin seçimi, bağımsız değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi ve etken düzeylerinin nasıl birleştirileceği basamaklarını kapsamaktadır. Deneysel tasarım; alınan gözlemlerin sayısı, deney sırası, kullanılacak rasgeleleştirme yöntemi ve deneyi tanımlayan matematiksel model temel bileşenlerinden oluşmaktadır. Çözümleme ise; veri toplama ve işleme, deney istatistiklerinin hesaplanması ve sonuçların yorumlanmasını içerir [161].

Bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. En iyi mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için en uygun imalat şartlarının belirlenmesi amacıyla Taguchi ve Gri ilişkisel analiz yöntemleri kullanılmıştır. İkinci aşamada, mekanik özelliklerden ve yüzey pürüzlülüğünden elde edilen en ideal imalat şartlarına göre AlSi10Mg toz malzemesi kullanılarak geometrik toleransların belirlenmesi için prizmatik numuneler üretilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel verilerin doğruluğunu kıyaslamak ve tahmin değerleri ile karşılaştırılması için bir bulanık mantık modeli (Fuzzy logic) oluşturulmuştur.

6.1. Taguchi Yöntemi

İmalat parametrelerinin daha verimli bir şekilde seçilmesini sağlamak ve harcanan zamanı ve malzemeyi azaltmak için Taguchi metodu alternatif bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Temel olarak Taguchi metodu, yüksek kalite sistemleri için güçlü bir yöntemdir. Maliyet, kalite ve performans tasarımlarını optimize etmek için basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Taguchi yöntemi son yıllarda çok geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Taguchi metodu, bir ürün ya da prosesin mühendislik optimizasyonunu; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı gibi üç adımlık bir yaklaşım içerisinde çözebilmeyi amaçlamaktadır [162].

Taguchi'nin sinyal/gürültü oranları

Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla deney tasarımında performans kriteri olarak kullanılmak üzere sinyal/gürültü oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki problemleri hedefin türüne göre üç kategoriye ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal/gürültü (S/N) oranı tanımlamıştır.

En küçük-en iyi

Bu tür problemlerde, kalite değişkeni y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda sinyal/gürültü oranı Eş. 6.1 ile ifade edilir.

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} y_i^2\right) \tag{6.1}$$

En büyük-en iyi

Bu durumda y'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal/gürültü oranı Eş. 6.2 ile ifade edilir.

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right) \tag{6.2}$$

Hedef değer-en iyi

Bu tür problemlerde, y için belli bir hedef değer (örneğin, ürün boyutları gibi) verilmiştir. Bu durumda sinyal/gürültü oranı Eş. 6.3 ile ifade edilir.

$$S/N = 10\log\ \mu^2/\sigma^2 \tag{6.3}$$

Her üç tip problemde de amaç S/N oranını maksimize etmektir. Taguchi'ye göre, S/N oranlarının maksimize edilmesi bir yandan sinyali arttırırken diğer yandan da değişkenliği azaltmaktadır. [161].

Doğrulama deneylerinin yapılması

Deney, analiz sonucunda seçilen en iyi şartlar altında tekrarlanmaktadır. En iyi şartları belirleyerek yapılan deney doğrulama deneyidir. Deney sonucunda bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerine ulaştırırsa istenen durum gerçeklemiş ve deney amacına ulaşmış olur.

6.2. Gri İlişkisel Analiz

Gri sistem (GS), bilginin bir kısmının bilindiği diğer kısmının bilinmediği sistemdir. Gri sistem teorisi şimdiye kadar birçok mühendislik ve yönetim alanında başarıyla uygulanan gri ilişkisel analiz tekniğini geliştirmiştir. Bu teknik, sanayi, ekoloji, meteoroloji, coğrafya, deprem, hidroloji, tıp ve askeri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [163]. Gri teorinin en büyük avantajı hem eksik bilgiyi hem de belirsiz problemleri çok hassas bir şekilde ele alabilmesidir. Özellikle verilerin yetersiz olduğu durumlarda bir analiz aracı görevi görmektedir [164]. Gri ilişkisel analiz (GRA), birden fazla faktör ve değişken arasındaki karmaşık ilişkileri çözmek için uygun bir tekniktir. Performans değerlendirmesi, faktör-etki değerlendirmesi ve çoklu kriter kararlarında başarıyla uygulanmıştır [165]. Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatı sürecinin optimizasyonunda çoklu performans özelliklerini araştırmak için gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. İmalat parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmek için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

- Veri ön işleme olarak adlandırılan dört farklı performans özelliğinin tümünü içeren deneysel sonuçların normalleştirilmesi.
- Tüm performans özellikleri için gri ilişkisel katsayıların hesaplanması.
- Karşılık gelen gri ilişkisel katsayıların ortalaması alınarak gri ilişkisel derecenin hesaplanması.

Veri ön işleme

Gri ilişkisel analizde değişkenliği azaltmak için deneysel veriler normalleştirilir. Bu veri ön işleme olarak bilinir. Bir yanıttaki aralık ve birim diğerlerinden farklı olabileceğinden veri ön işlemesi gereklidir. Veri ön işleme orijinal diziyi karşılaştırılabilir bir diziye aktarmanın bir yoludur ve böylece veriler sıfır ile bir arasında normalleştirilir [166, 167]. Veri dizisinin özelliklerine bağlı olarak gri ilişkisel analiz için çeşitli veri ön işleme metodolojileri mevcuttur [168].

Orijinal dizinin hedef değeri sonsuz ise, o zaman "daha yüksek, daha iyi" özelliğine sahiptir. Orijinal dizi Eş. 6.4 ile normalleştirilir.

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \tag{6.4}$$

Orijinal dizinin "daha düşük-daha iyi" özelliği düşünüldüğünde, orijinal dizi Eş. 6.5 ile normalleştirilir.

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \tag{6.5}$$

Ulaşılması gereken kesin bir hedef değer (istenen değer) varsa, orijinal dizi Eş. 6.6 ile normalleştirilir.

$$x_i(k) = 1 - \frac{\left| x_i^0(k) - x^0 \right|}{\max x_i^0(k) - x^0} \tag{6.6}$$

Eşitliklerde verilen; x_i^0 (k) orijinal diziyi, x_i (k) veri ön işlemeden sonraki sırayı, min $x_i^0(k)$ serideki en küçük değeri, max $x_i^0(k)$ serideki en büyük değeri belirtmektedir. [169].

Gri ilişki katsayısı ve gri ilişki derecesi

Gri ilişkisel analiz iki sistem arasındaki ilişki düzeyini ölçmek için kullanılır. Gri ilişkisel analizde kullanılan dizilere gri ilişkisel katsayı denir. Gri ilişki katsayısı $\xi(k)$ Eş. 6.7 ile hesaplanır.

$$\xi(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta\Delta_{\max}}{\Delta oi(k) + \zeta\Delta\max} \tag{6.7}$$

Burada ξ işlevi, Δ_{0i} ile $\Delta_{\max}$ arasındaki farkı ayarlamaktır. x_i^0 (k) ve x_i (k) sapma dizisi olarak ifade edilir. ζ ayırt edici bir katsayıdır. ζ 'nin değeri daha küçükse ayırt edici yetenek daha büyüktür. Genelde ζ = 0,5 kullanılır [170].

$$\Delta_{0i}(k) = \left|x_0(k) - x_j(k)\right| \tag{6.8}$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k \left|x_0(k) - x_j(k)\right| \tag{6.9}$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k \left|x_0(k) - x_j(k)\right| \tag{6.10}$$

Gri ilişki katsayısı elde edildikten sonra gri ilişki katsayısının ortalama değeri gri ilişkisel derece olarak alınır [166, 171]. Gri ilişkisel derece Eş. 6.11 ile tanımlanır.

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \varepsilon(x_0(k), x_i(k)) \tag{6.11}$$

$\gamma(x_0, x_i)$ gri bir sistemdeki x_i serisi ile x_0 referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsüdür. Gri ilişkisel derecesinin büyüklüğü x_i ile x_0 arasında kuvvetli bir ilişki olduğunun göstergesidir. Eğer karşılaştırılan iki seri birbirinin aynı ise gri ilişkisel derece değeri 1

olarak bulunur. Gri ilişkisel derece karşılaştırılan serinin referans seriye ne kadar benzer olduğunu gösterir [172].

6.3. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Bulanık mantık, ilk olarak 1965 yılında Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Bulanık mantık (FL), bulanık kümelere ve alt kümelere dayalıdır. Klasik yaklaşımda bir nesne kümenin ya üyesidir ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde nesne küme ile olan üyelik ilişkisi açısından kümenin üyesi ise 1 kümenin üyesi değilse 0 değerini alır. FL klasik küme teorisinin bir uzantısıdır. Bir bulanık kümede her nesnenin bir üyelik derecesi vardır. Nesnenin üyelik derecesi (0, 1) aralığında herhangi bir değer olabilir ve üyelik fonksiyonu M(x) ile temsil edilir.

Bulanık kural tabanlı sistemlerin girdileri bulanık formda verilmelidir. Bu nedenle uygun bir değer elde etmek için bulanık bir çıktının durulaştırılması gerekir. FL kontrol sistemleri bulanıklaştırma, bulanık çıkarım süreci ve durulaştırma olmak üzere genellikle üç ana bölümden oluşur [173]. Bulanık bilgi tabanlı bir sistem aracılığıyla aynı girdi değerlerinden çıktı değeri üretmek için uygulanan işlem adımları Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Bulanık mantık yönteminin aşamaları

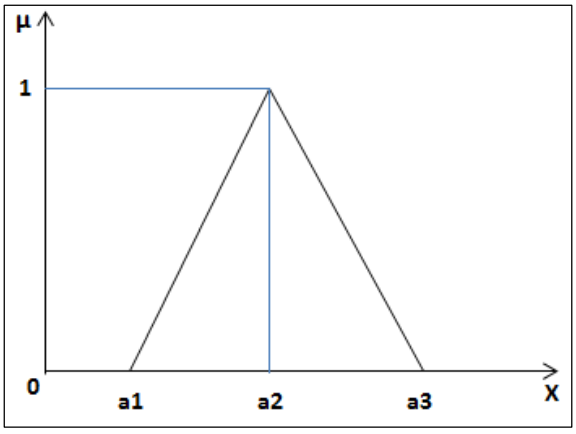
Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, bir sistemin sayısal girdisini belirli bir üyelik derecesine sahip bulanık kümelere atama işlemidir. Bu üyelik derecesi [0,1] aralığında herhangi bir yerde olabilir. 0 değeri bulanık ifadenin kümeye ait olmadığını gösterirken 1 değeri tamamen bulanık kümeye ait olduğunu belirtir. 0 ile 1 arasındaki herhangi bir değer değerin kümeye ait olduğu belirsizlik derecesini belirtir ve üyelik derecesi olarak adlandırılır. Üyelik fonksiyonları

belirlenen değerin bulanık kümeye ne kadar ait olduğunu gösterir. Çalışmalarda yaygın kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarıdır [174].

Üçgen üyelik fonksiyonu

Bir bulanık değerin maksimum değeri 1 ise ve her iki taraftan da azalıyorsa buna üçgen bulanık sayı denir. Şekil 6.2'de gösterildiği gibi $a_1<a_2<a_3$ koşuluyla $\{a_1, a_2, a_3\}$ olarak adlandırılan üç parametre belirlenirse, Eş. 6.12 kullanılarak üçgen üyelik fonksiyonu hesaplanır.

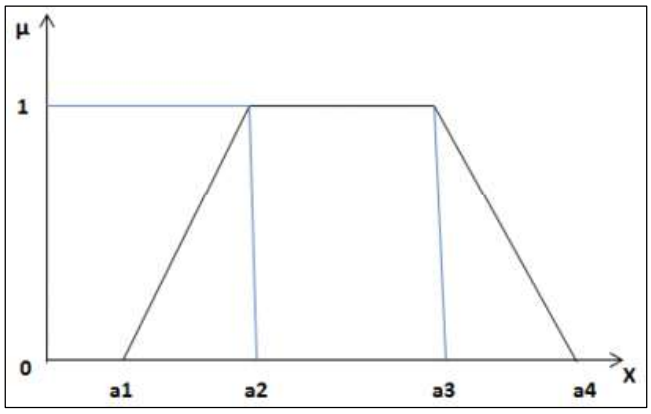


Şekil 6.2. Üçgen üyelik fonksiyonu

$$\mu(x; a_1, a_2, a_3) = \begin{cases} a1 \le x \le a2, & \frac{(x-a1)}{(a2-a1)} \\ a2 \le x \le a3, & \frac{a3-x}{a3-a2} \\ x > a3, x < a1, & 0 \end{cases} \quad (6.12)$$

Yamuk üyelik fonksiyonu

Şekil 6.3'te görüldüğü gibi a_2-a_3 tolerans aralığına sahip üyelik fonksiyonu yamuk bulanık üyelik fonksiyonu olarak adlandırılır. Şekil 6.3'te gösterildiği gibi $a_1<a_2<=a_3<a_4$ koşulu ile $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ olarak adlandırılan dört parametre belirlenirse Eş. 6.13 kullanılarak yamuk üyelik fonksiyonu hesaplanır.



Şekil 6.3. Yamuk üyelik fonksiyonu

$$\mu=(x; a_1, a_2, a_3, a_4) = \begin{cases} a1 \le x \le a3, & \frac{x-a1}{a3-a1} \\ a3 \le x \le a4, & 1 \\ a4 \le x \le a2, & \frac{x-a2}{a4-a2} \\ x > a2,\ x < a1 & 0 \end{cases} \quad (6.13)$$

Bulanık çıkarım süreci

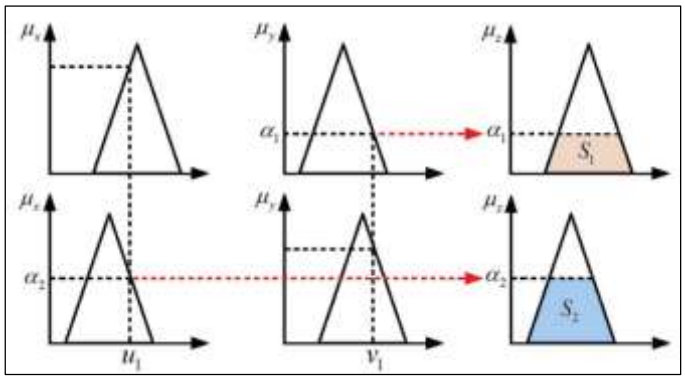
Bulanık denetleyicide yaygın olarak kullanılan iki çıkarım yöntemi vardır. Bunlar Mamdani ve Sugeno çıkarım yöntemlerdir [175, 176].

Mamdani yöntemi

Mamdani yöntemi, kural kümelerinin yorumlayıcısı olarak uygulanmaktadır. Dilsel değişkenlerden oluşur. Toplama işleminden sonra her bir çıktı değişkeninin bulanık kümesi için durulaştırma gereklidir. Tek çıkışlı üyelik fonksiyonunun kullanılması birçok sahnede dağıtılmış bulanık kümeye göre önemli ölçüde daha verimlidir. Mamdani yöntemi iki boyutlu işlemlerin merkezini bulmaya odaklanır. Mamdani yönteminin yapısı Şekil 6.4'te verilmiştir. Bulanık çıkarım sisteminde mevcut girdilerle sistemin çıktısını hesaplamak için aşağıdaki adımlar takip edilir.

- Bulanık kural kümelerinin tanımlanması
- Üyelik fonksiyonlarına göre girdiler için bulanıklaştırma işleminin yapılması
- Girdileri bulanık kurallarla birleştirmenin yapılması

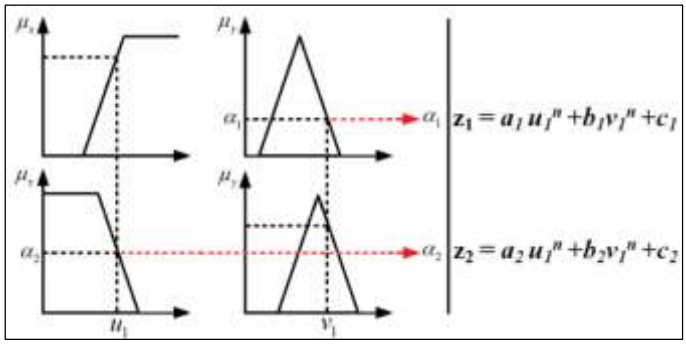
- Kural sonuçlarının tanımlanmasının yapılması
- Sonuçları birleştirmesinde çıktı dağılımının elde edilmesi
- Çıktı için durulaştırma işleminin yapılması



Şekil 6.4. Mamdani yönteminin yapısı [177]

Sugeno yöntemi

Bu yöntemde, girdi-çıktı verileri kümesini kullanarak bulanık kurallar oluşturur. Sugeno çıkarım yöntemi Mamdani yönteminden farklı olarak karmaşık problemler için bulanık kuralların sayısını azaltmayı amaçlamaktadır. Girdilerin bulanık alt kümesi ve sonucu doğrusal bir girdi-çıktı korelasyonudur [176]. Sugeno modeli için bulanık kuralın şekli "eğer x "A" ise ve y "B" ise o halde z=f(x, y) şeklinde gösterilmiştir. Öncüllerde "A" ve "B" bulanık kümeleri temsil ederken, z= f(x, y) net kümeyi ifade eder. Sugeno modelinin Mamdani modelinden temel farkı çıkış üyelik fonksiyonları ile ilgilidir. Sugeno modeli için çıkış üyelik fonksiyonları sabit veya doğrusaldır. Sugeno yönteminin yapısı Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5. Sugeno yönteminin yapısı [177]

Durulaştırma

Durulaştırma birleştirilmiş bulanık kümenin çıktısından tek bir sayı elde etme işlemidir. Bulanık çıkarım sonuçlarını net bir çıktıya aktarmak için kullanılır. Başka bir deyişle durulaştırma bir bulanık kümeye dayalı olarak en iyi kesin değeri seçen bir karar verme algoritması tarafından gerçekleştirilir. Durulaştırmada ağırlık merkezi ve ağırlıklı ortalama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [174]. Ağırlık merkezi yöntemi bulanık kümenin ağırlık merkezine dayalı net bir değer sağlar. Birleşik kontrol eylemini temsil etmek için kullanılan üyelik fonksiyonu dağılımının toplam alanı bir dizi alt alana bölünmüştür. Her bir alt alanın alanı ve ağırlık merkezi hesaplanır. Durulaştırılmış değeri bulmak için tüm bu alt alanların toplamı alınır. Ağırlıklı ortalama yöntemi simetrik çıkış üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık kümeler için geçerlidir ve ağırlık merkezi yöntemine çok yakın sonuçlar verir. Bu yöntem hesaplama açısından daha az kullanılmaktadır. Her üyelik fonksiyonu maksimum üyelik değerine göre ağırlıklandırılır.

Bulanık Sistem Kontrolünün Avantajları ve Dezavantajları

Bulanık kontrol sistemi birçok dezavantajın yanı sıra pek çok fayda da sağlamaktadır. Kontrol sisteminin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir [178].

Avantajlar

- Değişkenler gözlemlenerek yorumlanabilir.
- Tüm değişkenleri kavramak zorunda kalmadan girdi ve çıktı arasında ilişki kurulabilir.
- Basit tasarımı nedeniyle geleneksel sistemlerle karşılaştırıldığında ucuzdur.
- Bilgi edinme ve sunumu basitleştirilmiştir.
- Sistemin karmaşıklığı sistem tarafından giderilebilir.
- Bulanık mantık sistemi, karmaşık sorunlara en etkili çözümü sağlama yeteneğine sahiptir.
- Ticari ve pratik amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Dezavantajlar

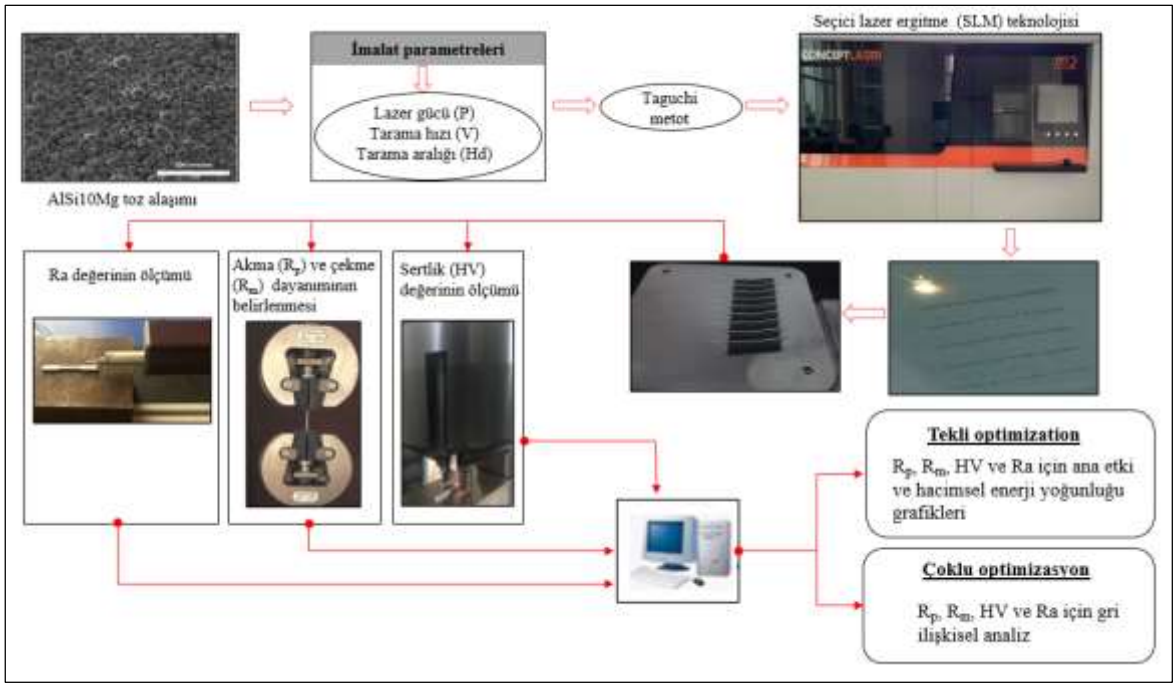
- Bulanık mantığın temel dezavantajı tamamen insan zekasına ve uzmanlığına bağlı olmasıdır.
- Bulanık bilgiye dayalı sistemlerin onaylanması ve doğrulanması için kapsamlı donanım testleri gereklidir.
- Bulanık mantık makine öğrenimi ve sinir ağı tipi örüntü tanıma yeteneğine sahip değildir.

7. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmanın amacı, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve geometrik toleranslar üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu amaç ile deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme, yöntemler ve ekipmanlar hakkındaki detaylı bilgiler bu bölüm içerisinde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

7.1. Mekanik Özellikler ve Yüzey pürüzlülüğü

Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili yapılan çalışmalarda ideal hacimsel enerji yoğunluğu araştırılmıştır. İdeal hacimsel enerji yoğunluğunun belirlenmesinde yapılan deneysel çalışmaların aşamaları kapsamlı olarak Şekil 7.1'de sunulmuştur.



Şekil 7.1. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde yapılan deneysel çalışmanın aşamaları

7.1.1. Kullanılan toz malzeme

Deney parçalarının üretiminde Concept lazer firması tarafından gaz atomize yöntemi ile üretilen AlSi10Mg tozu kullanılmıştır. Tozun kimyasal bileşimi Çizelge 7.1'de ve boyut

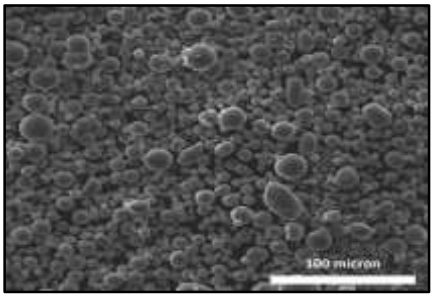
dağılımı Çizelge 7.2'de verilmiştir. Ayrıca kullanılan bu tozun SEM görüntüsü alınmış ve tozun küresel morfolojiye sahip olduğu Resim 7.1'de görülmektedir.

Çizelge 7.1. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi [179]

Element	Ağırlık (%)	Element	Ağırlık (%)
Karbon (C)	<0,005	Kurşun (Pb)	<0,03
Bakır (Cu)	<0,03	Silisyum (Si)	10,3
Demir (Fe)	0,13	Titanyum (Ti)	<0,03
Magnezyum (Mg)	0,38	Çinko (Zn)	<0,03
Mangan (Mn)	<0,03	Kalay (Sn)	<0,03
Nikel (Ni)	<0,03	Alüminyum (Al)	Kalan
Oksijen (O)	0,114		

Çizelge 7.2. AlSi10Mg tozunun ASTM B822'ye göre toz boyut dağılımı [179]

Boyut (µm)	D10	D50	D90	<5
Min.	5	26	45	-
Max.	15	36	55	%10



Resim 7.1. AlSi10Mg alaşımının SEM görüntüsü

7.1.2. Kullanılan eklemeli imalat tezgâhı

Parçaların üretiminde, Gazi Üniversitesi eklemeli imalat teknolojileri uygulama ve araştırma merkezi (EKTAM) bünyesinde bulunan ve SLM sistemi ile donatılmış Concept Laser-M2 CUSING marka 3 boyutlu yazıcı kullanılmıştır (Resim 7.2).



Resim 7.2. Kullanılan eklemeli imalat tezgâhı

Malzeme oksidasyonunu önlemek için imalat ortamı, argon gazı koruyucu atmosferi altında kontrol edilmiştir. Metal yazıcıya ait teknik özellikler Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. İmalat tezgahının teknik özellikleri

Üretim hacmi (cm^3)	250x250x350
Katman kalınlığı (µm)	20-80
Lazer gücü (W)	200 (400 opsiyonel)
Tarama hızı (mm/s)	7000'e kadar
Odak çapı (µm)	50-500
Koruyucu gaz	Argon
CAD arayüzü	STL

7.1.3. İmalat parametreleri

Deneysel çalışmada kullanılan hacimsel enerji yoğunluğunun değer aralığı, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatı ile ilgili yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında imalat parametreleri değişken ve sabit değerler olmak üzere iki grup olarak oluşturulmuştur. Değişken parametreler hacimsel enerji yoğunluğunun hesaplanasında kullanılan lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığıdır.

Çizelge 7.4. Parçaların üretiminde kullanılan imalat parametreleri ve değerleri

Parametre	Değer
Lazer gücü (W)	250-300-350
Tarama hızı (mm/s)	900-1000-1100
Tarama Aralığı (mm)	0,17-0,19-0,21
Katman kalınlığı (mm)	0,03
Lazer ışını odak çapı (mm)	0,1
İşleme yolu stratejisi	67° değişken açılı ızgara tarama
Parçanın üretim yönü	XY
Lazer kaynağının iş parçasından uzaklığı (mm)	800
Lazer verimi (%)	80
Lazer sayısı	1
İmalat platformu sıcaklığı (°C)	30
İmalat odası sıcaklığı (°C)	25-35
İmalat atmosferi (gazı) türü	Argon
İmalat süresi (saat)	2,5

Çalışmada, üç farklı lazer gücü, üç farklı tarama hızı ve üç farklı tarama aralığı değeri belirlenmiştir. Tam faktöriyel olarak çalışıldığında 27 deney yapılacağı ortaya çıkmaktadır. Fakat hem metal esaslı eklemeli imalatın maliyeti hem de mekanik özellikler ile ilgili yapılan çalışmalar ön çalışma niteliğinde olduğundan Taguchi L_9 ortogonal deney dizini kullanılarak

deney sayısı 9'a düşürülmüştür. Çizelge 7.4'te mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde kullanılan parçaların üretimindeki parametreler yer almaktadır. Ayrıca Taguchi L_9 ortogonal deney dizininde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeler

Sembol	Faktörler	Birim	1. seviye	2. seviye	3. seviye
P	Lazer gücü	W	250	300	350
V	Tarama hızı	mm/s	900	1000	1100
H_d	Tarama aralığı	mm	0,17	0,19	0,21

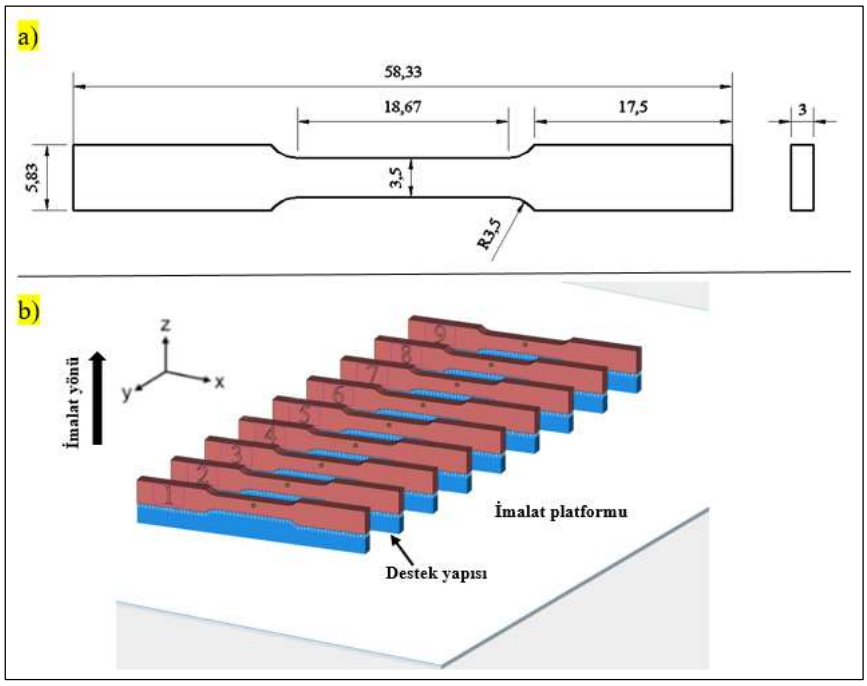
Çizelge 7.5'teki faktörlerden yararlanılarak Taguchi L_9 ortoganal deney tasarımı oluşturulmuş ve parça üretimi Çizelge 7.6'ya göre yapılmıştır.

Çizelge 7.6. Taguchi L_9 ortogonal deney tasarımı

Parça no	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Tarama aralığı (mm)	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)
1	250	900	0,17	54,46
2	250	1000	0,19	43,85
3	250	1100	0,21	36,07
4	300	900	0,19	58,47
5	300	1000	0,21	47,61
6	300	1100	0,17	53,47
7	350	900	0,21	61,72
8	350	1000	0,17	68,62
9	350	1100	0,19	55,82

7.1.4. Parça tasarımı ve üretimi

Hacimsel enerji yoğunluğunun mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin belirlenmesi için ASTM E8 standardına göre çekme numuneleri tasarlandı ve üretildi. İmalat platformu ile numuneler arasında büyük bir gerilimin oluşmasını önlemek ve olası sarkmalara karşı numunelere bir destek yapısı eklenmiştir. Üretilen çekme numunesinin ölçüleri ve imalat platformundaki yerleşimi Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2. a) Çekme numunesinin ölçüleri b) parçaların imalat platformundaki yerleşimi

7.1.5. Çekme testi

Çekme deneyleri, ASTM E8 çekme deneyi standardı esas alınarak yapılmıştır. Deneyler, Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu bünyesinde bulunan CheckWay marka bilgisayar kontrollü ve 20 kN çekme-basma kapasiteli test cihazı ile 1 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir (Resim 7.3).



Resim 7.3. Çekme test cihazı

7.1.6. Sertlik ölçümü

Ortalama mikrosertlik ölçümleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan EMCO-TEST marka mikrosertlik cihazı ile mikro vickers olarak alınmıştır (Resim 7.4). Elmas uç, $HV_{0,2}$ = 200 gf yük ile 10 sn boyunca numunelere basınç uygulamıştır. Her bir numunenin ortalama mikro sertlik değeri, numunelerin 5 farklı noktasından alınan değerlerin aritmetik ortalaması ile elde edilmiştir.



Resim 7.4. Sertlik ölçme cihazı

7.1.7. Yüzey pürüzlülüğü

Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bünyesinde bulunan Mitutuyo SJ-410 marka yüzey pürüzlülüğü cihazı ile 0,8 mm örnekleme uzunluğu, 3,2 mm değerlendirme uzunluğu ve 0,5 mm/s ölçüm hızı kullanılarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Resim 7.5'te gösterildiği gibi numunenin üst yüzeyinden inşa yönü boyunca yapılmıştır. Her numune için ölçümler yüzeyin 5 farklı noktasından alınmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması ile Ra değerleri belirlenmiştir.



Resim 7.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı

7.1.8. Metalografik parça hazırlığı ve mikro yapı

Çekme testi sonucunda oluşan kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenmiştir. Numuneler metalografik inceleme için hassas kesim makinesi ile kesilmiştir. Metalografik incelemeler için zımparalama ve parlatma işlemleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan ve Resim 7.6'da verilen cihazlar kullanılarak yapılmıştır. Zımparalama işlemi 120, 400, 800, 1200 ve 2500 meshlik zımparalar kullanılarak kabadan inceye doğru yapılmıştır. Ardından iyi bir mikro yapı elde edebilmek için numunelerin yüzeyleri 5µm ve 1µm'lik elmas pasta ile parlatılmıştır.



Resim 7.6. Metalografik hazırlıklarda kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı

Dağlama işlemi, Kroll's çözeltisinde (92ml saf su + 6ml nitrik asit + 2 ml hidroflorik asit) 20 saniye süre ile yapılmıştır. Metalografik olarak hazırlanan numunelerin mikro yapıları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan SEM cihazı (JOEL JSM-6060LV) ile incelenmiştir (Resim 7.7).



Resim 7.7. SEM cihazı ve EDS aparatı

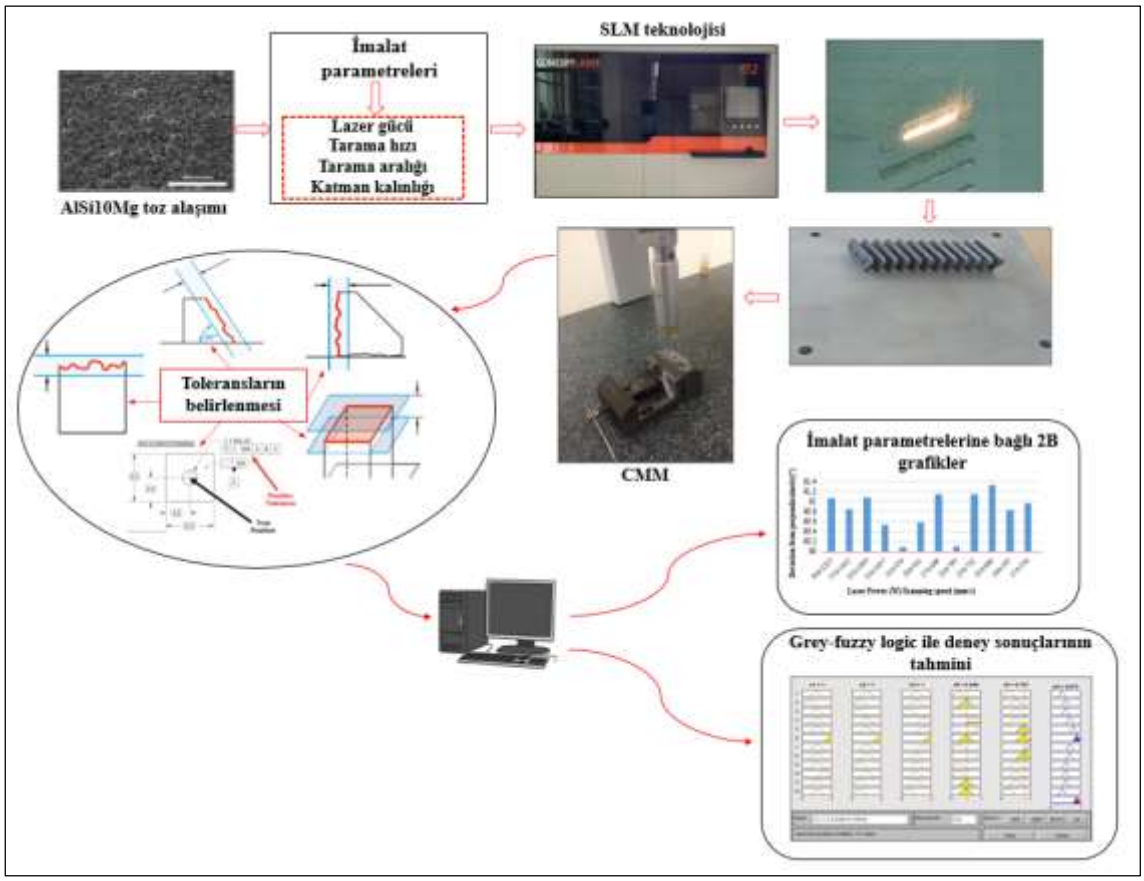
EDS element analizleri ise SEM cihazına bağlı enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak yapılmıştır. Parçaların faz yapısını analiz etmek için X-ışını kırınımı (XRD) ölçümü, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Bruker marka cihaz (D8 Advanced) ile tüm spektrumlar 20°-90° aralığında ve 1°/dak tarama hızında alınmıştır.



Resim 7.8. XRD cihazı

7.2. Geometrik Toleranslar

Geometrik toleransların belirlenmesinde yapılan deneysel çalışmaların aşamaları kapsamlı olarak Şekil 7.3'te sunulmuştur.



Şekil 7.3. Geometrik toleransların belirlenmesinde yapılan deneysel çalışmanın aşamaları

7.2.1. İmalat parametreleri

Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili yapılan çalışmalarda AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatı için en ideal imalat parametreleri, 350 W lazer gücü, 1100 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı ve bu parametrelere karşılık gelen 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğu olarak elde edilmiştir. Bu sonuç ile çalışmanın ilk aşaması olan optimum hacimsel enerji yoğunluğu belirlenmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı kalınarak farklı lazer gücü ve tarama hızının geometrik toleranslar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Parçaların üretiminde kullanılan imalat parametreleri Çizelge 7.7'de verilmiştir. Çizelge 7.7'de belirtilen lazer gücü ve tarama hızı parametrelerinden yararlanılarak deney tasarımı oluşturulmuş ve parçaların üretimi Çizelge 7.8'e göre yapılmıştır.

Çizelge 7.7 Geometrik tolerans parçalarının üretiminde kullanılan imalat parametreleri

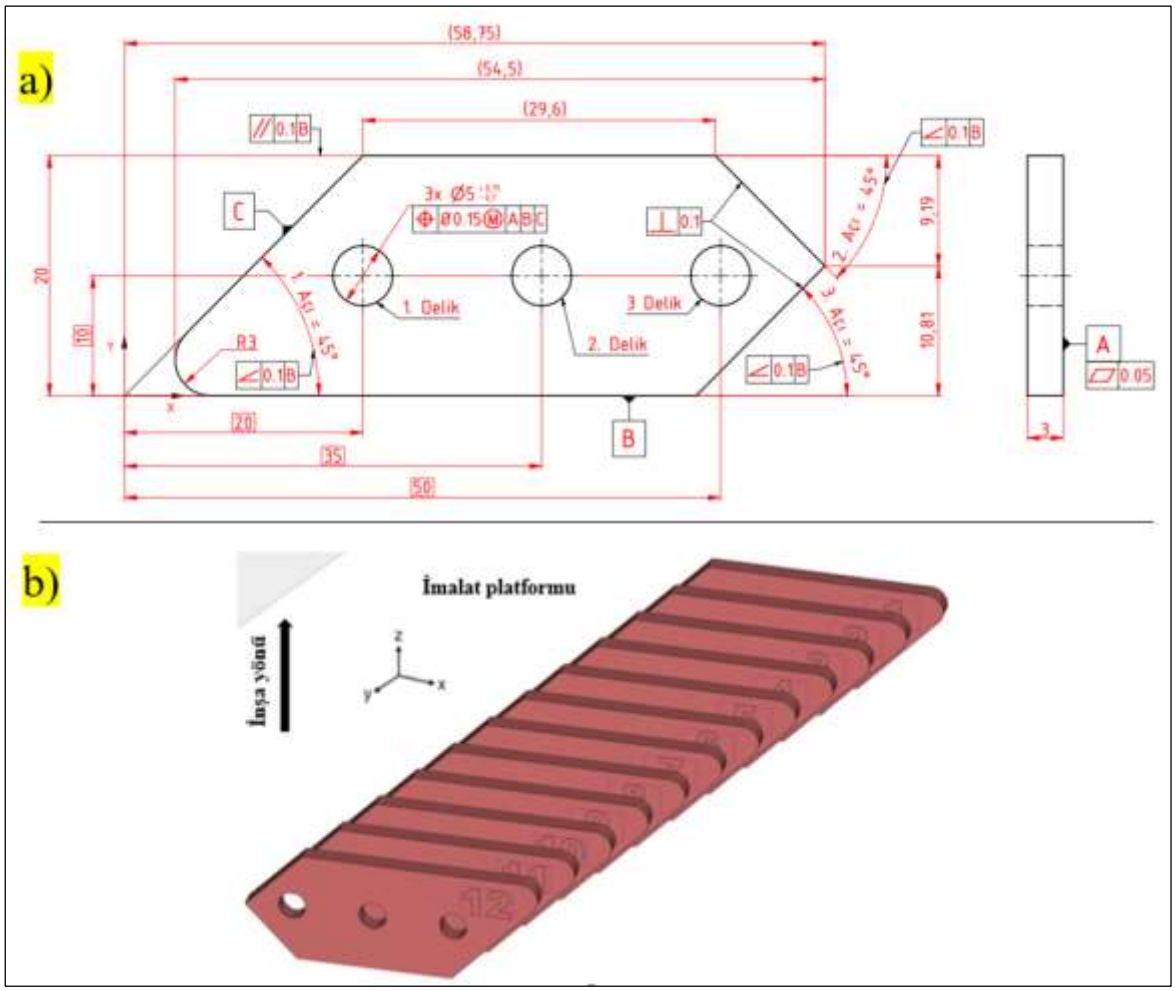
Parametre	Değer
Lazer gücü (W)	125-390
Tarama hızı (mm/s)	392-1257
Tarama Aralığı (mm)	0,19
Katman kalınlığı (mm)	0,03
Lazer ışını odak çapı (mm)	0,1
İşleme yolu stratejisi	67° değişken açılı ızgara tarama
Parçanın üretim yönü	XY
Lazer kaynağının iş parçasından uzaklığı (mm)	800
Lazer verimi (%)	80
Lazer sayısı	1
İmalat platformu sıcaklığı (°C)	30
İmalat odası sıcaklığı (°C)	25-35
İmalat atmosferi (gazı) türü	Argon
İmalat süresi (saat)	5

Çizelge 7.8 Parçaların üretiminde kullanılan deney tasarımı

Parça no	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Tarama aralığı (mm)	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)
1	390	1225	0,19	55,82
2	370	1162		
3	350	1100		
4	330	1037		
5	310	974		
6	290	911		
7	270	848		
8	250	785		
9	230	722		
10	210	660		
11	190	597		
12	170	534		

7.2.2. Parça tasarımı ve üretimi

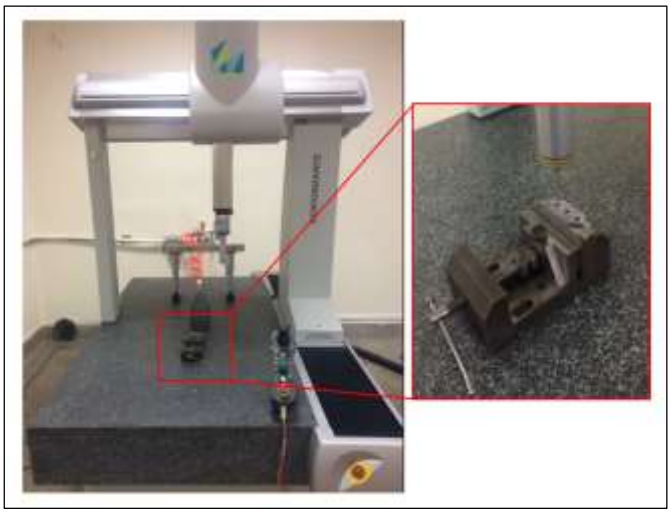
Lazer gücü ve tarama hızının geometrik toleranslar üzerinde etkisinin belirlenmesinde ASME 14,5 standardında kullanılan prizmatik numuneler tasarlandı ve üretildi. Üretilen prizmatik numunelerin ölçüleri ve imalat platformundaki yerleşimi Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.4. a) Geometrik tolerans numunesinin ölçüleri b) parçaların imalat platformundaki yerleşimi

7.2.3. Geometrik toleransların belirlenmesi

Geometrik toleransların araştırılmasında düzlemsellik, paralellik, diklik, açısallık, delik pozisyonları ve delik çap ölçüsü gibi performans özellikleri kullanılmıştır. Geometrik tolerans değerleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bünyesinde bulunan Hexagon marka CMM cihazı ile ölçülmüştür (Resim 7.9).



Resim 7.9. Geometrik toleransların ölçüldüğü CMM cihazı

8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatı ile üretilen numuneler üzerinde hacimsel enerji yoğunluğunun etkisi araştırılmıştır. Yapılan test ve ölçümler sonucunda mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için ideal hacimsel enerji yoğunluğu tespit edilmiştir. İkinci olarak, tespit edilen hacimsel enerji yoğunluğu esas alınarak imalat parametrelerinin (lazer gücü, tarama hızı) geometrik toleranslar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsam dahilinde mekanik özelliklerin ve yüzey pürüzlülüğünün araştırılmasında ASTM E8 standartlarında çekme numuneleri üretilmiştir. Geometrik toleransların araştırılmasında ise ASME Y14,5 standardında kullanılan prizmatik numuneler üretilmiştir. Numunelere uygulanan test ve ölçümler sonucunda elde edilen çekme dayanımı (R_m), akma dayanımı (R_p), ortalama mikro sertlik (HV) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) gibi performans göstergeleri Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları

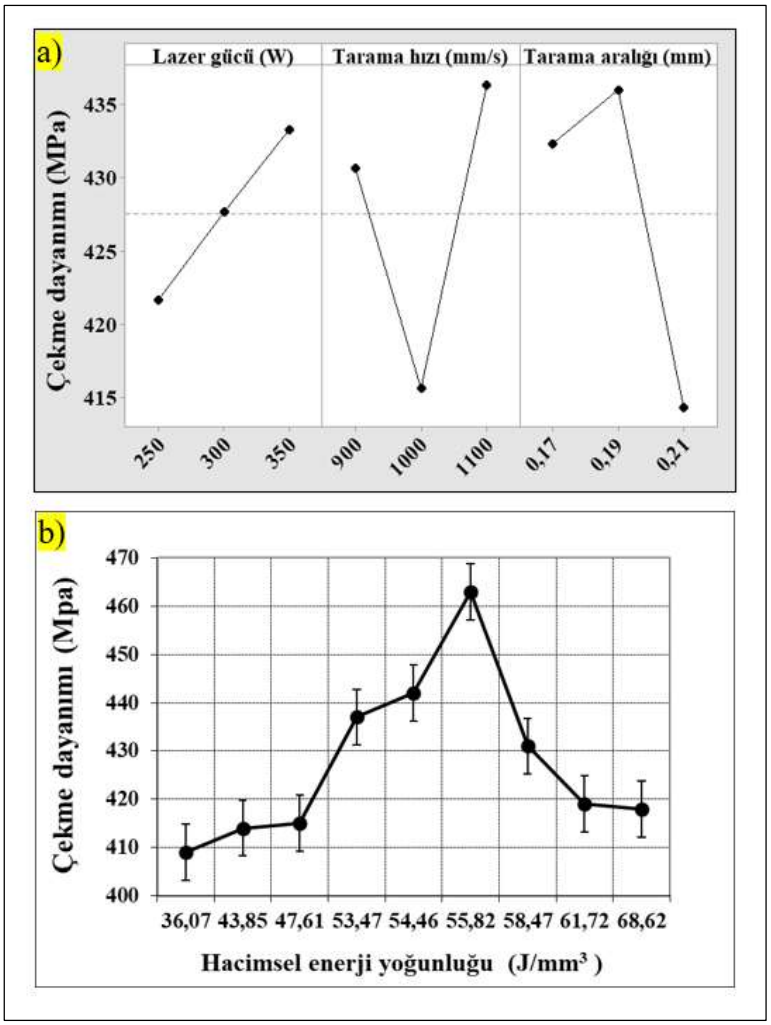
Parça no	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Tarama aralığı (mm)	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Mikro sertlik (HV)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)
1	250	900	0,17	54,46	442	250	110	2,51
2	250	1000	0,19	43,85	414	220	96,8	3,60
3	250	1100	0,21	36,07	409	205	91,16	3,73
4	300	900	0,19	58,47	431	246	97,4	3,34
5	300	1000	0,21	47,61	415	230	97,975	3,50
6	300	1100	0,17	53,47	437	260	106	3,01
7	350	900	0,21	61,72	419	237	95,6	3,49
8	350	1000	0,17	68,62	418	230	93	3,65
9	350	1100	0,19	55,82	463	275	119,56	2,90

8.1. Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü

Deneyler sonucunda elde edilen ve Çizelge 8.1'de verilen sonuçlarla, çekme dayanımı, akma dayanımı, ortalama mikro sertlik ve ortalama yüzey pürüzlülüğü grafikleri oluşturularak sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

8.1.1. Çekme dayanımının değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında çekme dayanımının lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı parametrelerine ve hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı değişimi Şekil 8.1'de verilmiştir.



Şekil 8.1. Çekme dayanımının imalat parametrelerine göre değişimi a) Ana etki grafiği, b) Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği

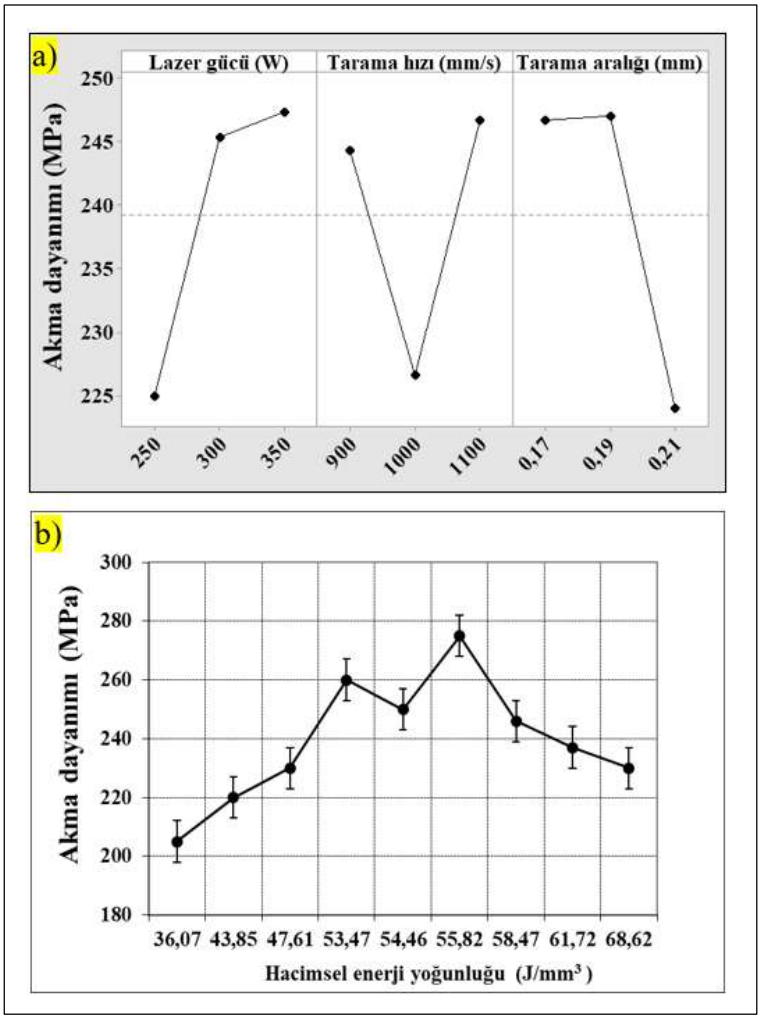
Şekil 8.1.a'daki ana etki grafiği incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı 350 W lazer gücü, 1100 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerlerde tarama gücü ve tarama hızının 3. seviyeleri ile tarama aralığının 2. seviyesidir. Bu üç parametrenin çekme dayanımı üzerindeki etkisini aynı anda değerlendirmek için Şekil 8.1.b'de hacimsel enerji yoğunluğu grafiği verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü üzere en yüksek çekme dayanımı (463 MPa) 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Hirata vd. yaptıkları çalışmada, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında en

yüksek çekme dayanımını değerinin (>450 MPa) 55,6 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edildiğini belirtmişlerdir [180]. Çekme dayanımı 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğu seviyesine ulaşana kadar artan hacimsel enerji yoğunluğu ile belirgin şekilde arttığı ve bu değeri aşan hacimsel enerji yoğunluğu değerlerinde azaldığı görülmektedir. Wu vd. tarafından yapılan çalışmada da AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında benzer bir eğilim gözlemlenmiştir [5]. 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunun maksimum çekme dayanımı için bir eşik değer olduğunu söylenebilir. Bu eşik değerin azalan ve artan değerlerinde çekme dayanımı düşüş ile sonuçlanmıştır. Bu düşüşü yüksek veya düşük hacimsel enerji yoğunluğunda oluşan kusurlarla (yüzey kalitesi, gözeneklilik ve mikro çatlak) ilişkilendirmek mümkündür [181]. Üretilen parçaların çekme dayanımlarının hacimsel enerji yoğunluğuna göre değişimi esas olarak yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilikten kaynaklanmaktadır [182]. Yüzey pürüzlülüğünün farklı değerleri parça yüzeyinde oluşan gerilim dağılımının değişmesine ve beraberinde mekanik özellikler açısından değişkenliğe yol açmaktadır. Mekanik özelliklerdeki düşüşe sebep olan diğer bir etken ise düşük ve yüksek enerji yoğunluklarında katmanlar arasındaki zayıf bağ yapısıdır. Bu zayıf bağ yapısı çok düşük hacimsel enerji yoğunluğunda füzyon eksikliğinden ve çok yüksek hacimsel enerji yoğunluğunda ise yüzey altında sıkışmış gazlardan oluşan anahtar deliği gözenekliliğinden kaynaklanmaktadır. [16]. SLM yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı parçaların geleneksel yöntemlerle (döküm) üretilenlere kıyasla daha iyi mekanik özellikler sergilemektedir. Jawade vd. SLM yöntemi ve döküm yöntemiyle elde edilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların çekme dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların çekme dayanımının (401 MPa) döküm yöntemi ile üretilen parçaların çekme dayanımına (156 MPa) göre daha iyi olduğu görülmüştür. SLM yöntemindeki bu mukavemet artışı ince mikroyapı, tane boyutu ve soğuma hızı ile ilişkilendirilmiştir [183].

8.1.2. Akma dayanımının değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında akma dayanımının lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı parametrelerine ve hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı değişimi Şekil 8.2'de verilmiştir. Şekil 8.2.a'daki ana etki grafiği incelendiğinde, en yüksek akma dayanımı değerinin çekme dayanımında olduğu gibi 350 W lazer gücü, 1100 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerlerde tarama gücü ve tarama hızının 3. seviyeleri ile tarama aralığının 2. seviyesidir. Şekil 8.2.b'deki hacimsel enerji yoğunluğu grafiği incelendiğinde, en yüksek akma dayanımı değeri (275 MPa) 55,82 J/mm^3

hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Öter yaptığı çalışmada, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında maksimum akma dayanımı değerinin (271 MPa) 50 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edildiğini aktarmıştır [21].



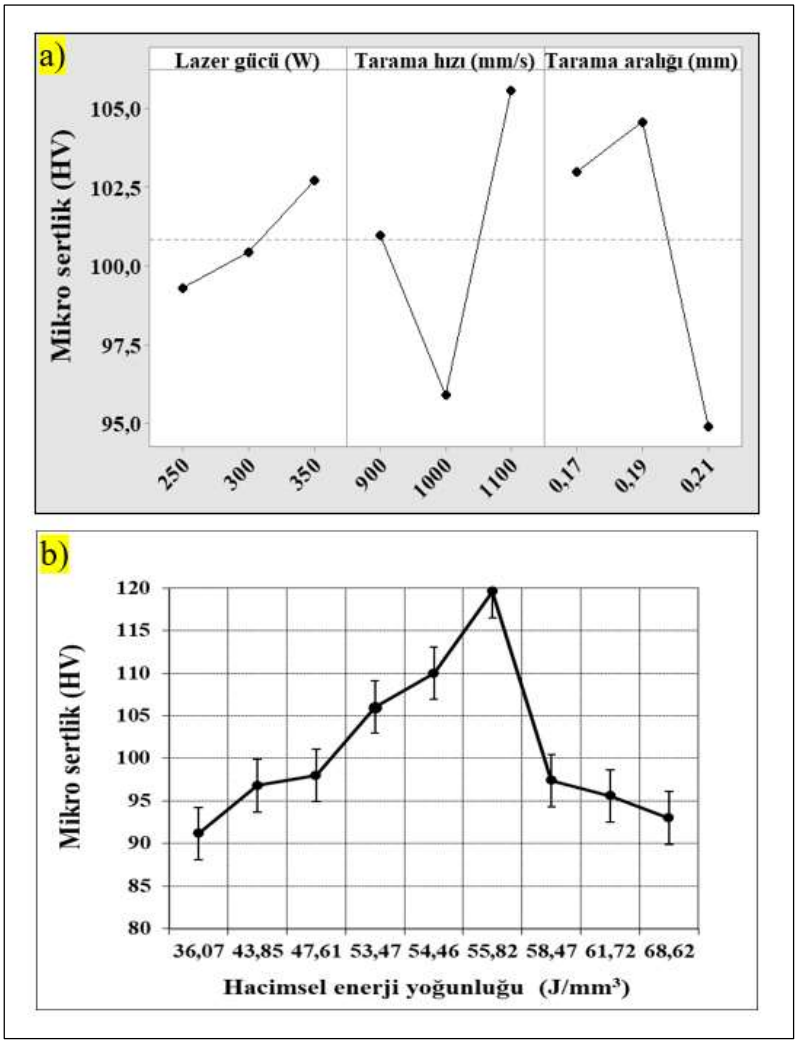
Şekil 8.2. Akma dayanımının imalat parametrelerine göre değişimi a) Ana etki grafiği, b) Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği

Hacimsel enerji yoğunluğu grafiğinde akma dayanımı değerlerinin çekme dayanımı değerleri ile genellikle aynı değişimi gösterdiği ve en yüksek akma dayanımı için de bir eşik değerin olduğu söylenebilir. Read vd. yaptıkları çalışmada, AlSi10Mg alaşımından üretilen parçalarda düşük ve yüksek enerji yoğunluğunda birçok kusurun meydana geldiğini ve bu alaşımın üretilmesinde uygun hacimsel enerji yoğunluğu aralığının (50-60 J/mm^3) olduğunu gözlemlemişlerdir [11]. Akma dayanımındaki azalma düşük hacimsel enerji yoğunluğunda yetersiz ergime nedeniyle sıvı eriyik havuz viskozitesinin düşük olmasına ve beraberinde sıvı metalin yayılmasının zorluğundan kaynaklı gözeneklilikten kaynaklandığı düşünülmektedir [131]. Wang vd. konu ile ilgili çalışmalarında yüksek hacimsel enerji

yoğunluğunda düşük mekanik özelliklerin elde edildiğini ve parçanın kırık yüzeyinde daha büyük ve daha derin çukurların oluştuğunu gözlemlemişlerdir [131]. AlSi10Mg alaşımı geleneksel yöntemler arasında genellikle döküm yöntemi ile üretilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, SLM yönteminin döküm yöntemine göre akma dayanımı açısından üstünlük sağladığı ve bu mukavemet artışının daha ince mikroyapı ve Si fazının ince dağılımı ile ilgili olduğu görülmüştür [145].

8.1.3. Mikro sertliğin değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında mikro sertlik değerinin lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı parametrelerine ve hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı değişimi Şekil 8.3'te verilmiştir.



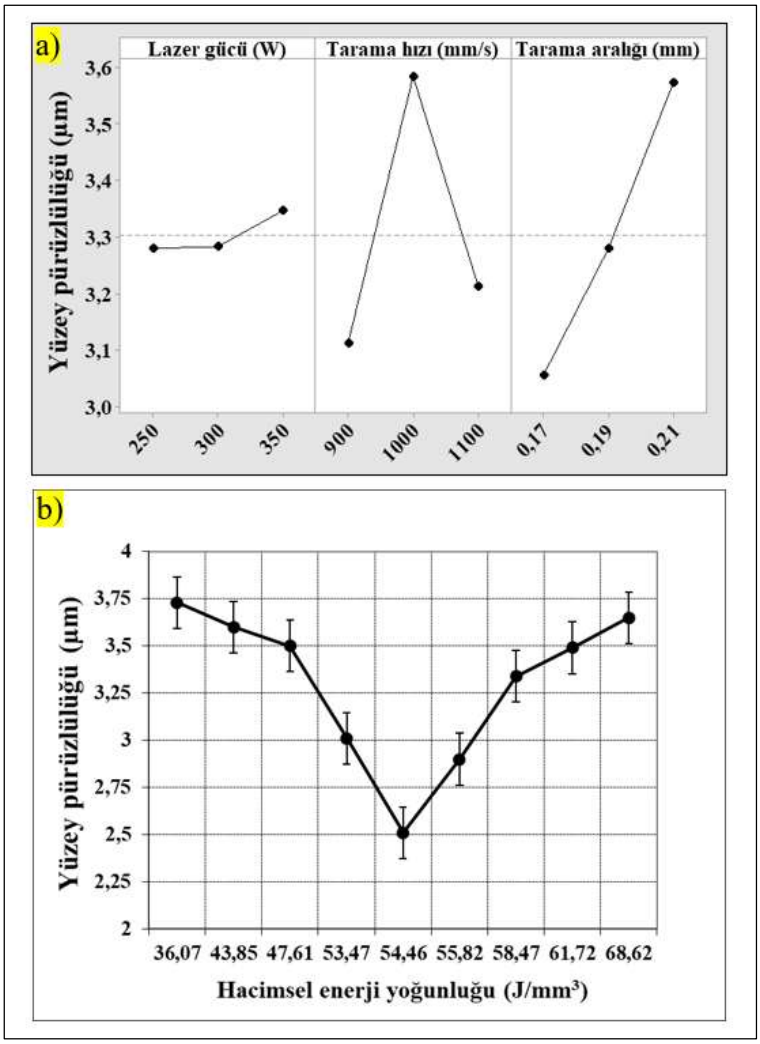
Şekil 8.3. Mikro sertlik değerinin imalat parametrelerine göre değişimi a) Ana etki grafiği, b) Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği

Şekil 8.3.a'daki ana etki grafiği incelendiğinde, en yüksek sertlik değerinin 350 W lazer gücü, 1100 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerlerde lazer gücü ve tarama hızının 3. seviyeleri ile tarama aralığının 2. seviyesidir. Şekil 8.3.b'de farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen parçaların mikro sertlik değerleri gösterilmektedir. Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği incelendiğinde, en yüksek mikro sertlik değeri (119,56 HV) 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğu da akma ve çekme dayanımında olduğu gibi mikro sertlik için de bir eşik değer olduğu söylenebilir. Çünkü bu eşik değerin azalan ve artan değerlerinde mikro sertlik azalmıştır. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda da bu eğilim görülmüştür [21, 184]. Mikro sertlikteki bu azalmalar numunelerin yüzeylerine yük uygulandığında önemli ölçüde çökmeye neden olabilen düşük enerji yoğunluğunda oluşan düşük bağıl yoğunluk ve kaba mikro yapıya neden olan ve mikro sertliği azaltan yüksek enerji yoğunluğunun neden olduğu termal birikim ve aşırı ısınma ile açıklanabilir [185]. Ayrıca hacimsel enerji yoğunluğu ne kadar yüksek ise o kadar fazla sıvı faz oluşmaktadır. Bu durumda metal tozun buharlaşmasına ve yüzey altında birikmiş gazlardan oluşan gözenekliliğine neden olarak mikro sertlik değeri açısından düşüş ile sonuçlanmaktadır [31]. SLM yönteminde hızlı soğumadan kaynaklı daha ince mikroyapı elde edilmektedir. Bu gelişmiş mikroyapı parçaların mukavemet özelliklerini arttırmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, eklemeli imalat yönteminin sertlik bakımından döküm yöntemine göre daha iyi sonuçlar vermiştir [145, 183] .

8.1.4. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında yüzey pürüzlülük değerinin lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı parametrelerine ve hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı değişimi Şekil 8.4'te verilmiştir. Şekil 8.4.a'daki ana etki grafiği incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin 250 W lazer gücü, 900 mm/s tarama hızı ve 0,17 mm tarama aralığı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerler, lazer gücünün, tarama hızının ve tarama aralığının 1. seviyeleridir. Şekil 8.4.b'de farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen parçaların yüzey pürüzlülükleri verilmiştir. Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğü (2,51 μm) 54,46 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğu mekanik özelliklerde olduğu gibi yüzey pürüzlülüğü için de bir eşik değer kabul edilebilir. Bu eşik değerin azalan ve artan değerlerinde yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Düşük hacimsel enerji yoğunluklarında oluşan

yüksek yüzey pürüzlülüğü kısmen erimiş toz parçacıklarının büyük boyutlarda parçanın yüzeyinde oluşmasına atfedilebilir [181]. Sıvı eriyiğin yüksek viskozitesi, düşük hacimsel enerji yoğunluğunun neden olduğu zayıf akışkanlık ve ıslanabilirlik ile sonuçlanmaktadır. Bu durumda zayıf metalurjik bağlanma ve bazı yarı erimiş toz parçacıklarının oluşumuna neden olarak yüksek yüzey pürüzlülüğü ile ortaya çıkmaktadır [186]. Orta hacimsel enerji yoğunluğu değerinde (eşik değer) oluşan düşük yüzey pürüzlülüğü daha yüksek lazer enerji yoğunluğunun daha yüksek eriyik sıcaklığını ve daha iyi yüzey gerilimini ve ıslanabilirliği destekleyerek daha kararlı erimiş havuz ve pürüzsüz yüzey oluşumu ile ilişkilendirmek mümkündür [187].

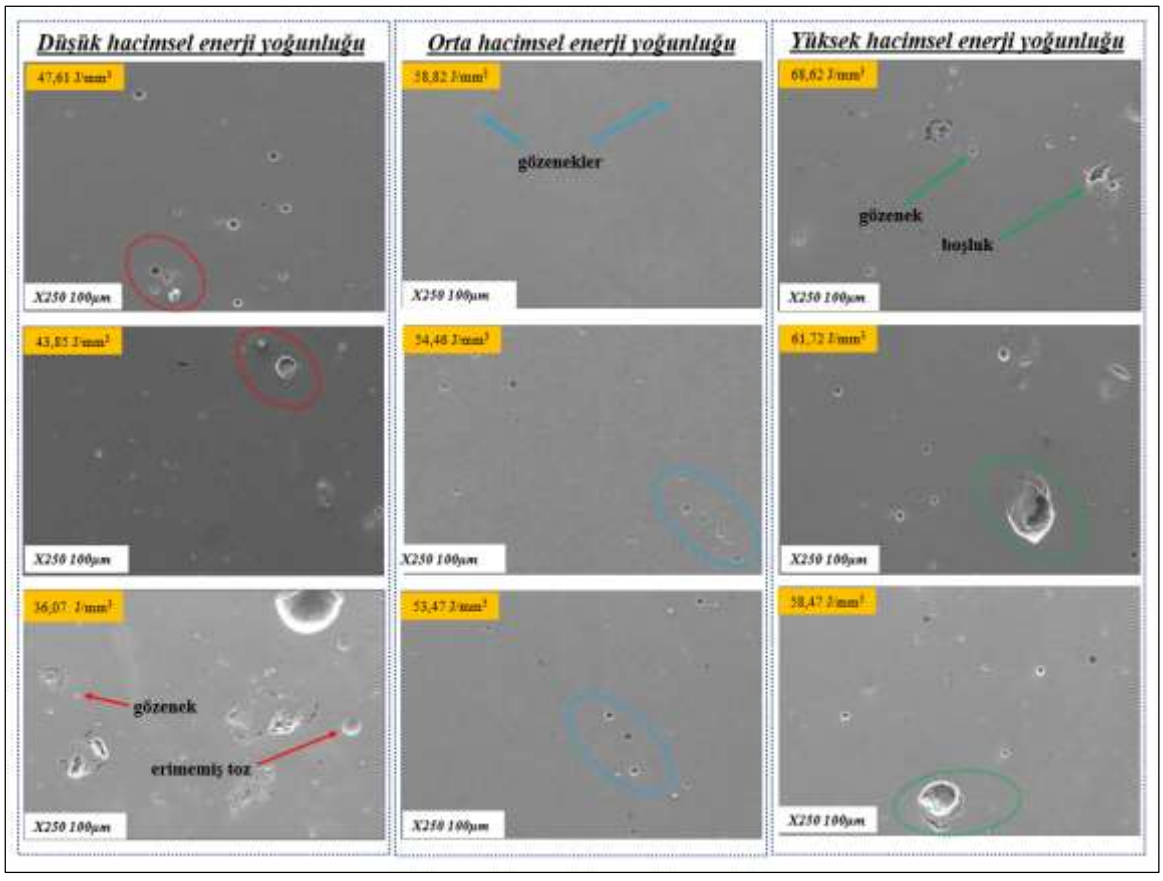


Şekil 8.4. Yüzey pürüzlülük değerinin imalat parametrelerine göre değişimi a) Ana etki grafiği, b) Hacimsel enerji yoğunluğu grafiği

Yüksek hacimsel enerji yoğunluklarında oluşan yüksek yüzey pürüzlülüğü toz alaşımının yüksek sıcaklıklara maruz kalarak aşırı erimenin oluşması ile sıçrama veya toz malzeme kaybı gibi kusurlara bağlanabilir [136].

8.1.5. Hacimsel enerji yoğunluğunun kusurlar ve mikro yapı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüzey görüntüleri Şekil 8.5'te verilmiştir. Düşük hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin yüzeyinde ergimemiş toz ve farklı boyutlarda birçok düzensiz gözenek oluşmuştur. Düşük hacimsel enerji yoğunluklarında füzyon eksikliğinden kaynaklı tozların tamamen ergimediği ve yüzeyde küresel kusurların oluştuğu gözlenmiştir.

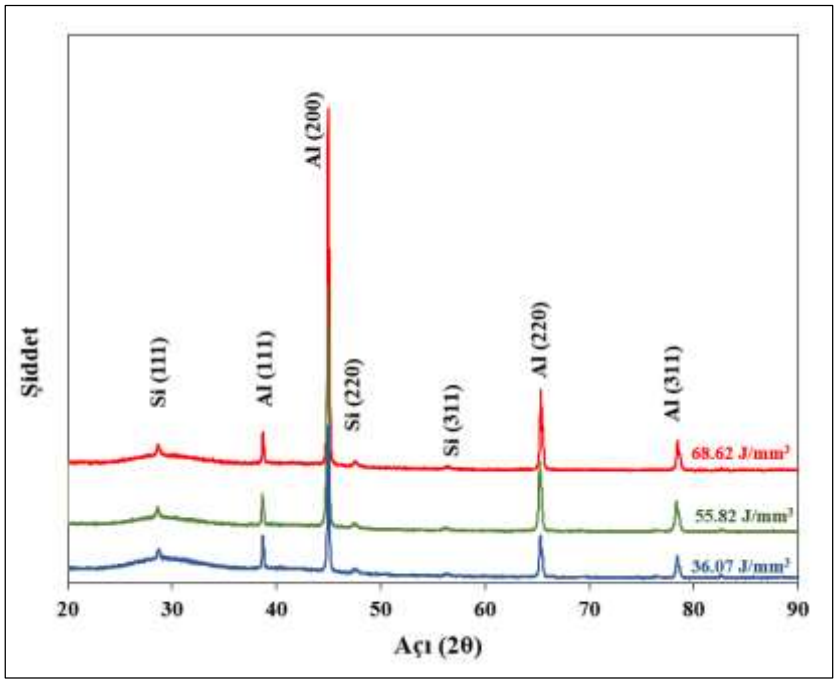


Şekil 8.5. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin yüzey görüntüleri

Orta hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerde daha az küresel parçacıklar ve daha yoğun bir yüzey oluşmuştur. Yüksek hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin yüzeyinde boşluklar ve gözenekler görülmektedir. Yüksek hacimsel enerji

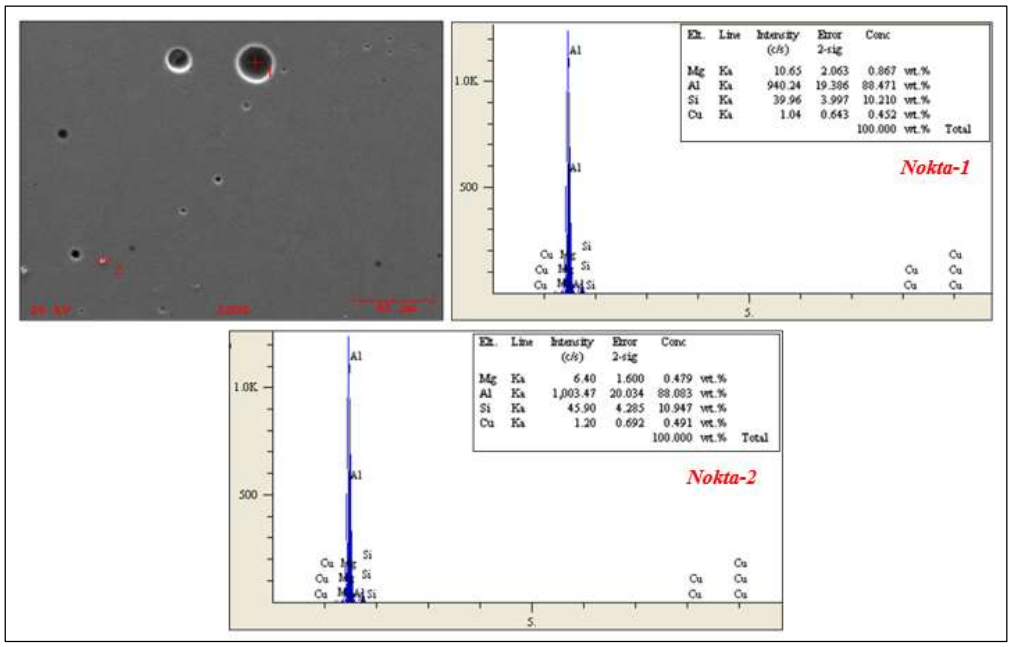
yoğunluğunda metal tozlarının buharlaşması ile sıçraması muhtemeldir. Ayrıca yüzey altında tutulan gazlardan oluşan küçük gözeneklerde yüzey görüntüsünde mevcuttur.

SLM yöntemi ile farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların XRD spektrumları Şekil 8.6'da verilmiştir. XRD spektrumları 20°-90° aralığında ölçülmüştür. SLM yöntemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçalardaki tüm pikler Al ve Si fazı olarak indekslenmiştir. Ayrıca kırınım açısı 2θ = 44,9511 değerinde iken Al (200) fazının karakteristik zirvesi gözlenmektedir. Al fazına kıyasla Si fazının daha düşük pik değeri göstermesi toz alaşımı içerisinde Si içeriğinin daha az olmasına bağlıdır. Hacimsel enerji yoğunluğunun artması ile XRD piklerinde bir artış olduğu görülmektedir. Bu artış tane büyümesi ile ilgilidir. Hacimsel enerjisi yoğunluğundaki azalmayla taneler küçülür ve daha ince bir mikro yapı elde edilir. Bu durum düşük hacimsel enerji yoğunluğunun daha büyük soğuma hızının elde edilmesine ve tane büyümesinin Ostwald olgunlaşmasını tamamlayamayacak kadar yavaş olması ile açıklanabilir [188].

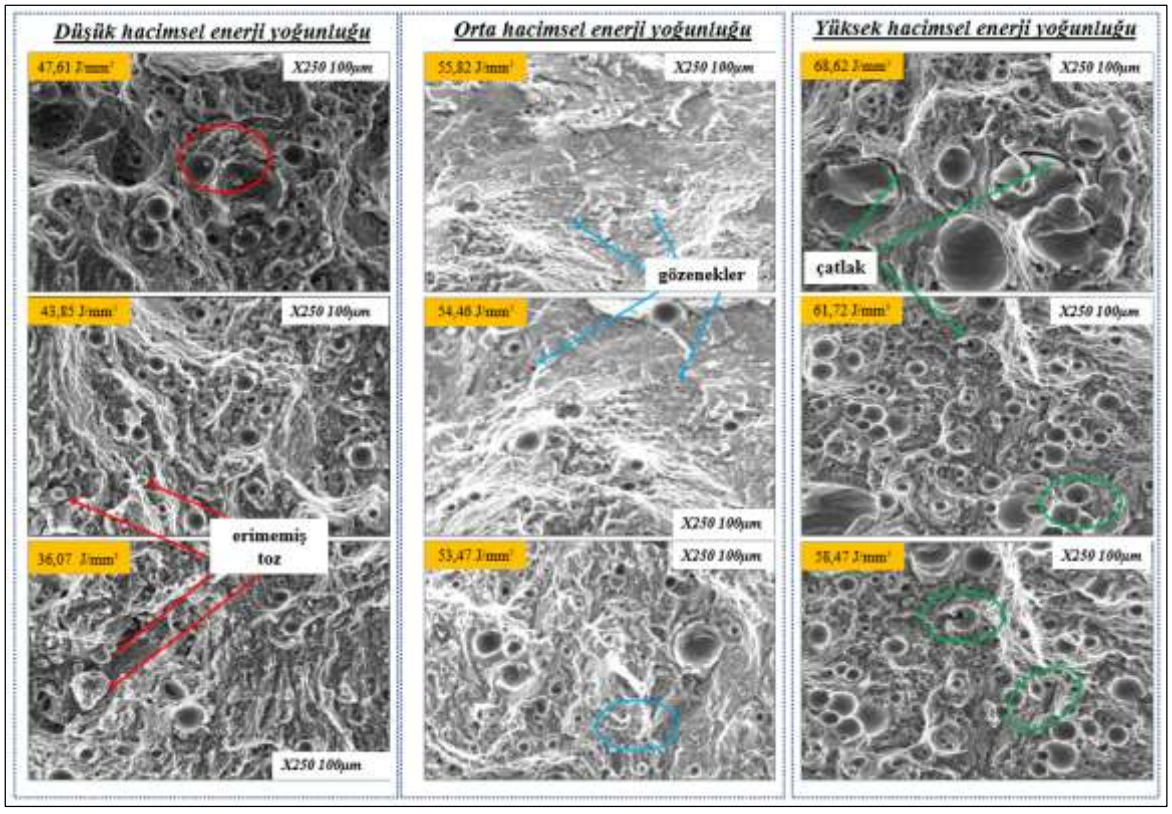


Şekil 8.6. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin XRD desenleri

Düşük hacimsel enerji yoğunluğunda (43,85 J/mm^3) üretilen numunenin belirtilen noktalarından alınan EDS analizi Şekil 8.7'de verilmiştir.



Şekil 8.7. 43,85 hacimsel enerji yoğunluğunda üretilen numunenin EDS analizi



Şekil 8.8. Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin kırık yüzey görüntüleri

Belirtilen noktalarda (nokta-1 ve nokta-2) element kompozisyonu Mg, Al, Si, Cu elementlerinden meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak alaşımın temel bileşimi Al ve Si

elementlerinden oluşmaktadır. Ayrıca XRD analizinde de bu elementlerin baskın olduğu görülmektedir. Yapılan EDS analizi toz malzemenin Çizelge 7. 1'de verilen element bileşimi hakkındaki bilgileri destekler niteliktedir. Şekil 8.8'de farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen çekme numunelerinin kırılma morfolojileri gösterilmektedir. Şekil 8.8'deki kırık yüzeyler incelendiğinde, düşük hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerde ürün mukavemetini etkileyebilecek büyük boyutta ergimemiş toz parçacıkları ve gözeneklerin olduğu görülmektedir. Bu kusurlar, çekme testi sırasında kırılmayı ilerletecek ve hızlandıracak bir gerilme dağılımına sebep olurlar. Bu nedenle düşük hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin düşük mekanik özellikler göstermesi, oluşan kusurların varlığına bağlanabilir. Orta hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin kırık yüzeyinde oluşan gözeneklerin küçük boyutta olduğu görülmektedir. Orta hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin daha iyi olması kusurların daha az ve küçük boyutlarda olması ile ilişkilidir. Yüksek hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerin kırılma yüzeyinde büyük gözenekler ve çatlak oluşumu görülmektedir. Düşük hacimsel enerji yoğunluklarında olduğu gibi kusurların varlığı kırılmayı hızlandırıcı bir etkiye sebep olarak düşük mekanik özellikler ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, kırık yüzeylerin görüntüleri, grafiksel olarak elde edilen mekanik özellikleri de desteklemektedir.

8.1.6. Gri ilişkisel analiz sonuçları

Deneysel sonuçlara göre en yüksek çekme dayanımı (R_m), akma dayanımı (R_p) ve mikrosertlik (HV) değerleri 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda (9. numune) elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra) ise 54,46 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda (1. numune) elde edilmiştir (Çizelge 8.1). Deney tasarımı ve analizine dayalı çalışmalarda özellikle karmaşık işleme yöntemlerinde tek bir yanıt için en uygun koşulların elde edilmesi nispeten daha kolaydır. Ayrıca çoklu yanıt süreçlerinde her yanıt belirli bir düzeyde önemli olduğundan tüm yanıtları aynı anda optimize etmek daha doğru olacaktır. Bu nedenle yanıtları etkileyen parametreleri iyileştirmek için Taguchi'ye dayalı gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışma, çok yanıtlı optimizasyon sürecini eş zamanlı olarak R_m, R_p ve HV'yi en yüksek değere ve Ra'yı en düşük değere indirmeyi hedeflemiştir. Yönteme uygun olarak çekme dayanımı, akma dayanımı ve mikrosertlik değerlerini en yüksek seviyeye getirmek için "büyük iyidir" yaklaşımı, yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için "küçük iyidir" yaklaşımı uygulanmıştır.

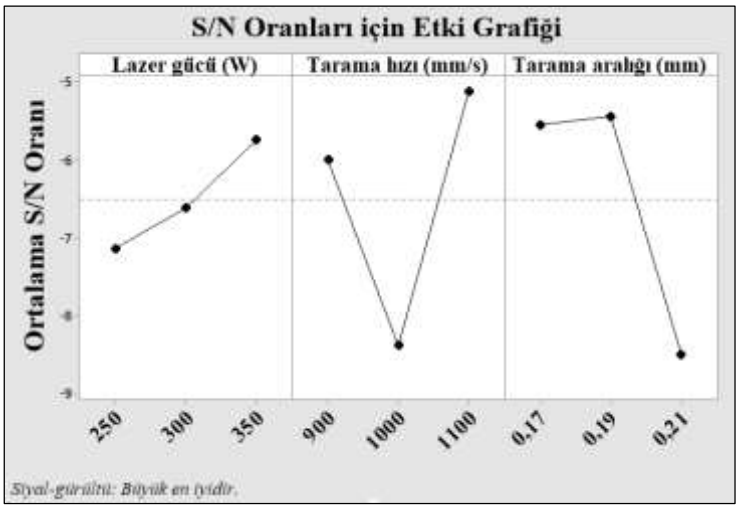
Çizelge 8.2. Gri ilişkisel analiz sonuçları

Parça no	Normalizasyon				Gri ilişkisel katsayı				Gri ilişkisel derece	Sıralama
	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Mikro sertlik (HV)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Mikro sertlik (HV)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)		
1	0,611	0,643	0,663	1,000	0,563	0,583	0,598	1,000	0,686	2
2	0,093	0,214	0,199	0,107	0,355	0,389	0,384	0,359	0,372	8
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	9
4	0,407	0,586	0,220	0,320	0,458	0,547	0,391	0,424	0,455	4
5	0,111	0,357	0,240	0,189	0,360	0,438	0,397	0,381	0,394	6
6	0,519	0,786	0,523	0,590	0,509	0,700	0,512	0,550	0,568	3
7	0,185	0,457	0,156	0,197	0,380	0,479	0,372	0,384	0,404	5
8	0,167	0,357	0,065	0,066	0,375	0,438	0,348	0,349	0,377	7
9	1,000	1,000	1,000	0,680	1,000	1,000	1,000	0,610	0,903	1

Bu kapsamla ilk olarak deneysel sonuçlar Eş. 6.4 ve Eş. 6.5 ile normalleştirilmiştir, ardından Eş. 6.7-6.10 eşitlikleri ile gri ilişkisel katsayılar hesaplanmış ve son olarak, Eş. 6.11 ile gri ilişki derece değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 8.2). Daha yüksek gri ilişkisel derece değeri deney sonuçları ile normalleştirilmiş değerler arasındaki güçlü ilişkiyi gösterir. Burada daha yüksek gri ilişkisel derece imalat parametrelerinin en ideal seviyelere yaklaştığını gösterir. Çizelge 8.2'de görüldüğü üzere gri ilişkisel derecenin maksimum değeri (0,903) 9 numaralı parçada elde edilmiştir. Çizelge 8.3'te gri ilişkisel derece için yanıt tablosu verilmiştir. Bu tabloda her parametreye karşılık gelen maksimum değer, en ideal seviyeyi ifade etmektedir. Şekil 8.9'da da verilen S/N oranları grafiği ile gri ilişkisel derece için ideal imalat parametreleri elde edilebilir. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için en uygun imalat parametreleri 350 W lazer gücü, 1100 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı (*P3-V3-H_d2*) olarak tespit edilmiştir. Son sütundaki delta değerleri (max-min) kontrol faktörleri arasında en önemli olan parametreyi göstermektedir. Ayrıca Çizelge 8.3 'te belirtildiği gibi 9 testin toplam gri ilişki derece ortalaması 0,579 olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.3. Gri ilişkisel derece için yanıt tablosu

Parametre	Seviye			
	1	2	3	max-min
Lazer gücü (W)	0,464	0,472	**0,561**	0,097
Tarama hızı (mm/s)	0,515	0,381	**0,601**	0,220
Tarama aralığı (mm)	0,544	**0,576**	0,377	0,167
GRG'nin toplam ortalama değeri: 0,579				



Şekil 8.9. Gri ilişkisel derece için S/N oranları grafiği

Taguchi metoduna dayalı gri ilişkisel analiz yönteminde son aşama, belirlenen optimum parametrelerin doğrulamasıdır. Doğrulama deneyleri, belirlenen en ideal imalat parametreleri kullanılarak üç adet kontrol deneyi sonucunda elde edilen sonuçların ortalaması alınarak sonuçların güvenirliliği incelenmiştir. Elde edilen test sonuçları Çizelge 8.4'te verilmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, tahmin ve deneysel sonuçlar arasında %0,27'lik bir değer farkı oluşmuştur. Bu fark tahmin edilen gri ilişkisel derece ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, başlangıç parametrelerinden en ideal parametrelere gri ilişkisel derece iyileşmesi 0,171 ve bu değerde %30,15'e karşılık gelmektedir. Sonuç olarak çekme dayanımı, akma dayanımı, mikro sertlik ve yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi uygulanabilir sonuçlar vermiştir.

Çizelge 8.4. Doğrulama deney sonuçları

	Başlangıç parametreleri	Optimum parametreler	
		Tahmin	Deneysel
Seviye	*P2-V1-H_d1*	*P3-V3-H_d2*	*P3-V3-H_d2*
Çekme dayanımı (MPa)	446		457
Akma dayanımı (MPa)	248		265
Mikro sertlik (HV)	114,5		116,655
Yüzey pürüzlülüğü (µm)	3,63		3,06
GRG	0,567	0,740	0,738
Gri ilişkisel derecedeki iyileşme: 0,171			
Gri ilişkisel derecedeki yüzde iyileşme: %30,15			

8.2. Geometrik Toleranslar

Farklı hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen AlSi10Mg alaşımlı numunelerin mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü değerleri çizelge 8.1'de verilmiştir. Gri ilişkisel analiz yöntemi ile mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için ideal hacimsel enerji yoğunluğu değeri 55,82 J/mm^3 olarak belirlenmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı kalınarak farklı lazer gücü ve tarama hızının geometrik toleranslar üzerindeki etkileri araştırılmış ve performans göstergeleri Çizelge 8.5 ve Çizelge 8.6'da verilmiştir.

Çizelge 8.5. Delik konumları ve delik çap ölçü değerleri

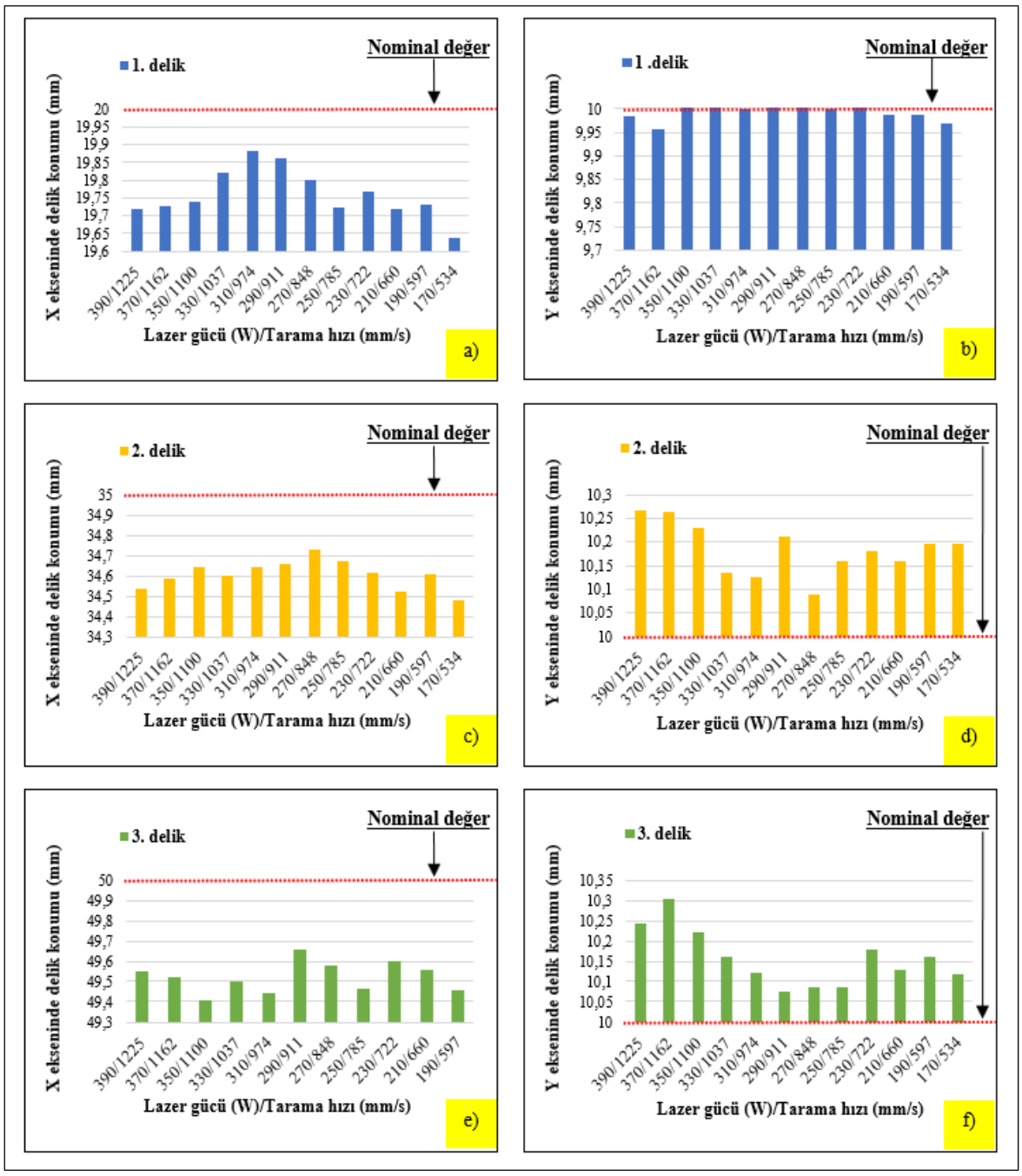
Parça no	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)	Delik konumları ve delik çap ölçüsü								
				1. delik			2. delik			3. delik		
				X konumu (mm)	Y konumu (mm)	Delik çap ölçüsü (mm)	X konumu (mm)	Y konumu (mm)	Delik çap ölçüsü (mm)	X konumu (mm)	Y konumu (mm)	Delik çap ölçüsü (mm)
1	390	1225	55,82	19,718	9,984	4,848	34,534	10,267	4,696	49,551	10,244	4,708
2	370	1162		19,728	9,955	4,881	34,589	10,264	4,752	49,519	10,302	4,633
3	350	1100		19,741	10,039	4,926	34,645	10,231	4,811	49,404	10,22	4,716
4	330	1037		19,82	10,051	4,958	34,6	10,134	4,796	49,501	10,162	4,749
5	310	974		19,88	10	4,962	34,645	10,126	4,767	49,446	10,123	4,751
6	290	911		19,86	10,01	4,974	34,656	10,211	4,823	49,659	10,074	4,904
7	270	848		19,801	10,028	4,976	34,73	10,088	4,9	49,578	10,087	4,793
8	250	785		19,724	10,001	4,975	34,67	10,159	4,912	49,467	10,085	4,769
9	230	722		19,766	10,053	4,928	34,611	10,18	4,84	49,602	10,18	4,771
10	210	660		19,72	9,988	4,926	34,519	10,159	4,829	49,554	10,13	4,888
11	190	597		19,73	9,988	4,916	34,604	10,195	4,749	49,458	10,16	4,77
12	170	534		19,636	9,969	4,829	34,48	10,197	4,734	49,55	10,119	4,778

Çizelge 8.6. Açısallık, diklik, düzlemsellik ve paralellikten sapma değerleri

Parça no	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)	Açısallık, diklik, düzlemsellik ve paralellikten sapma					
				1. açı (°)	2. açı (°)	3. açı (°)	Diklik (°)	Düzlemsellik (mm)	Paralellik (mm)
1	390	1225	55,82	45,506	45,882	45,183	91,07	0,023	0,059
2	370	1162		45,636	45,662	45,186	90,85	0,02	0,045
3	350	1100		45,709	45,887	45,197	91,08	0,037	0,026
4	330	1037		45,552	45,417	45,125	90,54	0,006	0,024
5	310	974		45,37	45,09	45,076	90,08	0,005	0,017
6	290	911		45,017	45,485	45,115	90,59	0,003	0,012
7	270	848		45,544	45,897	45,267	91,15	0,01	0,004
8	250	785		45,432	45,1	45,089	90,1	0,013	0,021
9	230	722		45,618	45.669	45,482	91,14	0,015	0,031
10	210	660		45,487	45,714	45,614	91,32	0,018	0,045
11	190	597		45,769	45,555	45,283	90,83	0,025	0,045
12	170	534		45,649	45,341	45,631	90,97	0,029	0,067

8.2.1. Delik konumlarının değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında, delik konumlarının lazer gücü ve tarama hızı parametrelerine bağlı değişimi Şekil 8.10'da verilmiştir. Şekil 8.10'da verilen X eksenindeki delik konumlarındaki değişim grafikleri incelendiğinde, orijine göre tüm delikler nominal değerden düşük elde edilmiştir.



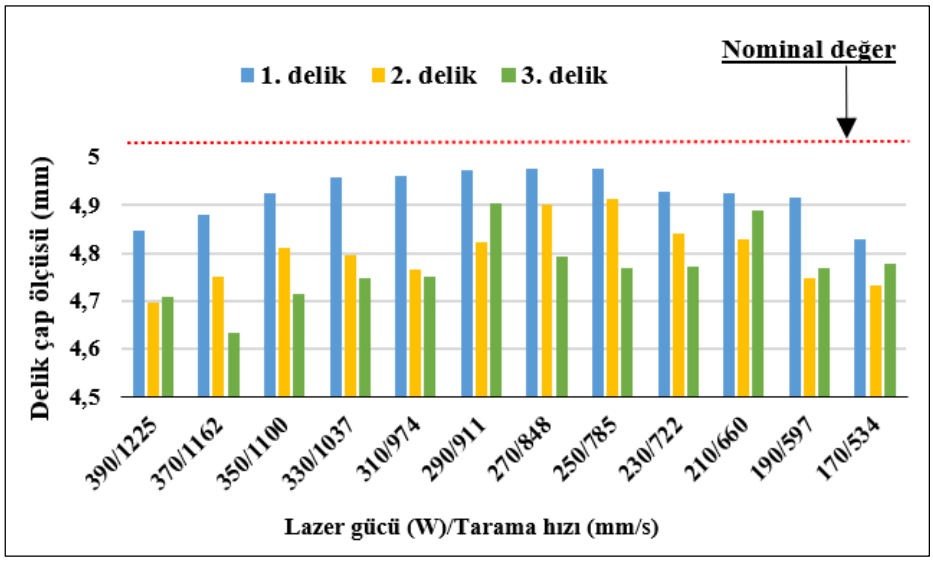
Şekil 8.10. Delik konumlarının imalat parametrelerine göre değişimi

Orijinden uzaklaştıkça 2. ve 3. delik konumlarındaki sapma miktarı 1. deliğe göre daha fazla olmuştur. Deliklerin X ekseni konumundaki en düşük sapma miktarı, 1. delik için 310/974, 2. delik için 270/848 ve 3. delik için 290/911 tarama gücü/tarama hızı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerler de imalat parametrelerinin orta değerleridir. Bu değerlerin artan ve azalan değerlerinde X konumundaki sapma miktarı artmıştır. Deliklerin X eksenindeki konumlarından sapma miktarı belirlenen tolerans aralığı (± 0,15) açısından değerlendirildiğinde, 1. delik 5 ve 6 numaralı parçalarda tolerans değer aralığında kalırken 2. ve 3. delikler tüm parçalarda tolerans değer aralığı dışında kalmıştır. Şekil 8.10'da verilen Y eksenindeki sapma miktarı grafikleri incelendiğinde, orijine göre genel olarak delikler nominal değerden yüksek elde edilmiştir. Deliklerin Y ekseni konumundaki en düşük sapma miktarı X ekseni konumunda olduğu gibi 1. delik için 310/974, 2. delik için 270/848 ve 3. delik için 290/911 tarama gücü/tarama hızı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerler de imalat parametrelerinin orta değerleridir. Bu değerlerin artan ve azalan değerlerinde Y konumundaki sapma miktarı artmıştır. Deliklerin Y eksenindeki konumlarından sapma miktarı, belirlenen tolerans aralığı (± 0,15) bakımından değerlendirildiğinde, 1. delik 12 numaralı parça hariç tüm parçalarda tolerans değer aralığında kalırken, 2. delik 4-5, 7 ve 3. delik 5-8, 10, 12 parçalarda tolerans değer aralığında kalmıştır. İmalat parametrelerinin yüksek ve düşük değerlerinde oluşan yüksek sapmalar, metal tozların ergitme sıcaklığına bağlı olarak uygulanan lazer gücü ve tarama hızının belirli değerler arasında tutulması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu yüksek sapma değerleri düşük lazer gücü/tarama hızı kombinasyonlarında metal tozların tamamen ergiyememesi ile füzyon eksikliği, yüksek lazer gücü/tarama hızı kombinasyonlarında ise eriyik sıçramasından kaynaklı toplanma kusurlarının oluşmasına bağlanabilir [187]. Bu kusurların varlığı eklemeli imalatta kalite göstergesi olarak bilinen bağıl yoğunluğu da etkilemektedir. Bu durum da dolaylı olarak boyutsal sapmalar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

8.2.2. Delik çap ölçülerinin değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında delik çap ölçülerinin, lazer gücü ve tarama hızı parametrelerine bağlı değişimi Şekil 8.11'de verilmiştir. Bu grafikte verilen delik çap ölçü değerleri incelendiğinde, tüm delikler çap değeri bakımından nominal değerden düşük elde edilmiştir. Orijinden uzaklaştıkça 2. ve 3. deliklerdeki çap ölçülerindeki değişim miktarı 1. deliğe göre daha fazla olmuştur. Deliklerdeki en düşük çap değişim miktarı, 1. delik için 270/848, 2. delik için 250/785 ve 3. delik için 290/911 tarama gücü/tarama hızı

kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerler de imalat parametrelerinin orta değerleridir. Bu değerlerin artan ve azalan değerlerinde nominal değere göre sapma miktarı artmıştır.

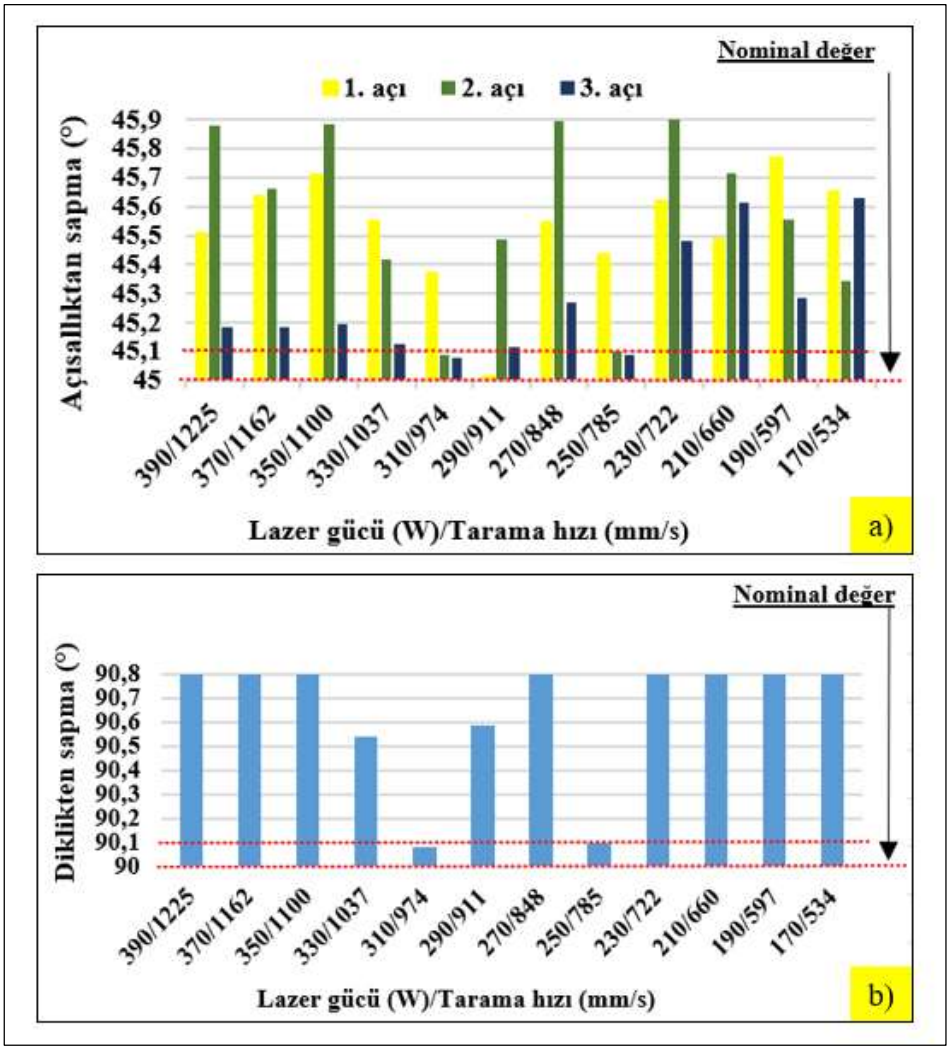


Şekil 8.11. Delik çap ölçülerinin imalat parametrelerine göre değişimi

Deliklerin çap değişim ölçüsü belirlenen tolerans aralığı (-0,1) açısından değerlendirildiğinde, 1. delik 3-11 numaralı parçalarda tolerans değer aralığında kalırken 2. delik 7-8 ve 3. delik 6. parçada tolerans değer aralığında kalmıştır. SLM yönteminde toz malzeme bölgesel olarak ve hızla ergime sıcaklığının üzerinde ısıtılır ve ardından yoğun bir geometri oluşturmak için katılaşmasına ve soğumasına izin verilir. Böylece üretilen parçalarda sürecin doğası gereği iç gerilimler ve bozulmalar meydana gelmektedir. Parça üzerindeki bu olumsuzlukları azalmak için kullanılan en yaygın yaklaşımlardan biri imalat parametrelerinin optimize edilmesidir [189]. Metal esaslı eklemeli imalatta yöntemlerinde boyutsal doğruluğu etkileyen ana parametreler lazer gücü ve tarama hızıdır [190]. Charles vd. ve Zhang vd. lazer gücünün artması ile doğruluğun düşme eğiliminde olduğunu ve yüksek tarama hızlarının kullanılması durumunda boyutsal doğruluğun bir dereceye kadar artırılabileceğini ifade etmişlerdir [191, 192]. İmalat parametrelerinin orta değerlerdeki çap değişimi değerlerinin daha az olması, daha düşük büzülme etkilerine yol açan küçük ergime havuzlarının oluşmasına ve dolayısıyla boyutsal doğruluğun daha yüksek olmasına atfedilebilir.

8.2.3. Açısallıktan ve diklikten sapmanın değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında açısallıktan ve diklikten sapmanın, lazer gücü ve tarama hızı parametrelerine bağlı değişimi Şekil 8.12'de verilmiştir. Bu şekildeki açısallıktan sapma grafiği incelendiğinde, tüm açı değerleri nominal değerden büyük elde edilmiştir. Açısallık değerlerindeki en düşük sapma miktarı, 1. açı için 290/911, 2. ve 3. açılar için 310/974 tarama gücü/tarama hızı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerler de en düşük delik konum ve delik çap ölçüsü değerlerinde de olduğu gibi imalat parametrelerinin orta değerleridir. Açısallık değerleri, genel olarak tarama gücü/tarama hızı kombinasyonun yüksek ve düşük değerlerinde yüksek sapma miktarı ile sonuçlanmıştır.



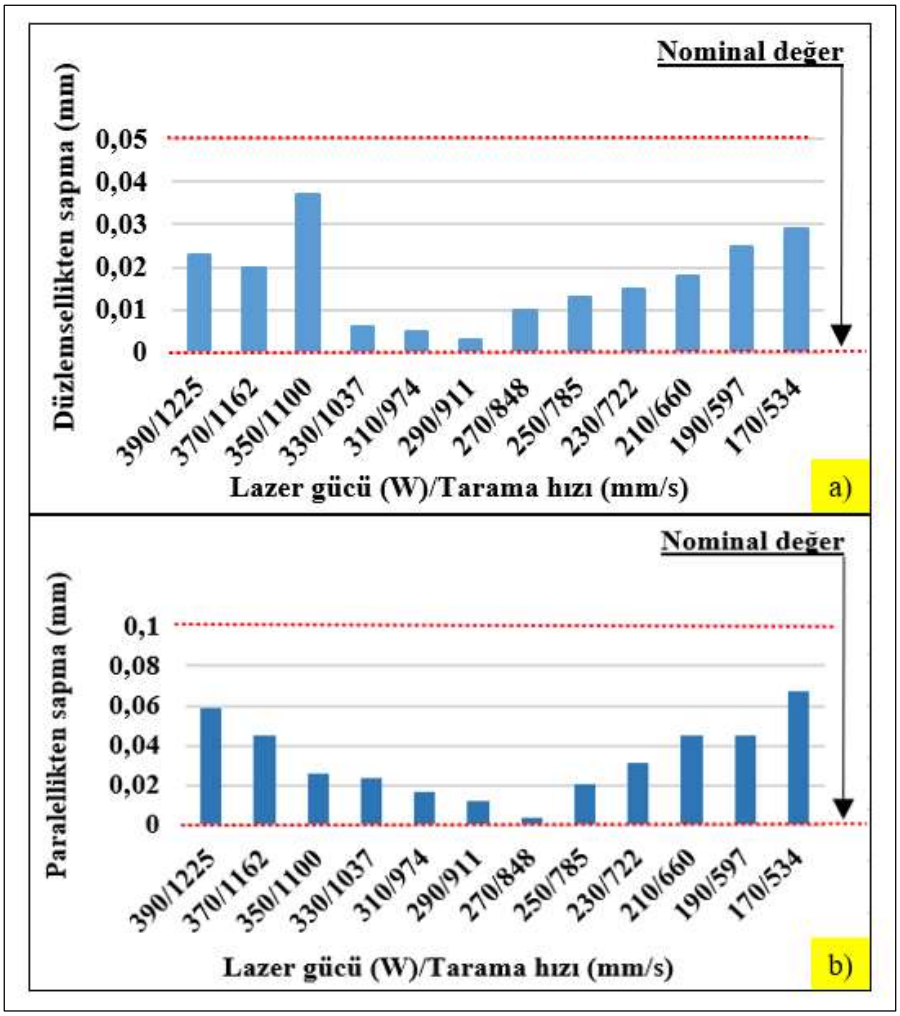
Şekil 8.12. Açısallıktan ve diklikten sapmanın imalat parametrelerine göre değişimi

Açısallıktan sapma miktarı belirlenen tolerans aralığı (0,1) açısından değerlendirildiğinde, 1. açı değeri 6 numaralı, 2. ve 3. açı değerleri 5 ve 8 numaralı parçalarda istenilen tolerans değer aralığında elde edilmiştir. Şekil 8.12.b'deki diklikten sapma grafiği incelendiğinde, diklik değerleri nominal değerden büyük elde edilmiştir. Diklik değerlerindeki en düşük sapma miktarları 310/974 ve 250/785 tarama gücü/tarama hızı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değerler de açısallık değerlerinde de olduğu gibi imalat parametrelerinin orta değerleridir. Diklik değerleri, 2 ve 3 numaralı açı değerleri ile bağlantılıdır. Bu nedenle açısallık değerlerindeki değişim, diklik değerlerini etkilemiştir. Diklik değerlerindeki en düşük sapma miktarının elde edildiği imalat parametrelerinde açısallık değerlerinde de en düşük sapma elde edilmiştir. Genel olarak tarama gücü/tarama hızı kombinasyonun yüksek ve düşük değerlerinde diklikten sapma açısallıktan sapmaya benzer bir eğilim göstermiştir. Diklikten sapma miktarı belirlenen tolerans aralığı (0,1) açısından değerlendirildiğinde, 5 ve 8 numaralı parçalarda istenilen tolerans değer aralığı elde edilmiştir. Eklemeli imalat prosesi ile üretilen parçalardaki boyutsal doğruluğa etki eden faktörlerden biri de aşırı ve anizotropik kalıntı gerilmelerdir. Lazer tabanlı eklemeli imalatta erime ve katılaşma söz konusu olduğundan artık gerilmelerin birincil nedeni bölgesel ısıtmanın neden olduğu büyük termal gradyanlardır [193]. Düzensiz sıcaklık dağılımı parçaların farklı oranlarda genişlemesine ve büzülmesine neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda, şekil doğruluğunu doğrudan etkileyen daha ince yapılar ve ince katmanlar üretmenin daha küçük bir ergitme havuzu ile elde edilebileceği, uygun lazer parametrelerinin kullanılması ile büzülme, çukur ve gözenek sorunlarının azaltılabileceği belirtilmiştir [194]. Liu vd. daha düşük enerji girişinin ve daha kısa tarama çizgisi uzunluğunun, parçalarda daha küçük kalıntı gerilmeye neden olduğunu belirtmişlerdir [124]. Simson vd. SLM ile üretilen 316 L paslanmaz çelik parçalarda enerji girişinin artması ile daha yüksek kalıntı gerilim oluştuğunu aktarmışlardır [194]. Açısallıktan ve diklikten sapma değerleri imalat parametrelerinin yüksek değerlerinde oluşan sapmaların kalıntı gerilmelerden kaynaklı boyutsal sapmalarla (büzülme, çarpılma) ve imalat parametrelerinin düşük değerlerinde oluşan sapmaların ise füzyon eksikliğinden kaynaklı kusurların oluşması ile açıklanabilir.

8.2.4. Düzlemsellikten ve paralellikten sapmanın değerlendirilmesi

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında, düzlemsellikten ve paralellikten sapmanın lazer gücü ve tarama hızı parametrelerine bağlı değişimi Şekil 8.13'te verilmiştir. Şekil 8.13.a'daki düzlemsellikten sapma grafiği incelendiğinde, düzlemsellik değerleri tüm imalat

parametrelerinde nominal değere göre sapma tespit edilmiştir. Düzlemsellik değerlerindeki en düşük sapma miktarı 290/911 tarama gücü/tarama hızı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu değer de değerlendirilen diğer performans çıktıları için ideal olan imalat parametreleri aralığının olduğu orta değerler arasındadır. Düzlemsellik değerleri, genel olarak tarama gücü/tarama hızı kombinasyonun yüksek ve düşük değerlerinde artmıştır. Ancak diğer performans çıktılarında olduğu gibi yüksek sapma miktarları ile sonuçlanmamıştır. Düzlemsellikten sapma miktarı belirlenen tolerans değeri (0,05) açısından değerlendirildiğinde, tüm parçalarda istenilen tolerans değerini aşmadığı ve imalat parametrelerinin tüm kombinasyonlarında düşük sapma değerleri elde edilmiştir.



Şekil 8.13. Düzlemsellikten ve paralellikten sapmanın imalat parametrelerine göre değişimi

Şekil 8.13.b'deki paralellikten sapma grafiği incelendiğinde, paralellik değerleri tüm imalat parametrelerinde nominal değere göre sapma tespit edilmiştir. Paralellik değerlerindeki en düşük sapma miktarları 270/848 tarama gücü/tarama hızı kombinasyonunda elde edilmiştir.

Bu değer de imalat parametrelerinin orta değeridir. Paralellikten sapma değerleri imalat parametrelerinin orta değerlerinde en düşük değerlerde iken, imalat parametrelerin artan ve azalan değerlerinde artmıştır. Paralellikten sapmadaki bu eğilim, düzlemsellik ile benzer davranış sergilemiştir. Paralellikten sapma miktarı, belirlenen tolerans değeri (0,1) açısından değerlendirildiğinde, düzlemsellikten sapma değerlerinde olduğu gibi tüm parçalarda istenilen tolerans değerini aşmadığı ve imalat parametrelerinin tüm kombinasyonlarında düşük sapma değerleri elde edilmiştir. Metal esaslı eklemeli imalatta yüzey pürüzlülüğü büyük ölçüde lazer işleme parametrelerine ve eriyik havuzu kontrolüne bağlıdır [195]. Brecher vd. tarama gücünün çok yüksek değerlerinde eriyik havuzundaki aşırı enerji yoğunluğunun toz sıçramasına neden olduğunu ve bunun da nispeten zayıf bir yüzey kalitesine yol açabileceğini öne sürmüşlerdir [196]. Ayrıca düşük enerji girişi ile kısmen erimiş toz parçaçıklarının parça yüzeyinde oluşması ile düşük yüzey kalitesi elde edilmektedir [181]. Düzlemsellikten ve paralellikten sapma değerleri imalat parametrelerinin yüksek ve düşük değerlerinde oluşan yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilebilir.

8.2.5. Gri ilişkisel analiz destekli bulanık mantık sonuçları

Bu çalışmada, deneysel olarak elde edilen verilerle bulanık mantık tahmin modelinin sonuçları karşılaştırılarak modelin doğruluğunun ve geçerliliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, gri bulanık mantık yöntemi kullanılarak AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında delik çap ölçüsü, açısallıktan sapma, diklikten sapma, düzlemsellikten sapma ve paralellikten sapma gibi çoklu performans özelliklerinin en aza indirilmesini sağlamak için ideal imalat parametrelerinin belirlenmesine odaklanılmıştır. Delik çap ölçüsü için 3. delik çap değeri ve açısallıktan sapma için 1. açı değeri dikkate alınmıştır. Gri ilişkisel analiz çoklu çıktılar arasındaki karmaşık yapıyı optimize etmek için kullanılmaktadır. Gri ilişkisel analiz yönteminde ilk olarak deneysel çalışmadan elde edilen delik çap değeri, paralellikten sapma, açısallıktan sapma, diklikten sapma ve düzlemsellikten sapma gibi performans özellikleri normalleştirilmiş değerlere dönüştürülmüştür. Bu dönüşümün amacı, değişkenliği ortadan kaldırmak ve performans özelliklerini 0-1 arasında karşılaştırılabilir bir aralığa getirmektir. Delik çap ölçü değerleri nominal değerden daha düşük elde edilmiştir. Bu yüzden delik çap ölçüsünün normalizasyonunda ‘büyük iyidir’ yaklaşımı kullanılmıştır. Diğer performans çıktı değerleri nominal değerlere göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu yüzden normalizasyon işleminde ‘küçük iyidir’ yaklaşımı

uygulanmıştır. Bu yaklaşımlar eş zamanlı olarak kullanıldığında elde edilen optimum değerde bir miktar belirsizlik oluşmaktadır. Bu belirsizlik bulanık mantık metodu ile aşılmaktadır. Gri-bulanık mantık metodunun en önemli avantajı belirsiz, eksik ve bilinmeyen bilgilere sahip sistemlere uygulanabilmesidir. Bu nedenle bu çalışmada gri-bulanık mantık yöntemi tercih edilmiştir. Normalize edilmiş değerler Çizelge 8.7'de verilmiştir. Normalize edilmiş değerlerin birden çıkarılması ile sapma değerleri elde edilmiştir. Ardından gri ilişkisel katsayılar (GRC) hesaplanmıştır (Çizelge 8.8). Son olarak gri ilişkisel katsayının ortalaması alınarak gri ilişkisel dereceler (GRG) hesaplanmıştır (Çizelge 8.8).

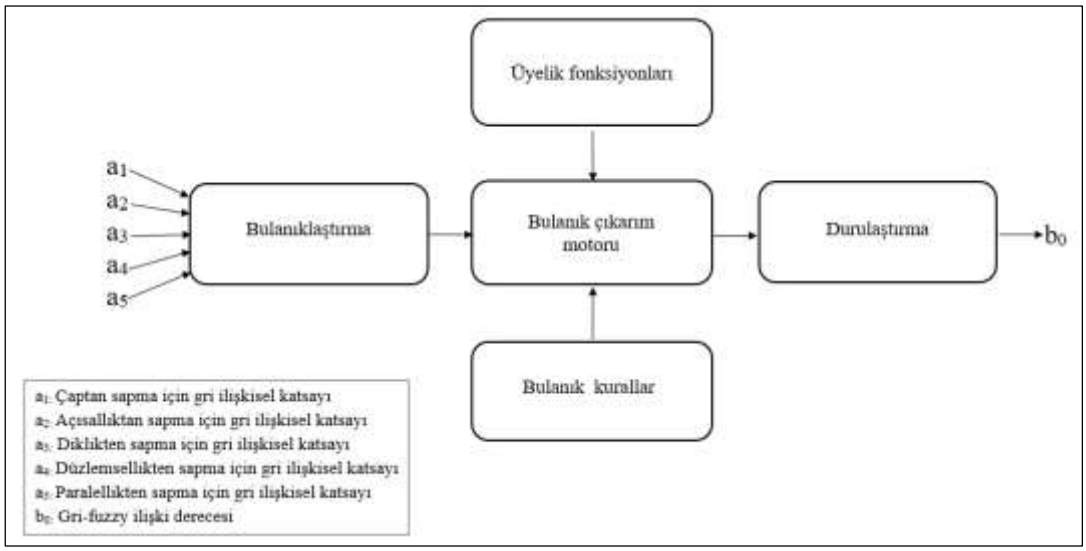
Çizelge 8.7. Performans çıktıları için normalizasyon sonuçları

Parça no	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)	Normalizasyon				
				Delik çap ölçüsü (mm)	Açısallıktan sapma (°)	Diklikten sapma (°)	Düzlemsellik sapma (mm)	Paralellikten sapma (mm)
1	390	1225	55,82	0,2768	0,3497	0,2016	0,4118	0,1270
2	370	1162		0,0000	0,1769	0,3790	0,5000	0,3492
3	350	1100		0,3063	0,0798	0,1935	0,0000	0,6508
4	330	1037		0,4280	0,2886	0,6290	0,9118	0,6825
5	310	974		0,4354	0,5306	1,0000	0,9412	0,7937
6	290	911		1,0000	1,0000	0,5887	1,0000	0,8730
7	270	848		0,5904	0,2992	0,1371	0,7941	1,0000
8	250	785		0,5018	0,4481	0,9839	0,7059	0,7302
9	230	722		0,5092	0,2008	0,1452	0,6471	0,5714
10	210	660		0,9410	0,3750	0,0000	0,5588	0,3492
11	190	597		0,5055	0,0000	0,3952	0,3529	0,3492
12	170	534		0,5351	0,1596	0,2823	0,2353	0,0000

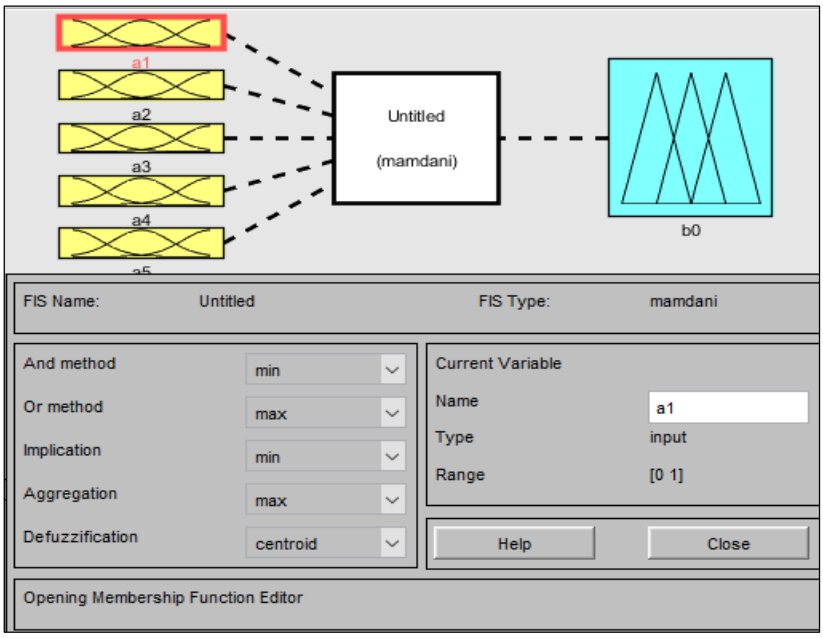
Çizelge 8.8. Performans çıktıları için gri ilişkisel katsayı, derece ve sıralama sonuçları

Parça no	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)	Gri ilişkisel katsayı					Gri ilişkisel derece	Sıralama
				Delik çap ölçüsü (mm)	Açısallıktan sapma (°)	Diklikten sapma (°)	Düzlemsellik sapma (mm)	Paralellikten sapma (mm)		
1	390	1225	55,82	0,4087	0,4347	0,3851	0,4595	0,3642	0,4104	11
2	370	1162		0,3333	0,3779	0,4460	0,5000	0,4345	0,4183	9
3	350	1100		0,4189	0,3521	0,3827	0,3333	0,5888	0,4152	10
4	330	1037		0,4664	0,4127	0,5741	0,8500	0,6117	0,5830	5
5	310	974		0,4697	0,5158	1,0000	0,8947	0,7079	0,7176	2
6	290	911		1,0000	1,0000	0,5487	1,0000	0,7975	0,8692	1
7	270	848		0,5497	0,4164	0,3669	0,7083	1,0000	0,6083	4
8	250	785		0,5009	0,4753	0,9688	0,6296	0,6495	0,6448	3
9	230	722		0,5047	0,3849	0,3690	0,5862	0,5385	0,4766	7
10	210	660		0,8944	0,4444	0,3333	0,5313	0,4345	0,5276	6
11	190	597		0,5028	0,3333	0,4526	0,4359	0,4345	0,4318	8
12	170	534		0,5182	0,3730	0,4106	0,3953	0,3333	0,4061	12

Yapılan bu dönüşümler sonucunda sistemin girdilerini gri ilişkisel katsayılar (GRC) çıktısını ise gri ilişkisel derece (GRG) oluşturmuştur.Bulanık mantık sistemi Matlab yazılımı, Fuzzy Logic Toolbox kullanılarak hazırlanmıştır. Kullanım kolaylığı ve tek çıktılı sistemlerdeki hesaplama yeteneği nedeniyle çalışmada Mamdani çıkarım yöntemi kullanılmıştır (Şekil 8.15). Bu nedenle bulanık mantık analizi gri ilişkisel analiz yöntemi ile birleştirilmiştir. Bulanık mantık sisteminde gauss, üçgen ve yamuk gibi üyelik fonksiyonları yaygın olarak kullanılma ve bu fonksiyonların seçimi oldukça önemlidir. Üçgensel üyelik fonksiyonu kullanılarak yapılan birçok çalışmada deneysel ve tahmin sonuçları arasındaki hata yüzdesinin düşük olduğu görülmüştür [197, 198]. Bu nedenle çalışmada üçgensel üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bulanık mantık analizinde bulanıklaştırıcı önce gri ilişkisel katsayıyı bulanıklaştırmak için üyelik fonksiyonlarını kullanır. Çıkarım motoru daha sonra bulanık bir değer oluşturmak için bulanık kurallar üzerinde bir bulanık çıkarım gerçekleştirir. Son olarak durulaştırıcı bulanık değeri gri-bulanık ilişki derecesine dönüştürür. Gri ilişkisel analiz yöntemi ile ele alınan çoklu performanslar özellikleri Şekil 8.14'te gösterildiği gibi beş girdili ve bir çıktılı bulanık sistem olarak oluşturulmuştur. Gri-fuzzy ilişki derecesi (b_0) bulanık mantık yöntemine göre belirlenmiştir. Gri ilişkisel katsayılar (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) bulanık mantık sisteminin girdileri iken Gri-fuzzy ilişki derecesi (b_0) sistemin çıktısıdır.



Şekil 8.14. Beş girdili ve bir çıktılı bulanık mantık yapısı

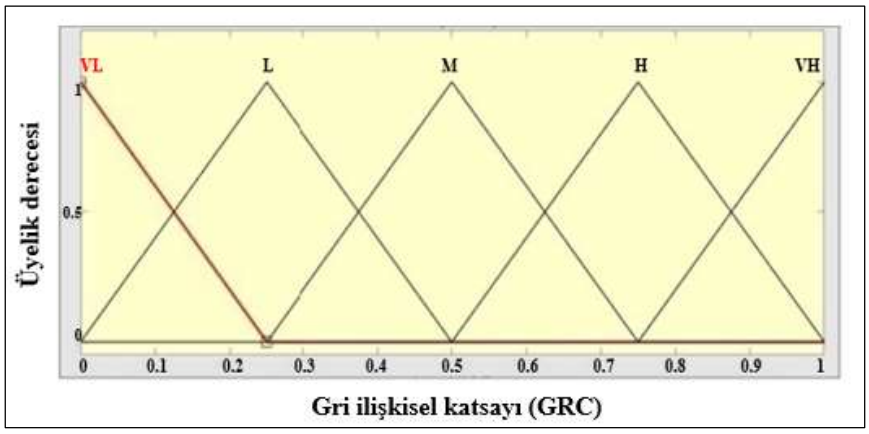


Şekil 8.15. Bulanık mantık (Mamdani) ağ yapısı

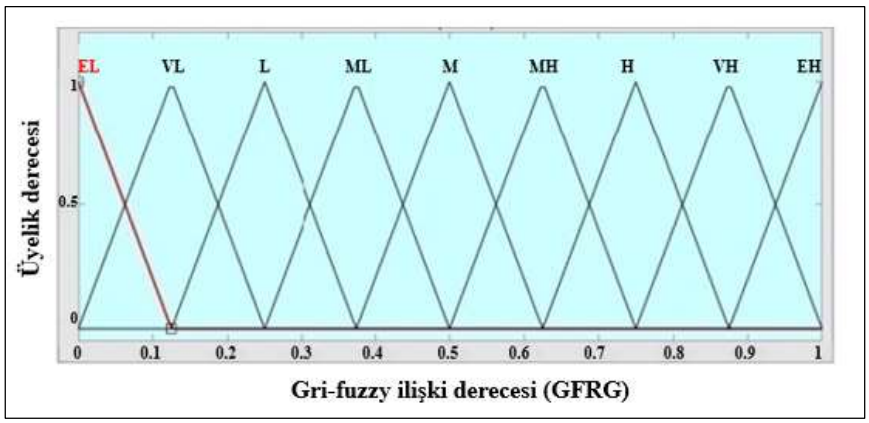
Girdiler için dilsel değişkenler beş tipte sınıflandırılırken çıktı için dokuz tipte sınıflandırılmıştır (Çizelge 8.9). Üçgen üyelik fonksiyonları Şekil 8.16 ve Şekil 8.17'de gösterildiği gibi tüm dilsel değişkenler için tanımlanmıştır.

Çizelge 8.9. Girdiler ve çıktı için üyelik dereceleri

Dilsel değişkenler	Aralıklar	Üyelik fonksiyonu
Girişler (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)		Üçgensel
Çok düşük (VL)	-0,25-0,25	
Düşük (L)	0-0,5	
Orta (M)	0,25-0,75	
Yüksek (H)	0,5-1	
Çok yüksek (VH)	0,75-1,25	
Çıktı (b_0)		
En düşük (EL)	-0,125-0,125	
Çok düşük (VL)	0-0,25	
Düşük (L)	0,125-0,375	
Orta derece düşük (ML)	0,25-0,5	
Orta (M)	0,375-0,625	
Orta derece yüksek (MH)	0,5-0,75	
Yüksek (H)	0,625-0,875	
Çok yüksek (VH)	0,75-1	
En yüksek (EH)	0,875-1,125	



Şekil 8.16. Delik çap ölçüsü, açısallıktan, diklikten, düzlemsellikten ve paralellikten sapma için üyelik fonksiyonu



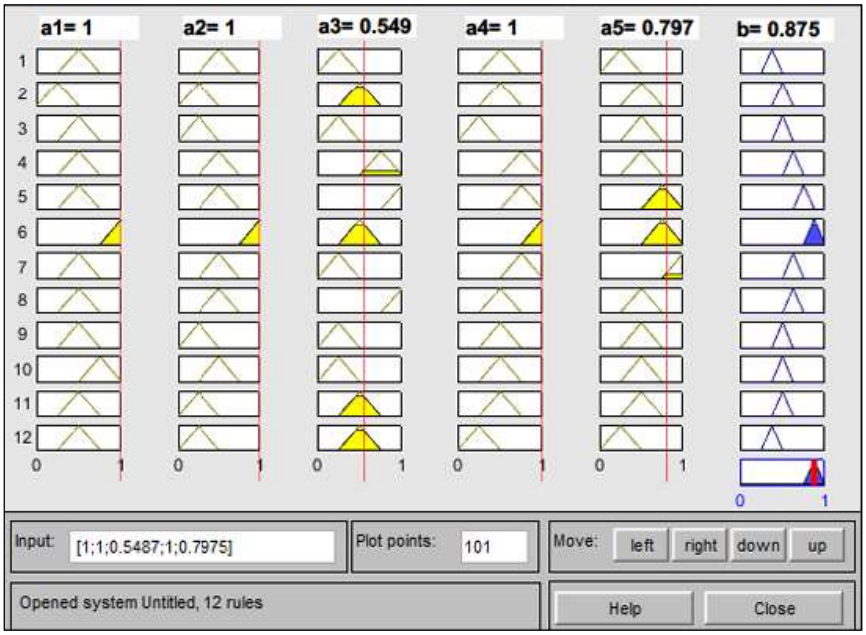
Şekil 8.17. Çoklu yanıt sonuçları için üyelik fonksiyonu

Bulanık kural tabanı, beş gri ilişkisel katsayı (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) ve bir çok yanıtlı çıktı (b_0) ile eğer-o zaman kontrol kurallarından oluşmuştur. Bulanık mantık sisteminde oluşturulan kurallar Çizelge 8.10'de verilmiştir.

Çizelge 8.10. Bulanık mantık sisteminde oluşturulan kural tablosu

EĞER											O ZAMAN
Parça no	a_1		a_2		a_3		a_4		a_5		b_0
1	M	VE	M	VE	L	VE	M	VE	L	İSE	ML
2	L	VE	L	VE	M	VE	M	VE	M	İSE	M
3	M	VE	L	VE	L	VE	L	VE	M	İSE	M
4	M	VE	M	VE	H	VE	H	VE	M	İSE	MH
5	M	VE	M	VE	VH	VE	H	VE	H	İSE	H
6	VH	VE	VH	VE	M	VE	VH	VE	H	İSE	VH
7	M	VE	M	VE	L	VE	H	VE	VH	İSE	MH
8	M	VE	M	VE	VH	VE	M	VE	M	İSE	MH
9	M	VE	L	VE	L	VE	M	VE	M	İSE	M
10	H	VE	M	VE	L	VE	M	VE	M	İSE	M
11	M	VE	L	VE	M	VE	M	VE	M	İSE	M
12	M	VE	L	VE	M	VE	L	VE	L	İSE	ML

Bulanık mantık kurak görüntüleyici Şekil 8.18'de grafiksel olarak gösterilmektedir. On iki satır on iki bulanık kuralı temsil etmekte ve ilk beş sütun sırasıyla a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 için gri ilişkisel katsayı girdi değişkenini temsil etmektedir. Son sütun durulaştırılmış gri-fuzzy ilişki derecesini (b_0) ifade etmektedir. Şekil 8.18'de görülebileceği üzere a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 giriş gri ilişki katsayı (GRC) değerleri sırasıyla 1, 1, 0,5487, 1 ve 0,7975 olduğunda Gri-fuzzy ilişki derecesi (GFRG) 0,875 olarak tahmin edilmiştir.



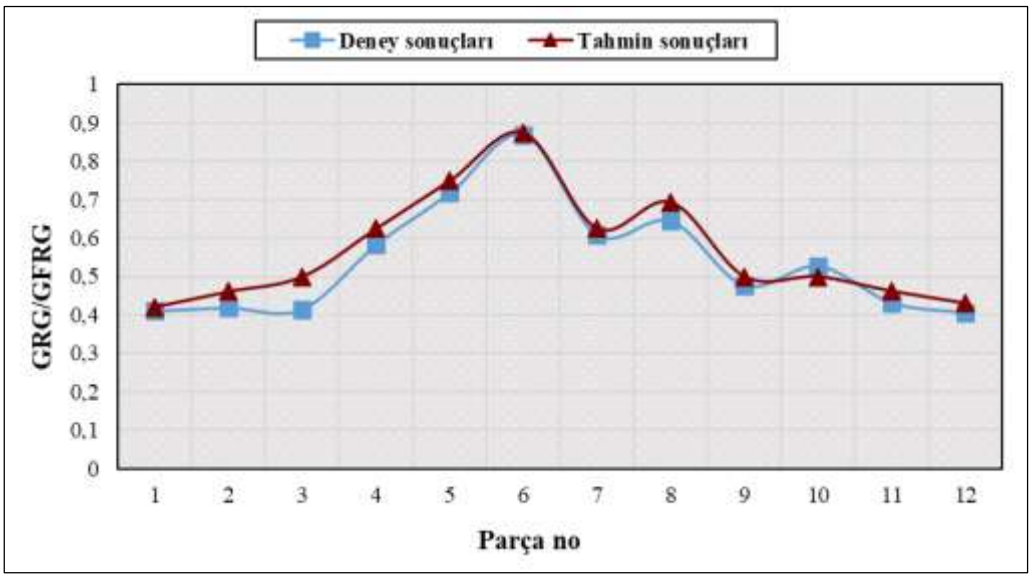
Şekil 8.18. Bulanık kural görüntüleyici

Deneysel olarak elde edilen delik çap ölçüsü, açısallıktan sapma, diklikten sapma, düzlemsellikten sapma ve paralellikten sapma gibi performans çıktıları için bulanık mantık kural görüntüleyicisinden elde edilen bulanıklaştırılmış değerler (çıktılar) Çizelge 8.11'de sunulmuştur. GFRG'nin en yüksek değeri istenilen geometrik toleranslar için optimum imalat parametrelerini belirtmektedir. Çizelge 8.11'de en yüksek GFRG değeri (0,875) 6 numaralı parçadan elde edilmiştir. Bu değer ile geometrik toleranslar için en ideal çoklu performans çıktılarının elde edildiği görülmektedir. Aynı zamanda GFRG'nin en yüksek değeri 290/911 lazer gücü/tarama hızı kombinasyonuna karşılık gelmektedir. Oluşturulan bulanık mantık modelinin doğruluğu R^2, RMSE ve MAPE değerleri ile kontrol edilmiştir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda mutlak değişim yüzdesinin (R^2) 0,995, istatistiksel hata miktarının (RMSE) 0,038 ve ortalama hata değerinin (MAPE) %6,603 olduğu belirlenmiştir. MAPE değeri, elde edilen bulanık modelin %93,39 oranında deneysel değerlere yakın tahmin değerleri elde edilebileceğini göstermektedir. Çizelge 8.11'in son

sütununda verilen deneysel ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması ile sonuçların bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca deneysel ve tahmin sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 8.19'da verilmiştir.

Çizelge 8.11. Deneysel ve tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Parça no	Gri ilişkisel derece (GRG)	Gri-fuzzy ilişkisel derece (GFRG)	GRG ve GFRG karşılaştırması
1	0,4104	0,421	2,58
2	0,4183	0,461	10,21
3	0,4152	0,5	20,42
4	0,583	0,625	7,20
5	0,7176	0,75	4,52
6	0,8692	0,875	0,67
7	0,6083	0,625	2,75
8	0,6448	0,694	7,63
9	0,4766	0,5	4,91
10	0,5276	0,5	5,23
11	0,4318	0,462	6,99
12	0,4061	0,431	6,13
			MAPE (%): 6,603



Şekil 8.19. Deneysel ve tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımının seçici lazer ergitme yöntemi ile eklemeli imalatında imalat parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- ✓ Çekme dayanımının en yüksek değeri 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğunun azalan ve artan değerlerinde çekme dayanımının azaldığı görülmüştür.
- ✓ Akma dayanımının en yüksek değeri 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğunun azalan ve artan değerlerinde çekme dayanımında olduğu gibi akma dayanımının da azaldığı tespit edilmiştir.
- ✓ En yüksek mikro sertlik değeri 55,82 J/mm^3 hacimsel enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğunun azalan ve artan değerlerinde çekme ve akma dayanımında olduğu gibi mikro sertlik değerinin de azaldığı tespit edilmiştir.
- ✓ Ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değeri 54,46 J/mm^3 enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu hacimsel enerji yoğunluğunun azalan ve artan değerlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü artmıştır.
- ✓ Kırık yüzeylerin incelenmesi ile düşük hacimsel enerji yoğunluğunda üretilen numunelerde ergimemiş toz partiküllerinin oluştuğu, yüksek hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerde ise çatlak oluşumu tespit edilmiştir. Orta hacimsel enerji yoğunluklarında üretilen numunelerde ise gözenek oluşumunun daha az ve küçük boyutlarda olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Hacimsel enerji yoğunluğunun artması ile XRD piklerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Taguchi tabanlı Gri ilişkisel analiz sonucunda mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için en ideal imalat parametreleri 350 W lazer gücü, 1100 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı olarak tespit edilmiştir. Bu parametrelere göre yapılan doğrulama deneyi ile başlangıç parametrelerinden en ideal parametrelere gri ilişkisel derecede %30,15 oranında iyileşme olduğu görülmüştür.
- ✓ Delik merkez konumlarındaki en düşük sapma miktarı lazer gücü/tarama hızı kombinasyonunun orta değerlerinde elde edilmiştir. Düşük ve yüksek lazer gücü/tarama hızı kombinasyonlarında sapma miktarının arttığı tespit edilmiştir.

- ✓ Delik çaplarındaki en düşük değişim miktarı lazer gücü/tarama hızı kombinasyonun orta değerlerinde elde edilmiştir. İmalat parametrelerinin düşük ve yüksek değerlerinde delik çaplarındaki değişim artış eğilimine girdiği görülmüştür.
- ✓ Açısallık ve diklikten sapma değerleri lazer gücü/tarama hızı kombinasyonun orta değerlerinde en düşük seviyede elde edilmiştir. Diğer tolerans değerlerinde olduğu gibi imalat parametrelerinin düşük ve yüksek değerlerinde sapma miktarı artmıştır.
- ✓ Düzlemsellikten ve paralellikten sapma değerleri lazer gücü/tarama hızı kombinasyonunun orta değerlerinde minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir. İmalat parametrelerinin artması ve azalması ile sapma miktarı artmıştır.
- ✓ Deneysel sonuçların Gri-Bulanık mantık yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca karşılaştırılan deneysel ve istatistiksel veriler arasındaki ortalama hata değerinin (MAPE) %6,603 olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Oluşturulan bulanık mantık modeli ile eklemeli imalat sürecinde geometrik tolerans göstergelerinin başarılı bir şekilde tahmin edilebileceğini ortaya konulmuştur.

Bu çalışma sonucunda, sonraki çalışmalara ışık tutması bakımından aşağıdaki tavsiyeler yapılabilir;

- ✓ Bu çalışmada AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü için ideal hacimsel enerji yoğunluğu değeri araştırılmıştır. AlSi10Mg alaşımı için belirlenen ideal hacimsel enerji yoğunluğuna bağlı kalınarak farklı imalat platform sıcaklıklarının mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılabilir.
- ✓ Mevcut çalışmada katman kalınlığı sabit parametre olarak kullanılmıştır. Değişken katman kalınlıklarının geometrik toleranslara etkisi araştırılabilir.
- ✓ Çalışmada üretilen parçalara ısıl işlem uygulanmamıştır. Farklı ısıl işlemlerin geometrik toleranslar açısından etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Yalçın, B. ve Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.

2. Dedeakayogulları, H. and Kacal, A. (2022). Experimental investigation of hole quality in drilling of additive manufacturing Ti6Al4V parts produced by hole features. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 745-758.

3. Wu, H., Liang, L., Zeng, H., Lan, X., Du, J., Zhou, C. and Huang, W. (2019). Microstructure and nanomechanical properties of Zr-based bulk metallic glass composites fabricated by laser rapid prototyping. *Materials Science and Engineering: A*, 765, 138306.

4. Gong, J., Wei, K., Liu, M., Song, W., Li, X. and Zeng, X. (2022). Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy built by laser powder bed fusion/direct energy deposition hybrid laser additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 59, 103160.

5. Wu, H., Ren, J., Huang, Q., Zai, X., Liu, L., Chen, C. and Li, R. (2017). Effect of laser parameters on microstructure, metallurgical defects and property of AlSi10Mg printed by selective laser melting. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*, 2(04), 1750017.

6. Yadroitsev, I. (2009). Selective laser melting: *Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders.* LAP Lambert Academic Publishing.

7. Zhou, B., Zhou, J., Li, H. and Lin, F. (2018). A study of the microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by SLM under vacuum. *Materials Science and Engineering: A*, 724, 1-10.

8. Li, C., White, R., Fang, X. Y., Weaver, M. and Guo, Y. B. (2017). Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 705, 20-31.

9. Majumdar, T., Bazin, T., Massahud Carvalho Ribeiro, E., Frith, J. E. and Birbilis, N. (2019). Understanding the effects of PBF process parameter interplay on Ti-6Al-4V surface properties. *PloS one*, 14(8), e0221198.

10. Maamoun, A. H., Xue, Y. F., Elbestawi, M. A. and Veldhuis, S. C. (2018). Effect of selective laser melting process parameters on the quality of al alloy parts: Powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy. *Materials*, 11(12), 2343.

11. Read, N., Wang, W., Essa, K. and Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 417-424.

12. Majeed, A., Jingxiang, J., Zhang, Y., Muzamil, M., Waqas, A., Shamim, K. and Zafar, F. (2019). *An investigation into the influence of processing parameters on the surface quality of AlSi10Mg parts by SLM process*. 16th international bhurban conference on applied sciences and technology (IBCAST), 143-147, Islamabad, Pakistan.

13. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Iuliano, L. and Fino, P. (2013). Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9), 2743-2751.

14. Ahmed, A., Wahab, M. S., Raus, A. A., Kamarudin, K., Bakhsh, Q. and Ali, D. (2016). Effects of selective laser melting parameters on relative density of AlSi10Mg. *Int. J. Eng. Technol*, 8(6), 2552-2557.

15. 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*, 12(1), 12.

16. Hyer, H., Zhou, L., Park, S., Gottsfritz, G., Benson, G., Tolentino, B. and Sohn, Y. (2020). Understanding the laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9(4), 484-502.

17. Kimura, T. and Nakamoto, T. (2016). Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0. 3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 89, 1294-1301.

18. Liu, M., Wei, K. and Zeng, X. (2022). High power laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy: Effect of layer thickness on defect, microstructure and mechanical property. *Materials Science and Engineering: A*, 842, 143107.

19. Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I. and Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive manufacturing*, 1, 77-86.

20. Rhein, R. K., Shi, Q., Arjun Tekalur, S., Wayne Jones, J. and Carroll, J. W. (2021). Effect of direct metal laser sintering build parameters on defects and ultrasonic fatigue performance of additively manufactured AlSi10Mg. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(2), 295-305.

21. Öter, Z. Ç. (2021). *Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile 3 boyutlu metal yazıcıda üretilen parçaların yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyet ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 21, 103-128.

22. Stegman, B., Shang, A., Hoppenrath, L., Raj, A., Abdel-Khalik, H., Sutherland, J. and Zhang, X. (2022). Volumetric energy density impact on mechanical properties of additively manufactured 718 Ni alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 854, 143699.

23. Kaplan, M. C. (2021). *Seçici Lazer Sinterleme ile Üretilen Desteksiz Yapıların Geometrik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23-79.

24. Sharma, R., Kumar, S. and Saha, R. (2020). *Investigation of Laser Sintered AlSi10Mg Specimens for Density and Surface Roughness*. International Symposium on Fusion of Science and Technology (ISFT 2020), 1-13, New Delhi, India

25. Kuai, Z., Li, Z., Liu, B., Liu, W. and Yang, S. (2022). Effects of remelting on the surface morphology, microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Chemistry and Physics*, 285, 125901.

26. Bagci, H. B., Sagbas, B. and Durakbasa, M. N. (2020). *Effect of Direct Metal Laser Sintering Process Parameters on Dimensional Accuracy of AlSi10Mg Parts*. DAAAM International Scientific Book, 171-180,Vienna, Austria.

27. Hu, Z., Zhao, Z., Deng, X., Lu, Z., Liu, J. and Qu, Z. (2022). Microstructure and mechanical behavior of TiCN reinforced AlSi10Mg composite fabricated by selective laser melting. *Materials Chemistry and Physics*, 283, 125996.

28. Wu, H., Ren, Y., Ren, J., Cai, A., Song, M., Liu, Y. and Baker, I. (2020). Effect of melting modes on microstructure and tribological properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Virtual and Physical Prototyping*, 15, 570-582.

29. Zhang, H., Wang, Y., Wang, J. J., Ni, D. R., Wang, D., Xiao, B. L. and Ma, Z. Y. (2022). Achieving superior mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg via direct aging treatment. *Journal of Materials Science & Technology*, 108, 226-235.

30. Yalçın, B., Karakılınç, U. ve Ergene, B. (2019). Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 801-810.

31. Zhang, X., Chen, L., Zhou, J. and Ren, N. (2020). Simulation and experimental studies on process parameters, microstructure and mechanical properties of selective laser melting of stainless steel 316L. J*ournal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(8), 1-14.

32. Duman, B. ve Kayacan, M. C. (2017). Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini. *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(1), 12-28.

33. Liu, Y., Yang, Y. and Wang, D. (2017). Investigation into the shrinkage in Z-direction of components manufactured by selective laser melting (SLM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9), 2913-2923.

34. Sun, Q., Qian, D., Liu, J., Sun, J. and Sun, Z. (2022). Effect of deep cryogenic treatment on mechanical properties and residual stress of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 303, 117543.

35. Siyambaş, Y. ve Turgut, Y. (2022). Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımlı Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü-Bir Araştırma. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(2), 368-390.

36. Karabulut, Y. (2020). *Eklemeli İmalat Yöntemiyle Farklı Cidar Kalınlıklarında Üretilen Inconel 718 Alaşım Malzemesine Uygulanan İkincil İşlemlerin Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 30-52.

37. Top, M. N. (2020). *Seçici Lazer Ergitme Tekniği ile Üretilmiş Bronz Parçaların Mikroyapısal, Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 53-68.

38. Kayacan, M. Y. (2020). *Seçici Lazer Ergitme (SLE) ile İmalatta Geometrik Parametrelerin Sıcaklık Dağılımı, Kalıntı Gerilme ve Deformasyona Etkisinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta, 51-169.

39. Doh, J., Raju, N., Raghavan, N., Rosen, D. W. and Kim, S. (2022). Bayesian inference-based decision of fatigue life model for metal additive manufacturing considering effects of build orientation and post-processing. International Journal of Fatigue, 155, 106535.

40. Oliveira, A. P., Lima, L. H., Felipe, B. C., Bolfarini, C., Coelho, R. T. and Gargarella, P. (2021). Effect of microstructure and defect formation on the bending properties of additive manufactured H13 tool steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3598-3609.

41. Sanchez, S., Gaspard, G., Hyde, C. J., Ashcroft, I. A., Ravi, G. A. and Clare, A. T. (2021). The creep behaviour of nickel alloy 718 manufactured by laser powder bed fusion. Materials & Design, 204, 109647.

42. Mavi, F. (2021). *Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Cocr Alaşımında Proses Parametrelerinin Boyutsal Hassasiyet, Yoğunluk ve Yüzey Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 49-128.

43. Dedeakayogulları, H. and Kacal, A. (2022). Experimental investigation of hole quality in drilling of additive manufacturing Ti6Al4V parts produced by hole features. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 745-758.

44. Knoop, F., Schöppner, V. (2017). *Geometrical accuracy of holes and cylinders manufactured with fused deposition modeling.* In 2017 International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2757-2776, University of Texas at Austin.

45. Tezel, T. (2020). Comparison of hole quality of polyamide materials produced by traditional and additive manufacturing. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(1), 1-7.

46. Dsouza, A. (2016). *Experimental evolutionary optimization of geometric integrity in Fused Filament Fabrication (FFF) Additive Manufacturing (AM) process*. M.Sc. Thesis, Systems Engineering in the Graduate School, State University of New York at Binghamton.

47. Singh, M. and Bharti, P. S. (2022). Grey relational analysis based optimization of process parameters for efficient performance of fused deposition modelling based 3D printer. *Journal of Engineering Research*, 10.

48. Ünal, O. (2022). *Eklemeli İmalat ile Üretilmiş 18Ni300 Maraging Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin Termokimyasal Borlama Yöntemiyle Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 129-135.

49. İnternet: ASTM 52900-15 standard terminology for additive manufacturing-general principles-terminology. URL: https://doi.org/10.1520/ISOASTM52900-15. Son Erişim Tarihi: 29.07.2022.

50. Cullen, A. T. and Price, A. D. (2019). Fabrication of 3D conjugated polymer structures via vat polymerization additive manufacturing. *Smart Materials and Structures*, 28(10), 104007.

51. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. and Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.

52. Bernal, P. N., Delrot, P., Loterie, D., Li, Y., Malda, J., Moser, C. and Levato, R. (2019). Volumetric bioprinting of complex living-tissue constructs within seconds. *Advanced materials*, 31(42), 1904209.

53. Maruo, S., Nakamura, O. and Kawata, S. (1997). Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization. *Optics letters*, 22(2), 132-134.

54. Sidambe, A. T. (2014). Biocompatibility of advanced manufactured titanium implants-A review. *Materials*, 7(12), 8168-8188.

55. Shrestha, S. and Manogharan, G. (2017). Optimization of binder jetting using Taguchi method. *Jom*, 69(3), 491-497.

56. Singh, A. (2017). *Additive Manufacturing of Al 4047 and Al 7050 Alloys Using Direct Laser Metal Deposition Process*. Wayne State University, 3-10.

57. Gibson, I., Mateus, A., Bartolo, P. (2010). RAPIDPRE: A New Additive Manufacturing Technique Based on Reaction İnjection Moulding. *Annals of DAAAM 2010 & Proceedings*, 21(1), 1589-1590.

58. Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A. and Saxena, K. K. (2020). Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3058-3070.

59. Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G. and Zhang, J. (2018). Additive manufacturing of metallic materials: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13.

60. Obikawa, T., Yoshino, M. and Shinozuka, J. (1999). Sheet steel lamination for rapid manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 89, 171-176.

61. Chiujdea, C. and Cananau, S. (2021). A Review of Additive Manufacturing Technologies. *Journal of Research and Innovation for Sustainable Society*, 3(1), 25-33.

62. Svetlizky, D., Zheng, B., Vyatskikh, A., Das, M., Bose, S., Bandyopadhyay, A.and Eliaz, N. (2022). Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials. *Materials Science and Engineering: A*, 142967.

63. İnternet: Additive Manufacturing Research Group. URL: http: // www. lboro.ac.uk / research / amrg / about / the 7categories of additive manufacturing. Son Erişim Tarihi: 02.08.2022.

64. İnternet: What is Stereolithography? URL: http://www.livescience.com/38190-stereolithography.html. Son Erişim Tarihi: 02.08.2022.

65. Coykendall, J., Cotteleer, M., Holdowsky, J.and Mahto, M. (2014). 3D opportunity in aerospace and defense: additive manufacturing takes flight. *A Deloitte series on additive manufacturing*, 1.

66. Yusuf, S. M. and Gao, N. (2017). Influence of energy density on metallurgy and properties in metal additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 33(11), 1269-1289.

67. Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., Yadroitsava, I., Johansson, S. and Smurov, I. (2013). Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4), 606-613.

68. Yadroitsev, I. and Yadroitsava, I. (2015). Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(2), 67-76.

69. Cao, W. and Miyamoto, Y. (2006). Freeform fabrication of aluminum parts by direct deposition of molten aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(2), 209-212.

70. Lodes, M. A., Guschlbauer, R. and Koerner, C. (2015). Process development for the manufacturing of 99.94% pure copper via selective electron beam melting. *Materials Letters*, 143, 298-301.

71. Wang, Z., Ummethala, R., Singh, N., Tang, S., Suryanarayana, C., Eckert, J. and Prashanth, K. G. (2020). Selective laser melting of aluminum and its alloys. *Materials*, 13(20), 4564.

72. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6): 1917-1928.

73. Hagedorn, Y. (2017). Laser additive manufacturing of ceramic components: Materials, processes, and mechanisms. *In Laser Additive Manufacturing*, 163-180.

74. Tang, H. P., Qian, M., Liu, N., Zhang, X. Z., Yang, G. Y. and Wang, J. (2015). Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting. *Jom*, 67(3), 555-563.

75. Ardila, L. C., Garciandia, F., González-Díaz, J. B., Álvarez, P., Echeverria, A., Petite, M. M. and Ochoa, J. (2014). Effect of IN718 recycled powder reuse on properties of parts manufactured by means of selective laser melting. *Physics Procedia*, 56, 99-107.

76. Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F. and Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401-477.

77. Orme, M. E., Gschweitl, 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. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 54(5), 1050-1059.

78. Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H. and Barlow, J. (1995). Post-processing of selective laser sintered metal parts. *Rapid Prototyping Journal*, 1, 36-44.

79. Grasso, M. and Colosimo, B. M. (2017). Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. *Measurement Science and Technology*, 28(4), 044005.

80. Hearn, W. (2021). *Laser Based Powder Bed Fusion of Plain Carbon and Low-Alloy Steels: Microstructure and Processability*. Doctoral dissertation, Department of Industrial and Materials Science Chalmers University of Technology, Gothenburg Sweden, 9-23.

81. Bai, Y., Yang, Y., Wang, D. and Zhang, M. (2017). Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 703, 116-123.

82. Guo, L., Zhang, L., Andersson, J., and Ojo, O. (2022). Additive manufacturing of 18% nickel maraging steels: defect, structure and mechanical properties: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 120, 227-252.

83. Mutua, J., Nakata, S., Onda, T. and Chen, Z. C. (2018). Optimization of selective laser melting parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel. *Materials & Design*, 139, 486-497.

84. Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J. and Kruth, J. P. (2015). Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology*, 31(8), 917-923.

85. Qian, M. (2015). Metal powder for additive manufacturing. *Jom*, 67(3), 536-537.

86. Yılmaz D., (2016), Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları. *STM Sektör Değerlendirme Raporu*, 1-31.

87. Zhang, J., Chaudhari, A. and Wang, H. (2019). Surface quality and material removal in magnetic abrasive finishing of selective laser melted 316L stainless steel. *Journal of manufacturing processes*, 45, 710-719.

88. Zhang, J., Xiang Toh, A. Y., Wang, H., Lu, W. F. and Fuh, J. Y. H. (2019). Vibration-assisted conformal polishing of additively manufactured structured surface. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(12), 4154-4164.

89. Tan, H., Fang, Y., Zhong, C., Yuan, Z., Fan, W., Li, Z. and Lin, X. (2020). Investigation of heating behavior of laser beam on powder stream in directed energy deposition. *Surface and Coatings Technology*, 397, 126061.

90. Pyka, G., Kerckhofs, G., Papantoniou, I., Speirs, M., Schrooten, J. and Wevers, M. (2013). Surface roughness and morphology customization of additive manufactured open porous Ti6Al4V structures. *Materials*, 6(10), 4737-4757.

91. Peng, X., Kong, L., Fuh, J. Y. H. and Wang, H. (2021). A review of post-processing technologies in additive manufacturing. Journal of Manufacturing and Materials *Processing*, 5(2), 38.

92. Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F. and Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 124-149.

93. Varela, J., Merino, J., Pickett, C., Abu-Issa, A., Arrieta, E., Murr, L. E. and Medina, F. (2020). Performance characterization of laser powder bed fusion fabricated Inconel 718 treated with experimental hot isostatic processing cycles. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 73.

94. Di Angelo, L., Di Stefano, P. and Guardiani, E. (2020). Search for the optimal build direction in additive manufacturing technologies: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 71.

95. Chavez, L. A., Ibave, P., Wilburn, B., Alexander IV, D., Stewart, C., Wicker, R. and Lin, Y. (2020). The influence of printing parameters, post-processing, and testing conditions on the properties of binder jetting additive manufactured functional ceramics. *Ceramics*, 3(1), 65-77.

96. Cao, Q., Bai, Y., Zhang, J., Shi, Z., Fuh, J. Y. H. and Wang, H. (2020). Removability of 316L stainless steel cone and block support structures fabricated by Selective Laser Melting (SLM). *Materials & Design*, 191, 108691.

97. Bai, Y., Shi, Z., Lee, Y. J. and Wang, H. (2020). Optical surface generation on additively manufactured AlSiMg0. 75 alloys with ultrasonic vibration-assisted machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 280, 116597.

98. Bermingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y. and Dargusch, M. S. (2018). Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire+arc additive manufacturing with post-process heat treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 753, 247-255.

99. Ma, P., Prashanth, K. G., Scudino, S., Jia, Y., Wang, H., Zou, C. and Eckert, J. (2014). Influence of annealing on mechanical properties of Al-20Si processed by selective laser melting. *Metals*, 4(1), 28-36.

100. Rosenthal, I., Tiferet, E., Ganor, M. and Stern, A. (2015). *Post-processing of AM-SLM AlSi10Mg specimens: Mechanical properties and fracture behaviour*. Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, 26, 33-38.

101. Wang, Q., Morrow, J. D., Ma, C., Duffie, N. A. and Pfefferkorn, F. E. (2015). Surface prediction model for thermocapillary regime pulsed laser micro polishing of metals. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 340-348.

102. Ukar, E., Lamikiz, A., Liébana, F., Martínez, S. and Tabernero, I. (2015). An industrial approach of laser polishing with different laser sources: Industrielle Methode zum Laserpolieren mit verschiedenen Laserstrahlquellen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 46(7), 661-667.

103. Pfefferkorn, F. E., Duffie, N. A., Morrow, J. D. and Wang, Q. (2014). Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel. *CIRP Annals*, 63(1), 237-240.

104. Ma, C. P., Guan, Y. C. and Zhou, W. (2017). Laser polishing of additive manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering*, 93, 171-177.

105. Bai, Y., Chaudhari, A. and Wang, H. (2020). Investigation on the microstructure and machinability of ASTM A131 steel manufactured by directed energy deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 276, 116410.

106. Mohammadi, M. G., Mahmoud, D. and Elbestawi, M. (2021). On the application of machine learning for defect detection in L-PBF additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*, 143, 107338.

107. Taheri, H., Shoaib, M. R. B. M., Koester, L. W., Bigelow, T. A., Collins, P. C. and Bond, L. J. (2017). Powder-based additive manufacturing-a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology. *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, 1(2), 172-209.

108. Strano, G., Hao, L., Everson, R. M. and Evans, K. E. (2013). Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4), 589-597.

109. Gu, D. and Shen, Y. (2007). Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 432(1-2), 163-166.

110. Altıparmak, S. C., Yardley, V. A., Shi, Z. and Lin, J. (2021). Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(2), 246-261.

111. Wu, D., Liu, D., Niu, F., Miao, Q., Zhao, K., Tang, B. and Ma, G. (2020). Al–Cu alloy fabricated by novel laser-tungsten inert gas hybrid additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 32, 100954.

112. Qiu, Y. D., Wu, J. M., Chen, A. N., Chen, P., Yang, Y., Liu, R. Z. and Li, C. H. (2020). Balling phenomenon and cracks in alumina ceramics prepared by direct selective laser melting assisted with pressure treatment. *Ceramics International*, 46(9), 13854-13861.

113. Dass, A. and Moridi, A. (2019). State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 9(7), 418.

114. Kistler, N. A., Corbin, D. J., Nassar, A. R., Reutzel, E. W. and Beese, A. M. (2019). Effect of processing conditions on the microstructure, porosity, and mechanical properties of Ti-6Al-4V repair fabricated by directed energy deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 264, 172-181.

115. Wolff, S. J., Lin, S., Faierson, E. J., Liu, W. K., Wagner, G. J. and Cao, J. (2017). A framework to link localized cooling and properties of directed energy deposition (DED)-processed Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 132, 106-117.

116. Cunningham, R., Nicolas, A., Madsen, J., Fodran, E., Anagnostou, E., Sangid, M. D. and Rollett, A. D. (2017). Analyzing the effects of powder and post-processing on porosity and properties of electron beam melted Ti-6Al-4V. *Materials Research Letters*, 5(7), 516-525.

117. Dhooge, A. and Vinckier, A. (1987). Reheat cracking-A review of recent studies. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 27(4), 239-269.

118. Chen, X., Kong, F., Fu, Y., Zhao, X., Li, R., Wang, G. and Zhang, H. (2021). A review on wire-arc additive manufacturing: typical defects, detection approaches, and multisensor data fusion-based model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(3), 707-727.

119. Bozorgi, S., Haberl, K., Kneissl, C., Pabel, T. and Schumacher, P. (2011). *Effect of alloying elements (magnesium and copper) on hot cracking susceptibility of AlSi7MgCu-Alloys*. In Shape Casting: The 4th International Symposium, 113-120.

120. Kaufmann, N., Imran, M., Wischeropp, T. M., Emmelmann, C., Siddique, S. and Walther, F. (2016). Influence of process parameters on the quality of aluminium alloy EN AW 7075 using selective laser melting (SLM). *Physics Procedia*, 83, 918-926.

121. He, Y., Zhong, M., Beuth, J. and Webler, B. (2020). A study of microstructure and cracking behavior of H13 tool steel produced by laser powder bed fusion using single-tracks, multi-track pads, and 3D cubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 286, 116802.

122. Fonseca, E. B., Gabriel, A. H., Araújo, L. C., Santos, P. L., Campo, K. N. and Lopes, E. S. (2020). Assessment of laser power and scan speed influence on microstructural features and consolidation of AISI H13 tool steel processed by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 34, 101250.

123. Mukherjee, T., Manvatkar, V., De, A. and DebRoy, T. (2017). Mitigation of thermal distortion during additive manufacturing. *Scripta materialia*, 127, 79-83.

124. Liu, Y., Yang, Y. and Wang, D. (2016). A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 647-656.

125. Narvan, M., Al-Rubaie, K. S. and Elbestawi, M. (2019). Process-structure-property relationships of AISI H13 tool steel processed with selective laser melting. *Materials*, 12(14), 2284.

126. Mertens, R., Vrancken, B., Holmstock, N., Kinds, Y., Kruth, J. P. and Van Humbeeck, J. (2016). Influence of powder bed preheating on microstructure and mechanical properties of H13 tool steel SLM parts. *Physics Procedia*, 83, 882-890.

127. Mercelis, P. and Kruth, J. P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 254-265.

128. Oliveira, J. P., LaLonde, A. D. and Ma, J. (2020). Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 193, 108762.

129. Gor, M., Soni, H., Wankhede, V., Sahlot, P., Grzelak, K., Szachgluchowicz, I. and Kluczyński, J. (2021). A critical review on effect of process parameters on mechanical and microstructural properties of powder-bed fusion additive manufacturing of SS316L. *Materials*, 14(21), 6527.

130. Chen, W., Yin, G., Feng, Z. and Liao, X. (2018). Effect of powder feedstock on microstructure and mechanical properties of the 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Metals*, 8(9), 729.

131. Wang, D., Song, C., Yang, Y. and Bai, Y. (2016). Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. *Materials & Design*, 100, 291-299.

132. Tucho, W. M., Lysne, V. H., Austbø, H., Sjolyst-Kverneland, A. and Hansen, V. (2018). Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 910-925.

133. Tian, Y., Tomus, D., Rometsch, P. and Wu, X. (2017). Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 13, 103-112.

134. Nguyen, Q. B., Luu, D. N., Nai, S. M. L., Zhu, Z., Chen, Z. and Wei, J. (2018). The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(3), 948-955.

135. Mumtaz, K. and Hopkinson, N. (2009). Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 15(2), 96-103.

136. Wang, D., Liu, Y., Yang, Y. and Xiao, D. (2016). Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 22(4), 706-716.

137. İnternet: URL: https://www.thoughtco.com/aluminum-or-aluminium-alloys-603707. Son Erişim Tarihi:17.08.2022.

138. Mishra, R. S. and Sidhar, H. (2016). *Friction stir welding of 2xxx aluminum alloys including Al-Li alloys*. Butterworth-Heinemann, 79-84.

139. Li, M., Tamura, T., Omura, N., Murakami, Y., Tada, S., Miwa, K. and Takahashi, K. (2014). Refinement of intermetallic compounds and aluminum matrix in 3xxx aluminum alloys solidified by an electromagnetic vibration technique. *Journal of alloys and compounds*, 610, 606-613.

140. Li, M., Omura, N., Murakami, Y., Matsui, I. and Tada, S. (2020). A comparative study of the primary phase formation in Al-7 wt% Si and Al-17 wt% Si alloys solidified by electromagnetic stirring processing. *Materials Today Communications*, 24, 101146.

141. Zhang, J., Song, B., Wei, Q., Bourell, D. and Shi, Y. (2019). A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(2), 270-284.

142. Dariusz, L. and Pawel, G. (2020). Estimation of extrusion welding conditions for 6xxx aluminum alloys. *Procedia Manufacturing*, 47, 253-260.

143. Lervik, A., Marioara, C. D., Kadanik, M., Walmsley, J. C., Milkereit, B. and Holmestad, R. (2020). Precipitation in an extruded AA7003 aluminium alloy: Observations of 6xxx-type hardening phases. *Materials & Design*, 186, 108204.

144. Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke, W. and Kruth, J. P. (2011, August). *Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg*. In 2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin.

145. Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J. and Kruth, J. P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 39, 439-446.

146. Ponnusamy, P., Rahman Rashid, R. A., Masood, S. H., Ruan, D. and Palanisamy, S. (2020). Mechanical properties of SLM-printed aluminium alloys: a review. *Materials*, 13(19), 4301.

147. Zyguła, K., Nosek, B., Pasiowiec, H. and Szysiak, N. (2018). Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique. *World Scientific News*, 104, 456-466.

148. Hegde, S. and Prabhu, K. N. (2008). Modification of eutectic silicon in Al–Si alloys. *Journal of materials science*, 43(9), 3009-3027.

149. Bartkowiak, K., Ullrich, S., Frick, T. and Schmidt, M. (2011). New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique. *Physics procedia*, 12, 393-401.

150. Akyıldız, Y. (2022). *AlSi10Mg Alaşımının Seçici Lazer Ergitme ve Basınç Destekli Sinterleme İle Üretimi ve Karakterizasyonu.* Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 13-14.

151. Wang, L. F., Sun, J., Yu, X. L., Shi, Y., Zhu, X. G., Cheng, L. Y. and Guo, L. J. (2018). Enhancement in mechanical properties of selectively laser-melted AlSi10Mg aluminum alloys by T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 734, 299-310.

152. Wang, L., Jiang, X., Guo, M., Zhu, X. and Yan, B. (2017). Characterisation of structural properties for AlSi10Mg alloys fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Technology*, 33(18), 2274-2282.

153. Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q. and Shi, Y. (2016). Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 663, 116-125.

154. Zaretsky, E., Stern, A. and Frage, N. (2017). Dynamic response of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 688, 364-370.

155. Liu, B., Li, B. Q. and Li, Z. (2019). Selective laser remelting of an additive layer manufacturing process on AlSi10Mg. *Results in Physics*, 12, 982-988.

156. Töre, C. (2004). Teknik Resim, Ölçme ve Tolerans Tarihçesi. Mühendis ve Makina, 45(531), 26-34.

157. İnternet: URL: https://www.gdandtbasics.com/gdt-symbols. Son Erişim Tarihi: 25.08.2022.

158. İnternet: Jenoptik, Roughness Measuring Systems from Hommel -Etamic GmbH. URL: https://www. slideshare.net / Carlos Alberto Ramrez M/ surfaceroughness-parameters-en. Son Erişim Tarihi: 26.08.2022.

159. İnternet: URL: http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ot/yuzey.puruzlulugu.pdf. Son Erişim Tarihi: 26.08.2022.

160. Hicks, R.C. (1985). *Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler*. Çeviri: Muluk, Z., Toktamış, Ö., Kurt, S., Karaağaoğlu, E., Ankara: Akademi Matbaası, 1-10.

161. Çakıroğlu, R. (2011). *Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 31.

162. Davim, J. P. (2003) A note the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 305-308.

163. Sallehuddin, R., Shamsuddin, S. M. H. and Hashim, S. Z. M. (2008). Application of grey relational analysis for multivariate time series. *Intelligent Systems Design and Applications*, 2, 432-437.

164. Lai, H. H., Lin, Y. C. and Yeh, C. H. (2005). Form design of product image using grey relational analysis and neural network models. *Computers & Operations Research*, 32(10), 2689-2711.

165. Fu, C., Zheng, J., Zhao, J. and Xu, W. (2001). Application of grey relational analysis for corrosion failure of oil tubes. *Corrosion Science*, 43(5), 881-889.

166. Hsiao, Y. F., Tarng, Y. S. and Huang, W. J. (2007). Optimization of plasma arc welding parameters by using the Taguchi method with the grey relational analysis. *Materials and manufacturing processes*, 23(1), 51-58.

167. Fung, C. P. (2003). Manufacturing process optimization for wear property of fiber-reinforced polybutylene terephthalate composites with grey relational analysis. *wear*, 254(3-4), 298-306.

168. Deng, J. L. (1992). *The essential methods of grey systems*. Huazhong University of Science and Technology Press, Wuhan.

169. Yılmaz, E., Güngör, F. (2010). *Gri İlişkisel Analiz Yöntemine Göre Farklı Sertliklerde Optimum Takım Tutucunun Belirlenmesi*. II. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 1- 9.

170. Palanikumar, K., Campos Rubio, J., Abrao, A. M., Esteves Correia, A. and Davim, J. P. (2008). Influence of drill point angle in high speed drilling of glass fiber reinforced plastics. *Journal of composite Materials*, 42(24), 2585-2597.

171. Kuo, Y., Yang, T., Huang and G. W. (2008). The use of a grey-based Taguchi method for optimizing multi-response simulation problems. *Engineering Optimization*, 40(6), 517-528.

172. Kuram, E. and Özçelik, B. (2013). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill. *Measurement*, 46(6), 1849-1864.

173. Janarthanan, R., Balamurali, R., Annapoorani, A. and Vimala, V. (2021). Prediction of rainfall using fuzzy logic. *Materials Today: Proceedings*, 37, 959-963.

174. Ateş, V. (2019). *Türkiye'nin kısa dönemli elektrik tüketiminin yapay zekâ teknikleri kullanılarak tahmin edilmesi*. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 111.

175. Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the institution of electrical engineers & Science*, 121, 1585-1588.

176. Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, 116-132.

177. Ünsal, S. ve Alışkan, İ. (2016). Mamdani ve Takagi-Sugeno Çıkarım Yöntemlerine Sahip Bulanık Mantık Denetleyicilerin Özgün Yazılım ve Araç Kutusu Performans Analizi. *ELECO*, 237-241.

178. Bolayır, B. (2016). *Bulanık Doğrusal Programlamanın Gıda ve Tarım Ürünleri Atıklarının Geri Dönüşümünde Faaliyet Gösteren Bir İşletmede Uygulaması*. Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 78.

179. Apci, A. (2021). *AlSi10 Mg Powder Data Sheet Québec*.

180. Hirata, T., Kimura, T. and Nakamoto, T. (2020). Effects of hot isostatic pressing and internal porosity on the performance of selective laser melted AlSi10Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138713.

181. Wang, L. Z., Wang, S. and Wu, J. J. (2017). Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*, 96, 88-96.

182. Fieres, J., Schumann, P. and Reinhart, C. (2018). Predicting failure in additively manufactured parts using X-ray computed tomography and simulation. *Procedia engineering*, 213, 69-78.

183. Jawade, S. A., Joshi, R. S., and Desai, S. B. (2021). Comparative study of mechanical properties of additively manufactured aluminum alloy. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9270-9274.

184. Caiazzo, F., Alfieri, V. and Casalino, G. (2020). On the relevance of volumetric energy density in the investigation of Inconel 718 laser powder bed fusion. *Materials*, 13(3), 538.

185. Guo, M., Gu, D., Xi, L., Zhang, H., Zhang, J., Yang, J. and Wang, R. (2019). Selective laser melting additive manufacturing of pure tungsten: Role of volumetric energy density on densification, microstructure and mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 84, 105025.

186. Li, Z., Mukai, K., Zeze, M. and Mills, K. C. (2005). Determination of the surface tension of liquid stainless steel. *Journal of materials science*, 40(9), 2191-2195.

187. Gu, D. and Shen, Y. (2009). Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design*, 30(8), 2903-2910.

188. Xi, L., Chen, S., Wei, M., Liang, J., Liu, C. and Wang, M. (2019). Microstructural evolution and properties of 24CrNiMoY alloy steel fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(9), 5521-5532.

189. Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N. and Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.

190. Kladovasilakis, N., Charalampous, P., Kostavelis, I., Tzetzis, D. and Tzovaras, D. (2021). Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: A comprehensive review. *Progress in Additive Manufacturing*, 6, 349-365.

191. Charles, A., Elkaseer, A., Mueller, T., Thijs, L., Hagenmeyer, V. and Scholz, S. (2018). Effect of process parameters on dimensional accuracy of Down-facing surfaces in selective laser melting of Ti6Al4V. *Additive Manufacturing*, 10(250), 850.

192. Zhang, L., Zhang, S., Zhu, H., Hu, Z., Wang, G. and Zeng, X. (2018). Horizontal dimensional accuracy prediction of selective laser melting. *Materials & Design*, 160, 9-20.

193. Bartlett, J. L. and Li, X. (2019). An overview of residual stresses in metal powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 27, 131-149.

194. Simson, T., Emmel, A., Dwars, A. and Böhm, J. (2017). Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 17, 183-189.

195. Mumtaz, K. A. and Hopkinson, N. (2010). Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2), 279-287.

196. Brecher, C., Jeschke, S., Schuh, G., Aghassi, S., Arnoscht, J., Bauhoff, F. and Jeschke, S. (2011). *Integrative production technology for high-wage countries*. In Integrative production technology for high-wage countries, 17-76.

197. Pandey, R. K. and Panda, S. S. (2014). Optimization of bone drilling parameters using grey-based fuzzy algorithm. *Measurement*, 47, 386-392.

198. Krishnamoorthy, A., Boopathy, S. R., Palanikumar, K. and Davim, J. P. (2012). Application of grey fuzzy logic for the optimization of drilling parameters for CFRP composites with multiple performance characteristics. *Measurement,* 45(5),1286-1296.



Gazili olmak ayrıcalıktır