



**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ
ALSİ10MG MALZEMESİNİN MALZEME YAPISAL
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
DOĞRULANMASI**

Murat AKTÜRK

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ**

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ ALSİ10MG
MALZEMESİNİN MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
DOĞRULANMASI**

Murat AKTÜRK

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ**

**KARABÜK
Şubat 2021**

Murat AKTÜRK tarafından hazırlanan “EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ ALSİ10MG MALZEMESİNİN MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOĞRULANMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 15/02/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Kadir Mert DÖLEKER (OMÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nafiz YAŞAR(KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Murat AKTÖRK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ ALSi10MG
MALZEMESİNİN MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ ve SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
DOĞRULANMASI**

Murat AKTÜRK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ

Şubat 2021, 92 sayfa

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing) temel olarak bilgisayar ortamında tasarlanmış bir parçanın plastik, seramik, metal veya kompozit gibi birçok farklı türde malzeme kullanılarak katmanlar halinde üretilmesi mantığına dayanan üretim şekillerini kapsamaktadır. Üretilcek parçanın özelliklerine bağlı olarak düşük maliyet ve yüksek hıza sahip olmasının yanısıra bazı özel tasarıma sahip parçaların sadece eklemeli imalat yöntemleriyle üretilebilmesi eklemeli imalatın yaygınlaşmasını sağlamıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan lazer eklemeli imalat farklı metal tozlarının lazer ışınları yardımıyla ergitilerek/sinterlenerek birleştirilmesi işlemidir. Bu çalışma lazer eklemeli imalatta yaygın olarak kullanılan AlSi10Mg alaşımına ait malzeme yapısal parametrelerinin literatüre kazandırılmasını amaçlamaktadır.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle SLM teknolojisi kullanılarak AlSi10Mg alaşımlı numuneler uygun geometrik parametrelerde üretilmiştir. Ardından numunelere yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri uygulanarak malzemeye ait Johnson-Cook malzeme modeli belirlenmeye çalışılmıştır. Yarı-statik çekme testleri oda sıcaklığında (24°C) ve 10^{-3} , 10^{-2} , $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızlarında; yüksek sıcaklık çekme testleri ise 10^{-3} s^{-1} referans gerinim hızında ve 24, 150, 300°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Testlerden elde edilen veriler ile oluşturulmuş Johnson-Cook modeli sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı Ansys programına yüklenerek oluşturulan çekme simülasyonu sonuçları ve deney sonuçları kıyaslanmıştır. Test ve simülasyon sonuçları arasında ortalama %7.5 fark olduğu görülmüştür. Bu sapma miktarı, oluşturulan yeni malzeme modelinin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini ispatlayarak literatüre AlSi10Mg hakkında yeni bilgilerin kazandırılmasını sağlamıştır.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli imalat, AlSi10Mg, Lazer eklemeli imalat, Lazer toz yatağı, Johnson-Cook, Sonlu elemanlar yöntemi.

Bilim Kodu : 91433

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DETERMINATION OF MATERIAL STRUCTURAL PARAMETERS OF AlSi10Mg MATERIAL PRODUCED WITH ADDITIONAL MANUFACTURING AND VERIFICATION BY FINITE ELEMENT METHOD

Murat AKTÜRK

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assists. Prof. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ

February 2021, 92 Pages

Additive Manufacturing basically covers production methods based on the logic of producing a part designed in computer environment in layers using many different materials such as plastic, ceramic, metal or composite. In addition to having low cost and high-speed depending on the characteristics of the part to be produced, the fact that some specially designed parts can be produced only by additive manufacturing methods has made additive manufacturing widespread. Laser additive manufacturing, one of the additive manufacturing methods, is the process of combining different metal powders by melting / sintering them with the help of laser beams. This study aims to bring material structural parameters of AlSi10Mg alloy, which is widely used in laser additive manufacturing, to the literature. For this purpose, AlSi10Mg alloy samples were produced with appropriate geometric parameters using SLM technology.

Then, by applying semi-static and high temperature tensile tests to the samples, Johnson-Cook material model of the material was tried to be determined. Semi-static tensile tests at room temperature (24 ° C) and strain rates 10^{-3} , 10^{-2} , 5×10^{-2} s⁻¹; high temperature tensile tests were performed at 10^{-3} s⁻¹ reference strain rate and temperatures of 24, 150, 300 ° C. The results of the tensile simulation created by loading the Johnson-Cook model created with the data obtained from the tests into the finite element method based Ansys program and the results of the experiment were compared. It was found that there is an 7.5% difference between the test and simulation results. This amount of deviation proved the accuracy and applicability of the new material model created and provided new information about AlSi10Mg to the literature.

Key Word : Additive manufacturing, AlSi10Mg, Laser additive manufacturing, Laser powder bed, Johnson-Cook, Finite element method.

Science Code : 91433

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam ve danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan, manevi desteklerini benden asla esirgemeyen, bu hayattaki en büyük destekçilerim annem, babam ve kız kardeşime sevgi, saygı ve őükranlarımı sunarım.

Ayrıca FYL-2020-2305 nolu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	2
2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE EKLEMELİ İMALATTA KULLANIMLARI HAKKINDA.....	2
2.2. ALSİ10MG ALAŞIMINA DAİR YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	5
2.3. JOHNSON-COOK MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASIYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	11
2.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN ANALİZİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN KULLANIMI	13
2.5. LİTERATÜRÜN DEĞERLENDİRİLMESİ	16
BÖLÜM 3	18
EKLEMELİ İMALAT	18
3.1. EKLEMELİ İMALATIN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI.....	22
3.1.1. Avantajları.....	22
3.1.2. Dezavantajları	24

	<u>Sayfa</u>
3.2. EKLEMELİ İMALATIN KULLANIM ALANLARI	25
3.3. EKLEMELİ İMALATTA İŞLEM ADIMLARI	26
3.3.1. 3B Modelin Oluşturulması	27
3.3.2. Modelin Uygun Formatta Kaydedilmesi	27
3.3.3. Modelin Dilimlenmesi	28
3.3.4. İmalat Aşaması	28
3.3.5. Son İşlemlerin Uygulanması	28
3.4. EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN MALZEMELER	29
3.4.1. Metal Eklemeli İmalat (MEİ) Dışında Kullanılan Malzemeler	29
3.4.2. Metal Eklemeli İmalatta (MEİ) Kullanılan Malzemeler	30
3.5. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ	32
3.5.1. Lazer Esaslı Yöntemler	32
3.5.1.1. Stereolitografi (Stereolithography-SLA)	32
3.5.1.2. Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing-DLP)	33
3.5.1.3. Sürekli Dijital Işık İşleme (Continuous Dijital Light Processing- CDLP)	33
3.5.2. Malzeme Püskürtme (Material Jetting)	34
3.5.2.1. Çoklu Püskürtme Modelleme (Multi Jet/Polyjet Modelling- MJM/PJM)	34
3.5.3. Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)	35
3.5.3.1. Eriyik Yığıma/Biriktirme Modelleme-EBM (Fused Deposition Modelling-FDM)	35
3.5.4. Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion-PBF)	36
3.5.4.1. Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS)	36
3.5.4.2. Seçmeli Lazer Ergitme (Selective Laser Melting-SLM)	36
3.5.4.3. Elektron Işın Ergitme (Electron Beam Melting-EBM)	36
3.5.4.4. Direkt/Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering-DMLS)	37

3.5.5. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition-DED) ..	37
3.5.5.1. Doğrudan Metal Biriktirme-DMB (Direct Metal Deposition-DMD) ..	37
3.5.5.2. Lazer Metal Biriktirme-LMB (Laser Metal Deposition-LMD) ..	38
3.5.6. Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting-BJ) ..	38
3.5.7. Tabaka Laminasyonu (Sheet Lamination) ..	39
3.5.7.1. Lamine (Katmanlı) Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing- LOM) ..	39
3.5.7.2. Ultrasonik Birleştirme (Ultrasonic Consolidation-UC) ..	39
BÖLÜM 4 ..	40
MALZEME YAPISAL DENKLEMLERİ	40
4.1. YAPISAL DENKLEMLERİN UYGULANMASI.....	40
4.1.1. Johnson- Cook Malzeme Modeli ..	41
4.1.2. Johnson-Cook Hasar Modeli.....	43
BÖLÜM 5 ..	44
MALZEME VE YÖNTEM ..	44
5.1. DENEY MALZEMESİ.....	44
5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	45
5.3. ÇEKME TESTİ.....	45
BÖLÜM 6 ..	48
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	48
6.1. YARI-STATİK ÇEKME TESTİ SONUÇLARI.....	48
6.1.1. “A, B ve n” parametrelerinin belirlenmesi.....	48
6.1.2. “C” parametresinin belirlenmesi ..	50
6.2. YÜKSEK SICAKLIK ÇEKME TESTİ SONUÇLARI.....	52
6.2.1. “m” parametresinin belirlenmesi.....	52
6.3. YARI-STATİK ÇEKME SİMÜLASYONU SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..	54

6.3.1.	0 Derece İçin Yarı-Statik Çekme Simülasyonu Sonuçları.....	55
6.3.2.	90 Derece İçin Yarı-Statik Çekme Simülasyonu Sonuçları.....	56
6.4.	YÜKSEK SICAKLIK ÇEKME SİMÜLASYONU SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	58
6.4.1.	0 Derece İçin Yüksek Sıcaklık Çekme Simülasyonu Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	58
6.4.2.	90 Derece İçin Yüksek Sıcaklık Çekme Simülasyonu Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	59
6.5.	TEST VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.	61
6.5.1.	Yarı-statik Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	61
6.5.1.1.	0 Derece İçin Yarı-statik Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	61
6.5.1.2.	90 Derece İçin Yarı-statik Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	67
6.5.2.	Yüksek Sıcaklık Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	71
6.5.2.1.	0 Derece İçin Yüksek Sıcaklık Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	71
6.5.2.2.	90 Derece İçin Yüksek Sıcaklık Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	76
BÖLÜM 7	.....	81
SONUÇ VE ÖNERİLER	.....	81
7.1.	SONUÇLAR.....	81
7.2.	ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR	.....	84
ÖZGEÇMİŞ	.....	92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması: (a) döküm alaşımları. (b) işlenmiş alaşımları. Isıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları mavi, ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları kırmızı renktedir .	3
Şekil 2.2. AFB işlemleri için gerekli ekipmanlar.	5
Şekil 2.3. Numune mikroyapılarına ait optik görüntüleri.	9
Şekil 2.4. (a) DMLS sürecinin şematik diyagramı; (b) hesaplama alanı.	14
Şekil 2.5. Malzemenin mikro yapısının metalografik resimleri: üstten görünüş (a), önden görünüş (b), yandan görünüş (c) ve üç boyutlu görüntü (d).	16
Şekil 3.1. Üretim teknolojileri	22
Şekil 3.2. 3B Üretim teknolojisinin diğer sistemler içerisindeki konumu	25
Şekil 3.3. Eklemeli imalat işlem basamakları.	27
Şekil 5.1. Deney numunelerine ait boyut parametreleri.	45
Şekil 5.2. Çekme testleri için kullanılan cihaz; a) Basma, b) Çekme test cihazı.	47
Şekil 6.1. 0° numunelere oda sıcaklığı (24°C) ve referans gerinim hızında ($10^{-3} s^{-1}$) uygulanan çekme testine ait gerilme-gerinim grafiği.	48
Şekil 6.2. 90° numunelere oda sıcaklığı (24°C) ve referans gerinim hızında ($10^{-3} s^{-1}$) uygulanan çekme testine ait gerilme-gerinim grafiği.	49
Şekil 6.3. Farklı gerinim hızlarına ait gerilme-gerinim grafiği (0° için).	50
Şekil 6.4. Farklı gerinim hızlarına ait gerilme-gerinim grafiği (90° için).	51
Şekil 6.5. “C” parametresini belirlemek için gerekli logaritmik ilişki (0° için).	51
Şekil 6.6. “C” parametresini belirlemek için gerekli logaritmik ilişki (90° için).	52
Şekil 6.7. 0° üretim yönü için farklı sıcaklıklara ait gerilme-gerinim grafiği.	52
Şekil 6.8. 90° üretim yönü için farklı sıcaklıklara ait gerilme-gerinim grafiği.	53
Şekil 6.9. “m” parametresini belirlemek için logaritmik ilişki (0° için).	53
Şekil 6.10. “m” parametresini belirlemek için logaritmik ilişki (90° için).	54
Şekil 6.11. 0 derece için farklı gerinimlerde gerçekleşen deney ve simülasyon kırılmaları.	55
Şekil 6.12. 90 derece için farklı gerinimlerde gerçekleşen deney ve simülasyon kırılmaları.	57
Şekil 6.13. 0 derece için yüksek sıcaklık çekme testi ve simülasyon kırılmaları.	58
Şekil 6.14. 90 derece için yüksek sıcaklık çekme testi ve simülasyon kırılmaları.	60

Sayfa

Şekil 6.15. 0 derece için 10^{-3} s^{-1} gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları	64
Şekil 6.16. 0 derece için 10^{-2} s^{-1} gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları	65
Şekil 6.17. 0 derece için $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları	65
Şekil 6.18. 0 derece yarı-statik çekme testi SEM görüntüleri.....	66
Şekil 6.19. 90 derece için 10^{-3} s^{-1} gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.	69
Şekil 6.20. 90 derece için 10^{-2} s^{-1} gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.	69
Şekil 6.21. 90 derece için $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.	70
Şekil 6.22. 90 derece yarı-statik çekme testi SEM görüntüleri.....	71
Şekil 6.23. 0 derece üretim yönlü numunenin 150°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması.	74
Şekil 6.24. 0 derece üretim yönlü numunenin 300°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması.	74
Şekil 6.25. 0 derece numuneye ait yüksek sıcaklık SEM görüntüleri.....	75
Şekil 6.26. 90 derece üretim yönlü numunenin 150°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması	78
Şekil 6.27. 90 derece üretim yönlü numunenin 300°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması	79
Şekil 6.28. 90 derece numuneye ait yüksek sıcaklık SEM görüntüleri.....	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Eklemeli imalat yöntemleri.....	20
Çizelge 3.2. İşlem çeşidine göre eklemeli üretim teknolojileri.....	21
Çizelge 3.3. Metal eklemeli imalatta yaygın kullanılan malzemeler	30
Çizelge 4.1. Yapısal denklem modelleri.	41
Çizelge 5.1. AlSi10Mg tozuna ait bileşim yüzdesi.....	44
Çizelge 6.1. AlSi10Mg için JC çekme parametreleri (0°).	54
Çizelge 6.2. AlSi10Mg için JC çekme parametreleri (90°).	54
Çizelge 6.3. Yarı-statik çekme testi simülasyon sonuçları (0 derece).	56
Çizelge 6.4. Yarı-statik çekme testi simülasyon sonuçları (90 derece).	57
Çizelge 6.5. Yüksek sıcaklık çekme testi simülasyon sonuçları (0 derece).....	59
Çizelge 6.6. Yüksek sıcaklık çekme testi simülasyon sonuçları (90 derece).....	60
Çizelge 6.7. 0 derece için yarı-statik çekme testi ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	61
Çizelge 6.8. 0 derece numunenin yarı-statik etkiler sonucundaki gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.....	63
Çizelge 6.9. 90 derece için yarı-statik çekme testi ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	67
Çizelge 6.10.90 derece numunenin yarı-statik etkiler sonucundaki gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.....	68
Çizelge 6.11.0 derece üretim yönü için yüksek sıcaklık test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	72
Çizelge 6.12.0 derece numunenin yüksek sıcaklık etkilerine bağlı gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.....	73
Çizelge 6.13.90 derece üretim yönü için yüksek sıcaklık test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	77
Çizelge 6.14.90 derece numunenin yüksek sıcaklık etkilerine bağlı gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: Alüminyum
Si	: Silisyum
Mg	: Magnezyum
O	: Oksijen
V	: Vanadyum
Zn	: Çinko
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Ti	: Titanyum
μm	: Mikrometre
$\dot{\epsilon}_0$	: Referans gerinim hızı
α	: Isıya dönüştürülmüş plastik deformasyon yüzdesi
c	: Isı Kapasitesi
ϵ_f	: Kırılma gerilimi
$D_{1,2,3}$	: Gerilme parametreleri
D_4	: Gerinim hız parametresi
D_5	: Yüksek sıcaklık parametresi
$\Delta\epsilon$	: Plastik gerilme artış değeri
$\sigma_{müh}$	: Mühendislik gerilmesi
σ_g	: Gerçek gerilme
σ_n	: Numunedeki gerilme
$\epsilon_{müh}$	: Mühendislik gerinimi
ϵ_g	: Gerçek gerinimi
ΔT	: Sıcaklık artışı
ρ	: Yoğunluk
A	: R Referans gerinim hızındaki akma gerilmesi

- B : Pekişme modülü
 C : Gerinim hız sabiti
 m : Sıcaklık sabiti
 n : Pekişme üst katsayısı
 P : Uygulanan yük
 A_0 : Başlangıç kesit alanı
 A_a : Anlık kesit alanı
 l_s : Mastarın ölçüldüğü son uzunluk
 l_o : Mastarın ölçüldüğü ilk uzunluk
 T_r : Referans sıcaklık
 T_m : Ergime sıcaklığı
 E : Elastisite modülü

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
Eİ	: Eklemeli İmalat
MEİ	: Metal Eklemeli İmalat
SLM	: Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
SLS	: Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme)
J-C	: Johnson-Cook
DIC	: Digital Image Correlation (Dijital Görüntü Korelasyonu)
IR	: Infrared (Kızılötesi)
UV	: Ultraviolet (Ultraviyole)
AFB	: Abrasive Fluidized Bed (Aşındırıcılı Akışkan Yatak)
HCF	: High Cycle Fatigue (Yüksek Çevrim Yorgunluğu)
L-PBF	: Laser Powder Bed Fusion (Lazer Toz Yatağı Füzyonu)
LAM	: Laser Additive Manufacturing (Lazer Eklemeli İmalat)
CAD	: Computer Aided Drawing (Bilgisayar Destekli Çizim)
STL	: Stereolitografi
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
BJ	: Binder Jetting (Bağlayıcı Püskürtme)
DLP	: Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)
CDLP	: Continuous Digital Light Processing (Sürekli Dijital Işık İşleme)
DMD	: Direct Metal Deposition (Direkt Metal Depozisyonu)
EBM	: Electron Beam Melting (Elektron Işını ile Ergitme)
FDM	: Fused Deposition Modeling (Kaynaştırılmış Yığma Modelleme)
LMD	: Laser Metal Deposition (Lazer Metal Biriktirme)
LOM	: Laminated Object Manufacturing (Lamine Nesne İmalatı)
MJM	: Multijet Modeling (Çok Jetli Modelleme)
PP	: Plaster Based Printing (Alçı Esaslı Baskı)
SHS	: Selective Heat Sintering (Seçici Isıtmalı Sinterleme)
AA	: Aluminum Association (Alüminyum Birliği)
DED	: Directed Energy Deposition (Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme)
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi

- DIN : German Institute for Standardization (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
- SEM : Scanning Electrone Mikroskobe (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayısal Kontrol)
- MSE : Hata Kareler Ortalaması
- RSM : Hata Kareler Ortalaması Karekökü
- R^2 : Belirlilik Katsayısı
- MAPE : Ortalama Mutlak Yüzde Hata

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İmalat, doğada yalın haliyle işlevsel olmayan hammaddelerin işlenerek insanların kullanabileceği bir forma dönüştürülmesini sağlayan işlemlerin bütünüdür. İnsanoğlu tarih boyunca birçok farklı imalat teknolojisi kullanmış ve ihtiyaçlar doğrultusunda bu teknolojileri geliştirmişlerdir. Günümüzde imalat teknolojileri temel olarak talaşlı ve talaşsız imalat olarak ikiye ayrılabilirler. Talaşlı imalat hammadde üzerinden talaş kaldırılarak yapılan malzeme eksiltici yöntemleri tanımlamaktadır (frezeleme, tornalama, delme, taşlama vb.). Talaşlı imalatın aksine malzeme eklenerek gerçekleştirilen imalat yöntemleri ise talaşsız imalat teknolojileri olarak tanımlanmaktadır (plastik şekil verme, 3B üretim, kaynak, döküm vb.). Günümüzde artan nüfus ve gelişen teknolojiye bağlı olarak, her geçen gün daha fazla sayıda ve daha özel ihtiyaçlara yönelik ürün ihtiyacı da artmaktadır. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri spesifikleşen bu ürün özelliklerini ve artan ürün taleplerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle yeni üretim teknolojilerine yapılan yatırımlar da her geçen gün artmaktadır. Son yıllarda gelişen teknolojiyle hayatımıza giren eklemeli imalat yöntemleri bunların başında gelmektedirler.

3 boyutlu imalat olarak da bilinen eklemeli imalat (additive manufacturing) bilgisayar ortamında tasarlanmış bir parçanın katmanlar halinde plastik, seramik, metal veya kompozit gibi çok farklı türde malzemeler kullanılarak üretilmesi işlemleridir. Bu teknoloji ile karmaşık geometrili parçalar uygun maliyetler ile üretilmektedir. Bazı eklemeli imalat yöntemleri ise yüksek maliyetli olmalarına rağmen herhangi bir alternatif yöntem ile üretilmeyecek parçaların üretilmesine imkân sağladığı için bu maliyetleri göz ardı edilmektedir. Uygun maliyet ve hızı sebebiyle bazı alanlarda yaygın olmasına rağmen kullanım zorluğu olan malzemeler dezavantaj teşkil etmektedir.

Eİ teknolojileri, plastik, seramik, kompozit ve metal alaşımları gibi bilindik malzemelerin yanı sıra çikolata, hamur, alçı, beton gibi spesifik malzemelerin de üretimde kullanılabilmesini sağlamaktadır. Ancak üretimlerin büyük bir kısmında yaygın olarak metaller ve alaşımlar ham madde olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları ise bu ham maddeleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Hafif, ucuz ve termal iletkenliği yüksek malzemeler olduğu için alüminyum alaşımları, havacılık, uzay, otomotiv ve ev aletleri gibi hayatımızın her alanında yer aldığından eklemeli imalat materyalleri içerisinde de önemli bir yere sahiptir. Diğer malzemelerde de olduğu gibi alüminyum alaşımları da üretim sırasında plastik deformasyona maruz kalmaktadır. Oluşacak deformasyonun miktarı ve malzemenin uygulanacak etkilere göstereceği tepkilerin önceden bilinmesi üretim sağlığı açısından önemlidir. Plastik deformasyon süresince kullanılacak işleme parametreleri deneysel çalışmalar ve/veya sonlu elemanlar yöntemini esas alan nümerik analizlerin yapıldığı simülasyon programları ile optimize edilebilmektedir. Bu simülasyonlar zaman ve maliyet açısından deneysel çalışmalara kıyasla daha fazla avantaja sahiptir. Ancak doğru ve kullanılabilir sonuçların elde edilebilmesi için kullanılacak malzeme modeline ait parametrelerin doğru biliniyor olması gerekmektedir. Doğru parametreler kullanılarak yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile daha fazla benzerlik göstermektedir.

Bu çalışmada, Eİ endüstrisinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen malzeme yapısal parametreleri hakkında yeterli bilgi bulunmayan bir alüminyum alaşımı olan AlSi10Mg üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan numuneler AlSi10Mg alaşım tozundan SLM teknolojisiyle üretilmiştir. Çalışma kapsamında, malzemelerin yarı-statik ve yüksek sıcaklık etkilerine karşı gösterdikleri davranışların doğru şekilde tespit edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook modeline ait parametrelerin bulunabilmesi amacıyla yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri yapılarak test sonuçlarından elde edilen değerlerle sonlu elemanlar yöntemini baz alan Ansy programında çekme simülasyonları oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanarak, oluşturulmuş olan malzeme modelinin doğruluğu ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

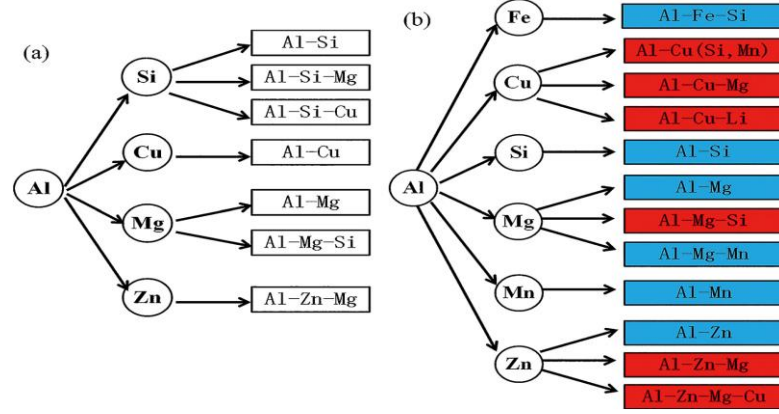
BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE EKLEMELİ İMALATTA KULLANIMLARI HAKKINDA

Demir ve çelikten sonra en yaygın kullanılan metal yapı malzemeleri olan alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları, yüksek özgül mukavemetleri, yüksek korozyon dirençlerinin yanısıra kolay işlenebilirliği, yüksek termal ve elektrik iletkenliği gibi özellikleri sebebiyle otomotiv, deniz araçları, silahlar, güç elektroniği, uzay ve havacılık gibi alanlarda kullanılmaktadır [1,2].

Alüminyum alaşımları mikro yapılarına, bileşimlerine ve uygulanan işlem özelliklerine bağlı olarak işlenmiş alüminyum alaşımlar ve döküm alüminyum alaşımlar olarak kategorize edilebilir. Genel olarak, döküm alüminyum alaşımlarının alaşım element içeriği % 10- % 12 iken, işlenmiş alüminyum alaşımlarının içeriği % 1-% 2'dir (bazı durumlarda% 6-% 8 kadar yüksek olabilir). Alaşımın çökeltme sertleştirilmesi ile ısıtılma yanıtı verip vermediğine göre, alüminyum alaşımları ayrıca Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ısıtılma görebilen ve ısıtılma göremeyen alüminyum alaşımları olarak da ayrılabilir [3].



Şekil 2.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması: (a) döküm alaşımları. (b) işlenmiş alaşımları. Isıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları mavi, ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları kırmızı renktedir [4].

Günümüzde alüminyum alaşımlı yapısal parçalar esas olarak döküm, dövme, ekstrüzyon ve toz metalurjisi gibi geleneksel yöntemlerle üretilmektedir [5]. Bu işlemlerle üretilen alüminyum alaşımlı ürünler yoğun bir şekilde kullanılmasına rağmen, üretim sürecinde ve bunların uygulamalarında hala birçok sorun bulunmaktadır. Birincisi, döküm proseslerindeki düşük soğutma hızı mikroyapıyı kaba yapmakta ve döküm alüminyum alaşımlarında ofset kusurları, büzülme gözenekliliği, cüruf katılımı ve parçaların mekanik özelliklerini düşüren element ayrımı gibi birçok kusur barındırmaktadır [6,7,8]. İkincisi ise, yüksek performanslı alüminyum alaşımlı bileşenleri hazırlama ve biçimlendirme süreci ayırdır, bu da sınırlı esnekliğe sahip uzun bir işlem zincirine neden olur. Ayrıca modern endüstriyel gelişmelerle birlikte alüminyum alaşımlı parçaların yapı ve performans gereksinimleri sürekli artmaktadır. Örneğin, yüksek ısıl iletkenlik, hafiflik ve yüksek yük taşıma kapasitesi gibi mühendislik gereksinimlerini karşılamak için, havacılık ve uzay aracı motorlarının ısıl koruma sistemi genellikle bir kafes veya hücresel yapı kullanır. Karmaşık yapısal bileşenlerin tamamlayıcı şekillendirilmesi, sadece küçük ve orta boyutlu bileşenlerin imalatı ve montajı için gerekli zamanı ve kullanılan araçları azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kaynak ve diğer birleştirme yöntemleri ile ilişkili ağırlık ve stres konsantrasyonlarını da azaltır [9,10,11].

Qiu vd. soğuk püskürtme yöntemiyle eklemeli olarak imal edilen A380 alüminyum kompozitlerin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini kapsamlı şekilde incelemişler ve bu özellikleri iyileştirmek için hibrit bir yaklaşım geliştirmeye çalışmışlardır. Bu

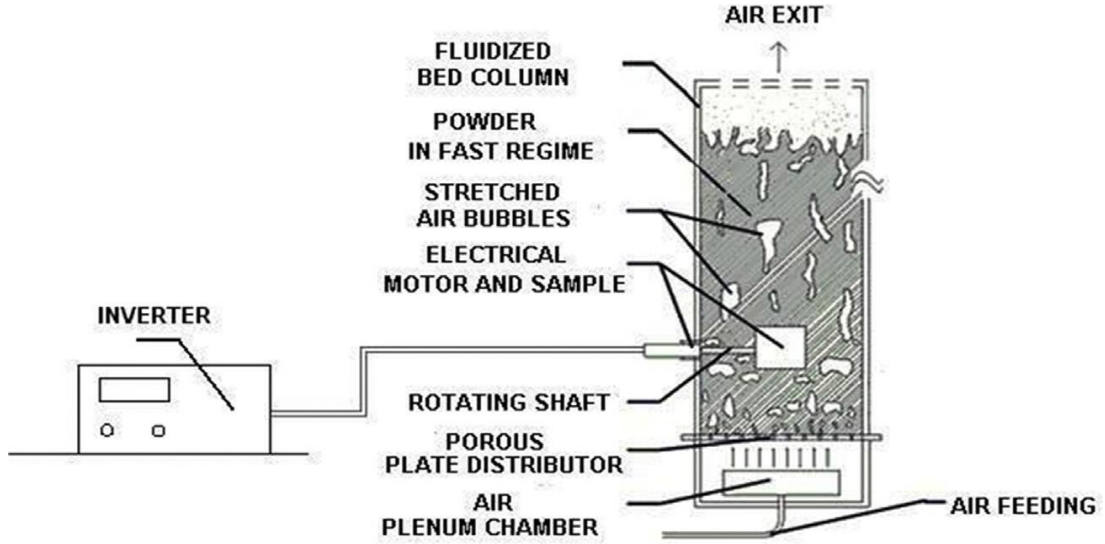
bağlamda, küresel şekilli, düzensiz ve küresel+düzensiz şekilli Al₂O₃ partiküllerinin A380 alaşım tozu ile ayrı ayrı karıştırılmasıyla üç farklı tip kompozit hazırlanmıştır. Püskürtülen katmanlar daha sonra 350 ° C'de 4 saat ısıtılma tabii tutulmuştur. Al₂O₃ morfolojisinin A380'in mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, sırasıyla elektron geri saçılım kırınım analizi ve çekme testi ile farklı işleme aşamalarında sistematik olarak incelenmiştir. Ayrıca eriyik havuzlarındaki kusurların (gözenek ve kaymalar) değişimi X-ışını bilgisayarlı tomografi ve transmisyon elektron mikroskobu teknikleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sonuçlar, küresel Al₂O₃ içeren katmanların saf A380 alaşım katmanlarının aksine tane büyüklüğünün ve gözenek yoğunluğunun daha az, mukavemetinin ise %70 daha fazla olabileceğini gösterdi. Bu durum ise Al₂O₃ parçacıklarının sıkıştırma etkisine bağlanmıştır. Ayrıca çekme testi sonuçlarına göre ısıtılma uygulanan numunelerdeki nano boyutlu gözeneklerin oluşumunda azalma ve plastisitede artma gözlenmiştir. Çalışmacılar A380 alaşım tozuna yardımcı sıkıştırıcı ekleme ve ısıtılma tabii tutma hibrit yaklaşımı sayesinde mikroyapının optimize edilebileceğini belirtmişlerdir [12].

Sistiaga vd. Al7075'in alaşım bileşimini değiştirerek bu malzemenin seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle işlenebilirliğini iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu çalışmayı yapmalarının nedeni, seçici lazer eritme yöntemi ile üretilmiş Al7075 içeren ürünlerin optimumun altında bir yoğunluğa ve mikro çatlaklara sahip olmasıdır. Alaşıma ekledikleri %4 oranındaki silikon sayesinde alaşım yoğunluğu %99 seviyesine yükselmiş ve mikro çatlaklar önemli ölçüde azalmıştır [13].

Foehring vd. eklemeli imalat ile üretilmiş Ti-6Al-4V'nin gerilme davranışını farklı uzunluktaki numuneler üzerinde iki boyutlu dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemlerini kullanarak karakterize etmişlerdir. Çalışma Ti-6Al-4V numunelerinin mikro yapı ve kütle mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi karakterize etmeye, sütunlu tanecik morfolojisi ve dengesiz faz yapıları gibi eklemeli imalat metalleriyle ilgili benzersiz mikro yapısal özelliklerin mikro ölçekte deformasyon davranışını nasıl etkilediğini anlamaya odaklanmaktadır. Gerçekleştirilen tek eksenli statik gerilme deneylerinden elde edilen verilere göre üretildiği haliyle Ti-6Al-4V numuneleri literatürdeki değerlerine kıyasla daha yüksek akma dayanımı ve daha düşük süneklik göstermişlerdir [14].

2.2. ALSİ10MG ALAŞIMINA DAİR YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

E. Atzeni vd. doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı yüzeylere bitirme işlemi (finiş) olarak aşındırıcı akışkan yatak (AFB) yönteminin uygulanabilirliğini; yüzey ve aşındırıcılar arasındaki etkileşim, dönme hızı ve aşındırıcı tipi gibi parametrelerin işleme performansı ile ilişkilerini tespit ederek incelemiştir. Yüzeylerin morfolojik özellikleri ve geometrik toleranslar, alan emisyon tabancası-taramalı elektron mikroskobu (FEG-SEM) ve kontak profilometre ile incelenmiştir. Kısa işleme döngülerinden sonra düz yüzeyler daha pürüzsüz bir yüzey morfolojisine sahipken (ortalama $1.5\mu\text{m}$ pürüzlülük) kenarlar ise çok düşük düzeyde aşınmıştır. Aşındırıcının geometrik özelliklerinin iş parçasının son yüzey kalitesi üzerinde çok etkili olduğu; küresel aşındırıcının tek başına mikro aşındırmaya, açılı aşındırıcının ise bir miktar malzeme kaldırarak hem mikro aşındırmaya hem de mikro kesime uygunluğu belirlenmiştir. Bu çalışma AFB yönteminin eklemeli imalat ile üretilmiş metal parçalar için, otomatikleştirilmesi kolay, düşük maliyetli, az zaman alan ve sürdürülebilir bir son yüzey işleme yöntemi olduğunu ortaya koymuştur [15].



Şekil 2.2. AFB işlemi için gerekli ekipmanlar.

E. Brandl vd. yaptıkları çalışmada seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numunelerin mikro yapısını, yüksek çevrim yorgunluğunu

(HCF) ve kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Bunun için üretim platformu ısıtılmamış (30 °C), ısıtılmış platform (300 °C) ve 0°,45°,90° üretim açılarındaki üzere toplamda 91 farklı numune üretilmiştir. Numuneler pik sertleştirilmiş (T6) ve sertleştirme işlemi uygulanmamış halleriyle teste tabi tutulmuş, test sonucu elde edilen Wöhler eğrileri Weibull dağılımı fonksiyonu ile enterpole edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yorulma direnci üzerinde üretim sonrası uygulanan ısıtma işleminin en önemli etkiye sahip olduğunu, üretim yönü ve açısının ise en az etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, numunelerin yorulma direncinin DIN EN 1706 standardına göre oldukça yüksek olduğu, 300 ° C platform ısıtma ve pik sertleştirme uygulamalarının kombinasyonu yorulma direncini artırmak ve 0,45,90 açılarındaki üretilen numunelerin yorulma ömürlerindeki farklılıkları nötralize etmek için önemli olduğu tespit edilmiştir [16].

F. Gül AlSi10Mg alaşımına uygulanacak ikinci yaşlandırma işleminin abrasif aşınma direnci ve sertlik üzerindeki etkisini araştırmak için T6 pik ısıtma işleminde numuneleri 4 saat boyunca 170° C’de yaşlandırmıştır. İkincil yaşlandırma işleminde ise 170 ° C’de 10 ve 30 dakikalık iki farklı periyotta yaşlandırılmış numuneler ardından 100° C’de 135 saat yeniden yaşlandırılmıştır. Abrasif aşınma testleri 20 ve 30 N aşınma yükleri altında, 180 Mesh zımpara ve 0,2 ms⁻¹ kayma hızında pin on disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar 170°C’de 30 dk yaşlandırıldıktan sonra 100°C’de 135 saat tekrar yaşlandırma uygulanan numunenin en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir [17].

A. Hadadzadeh ve arkadaşları direkt metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımının yapı yönünün sütunludan eş eksenliye geçiş (CET) davranışına etkisini incelemişlerdir. Aynı boyutlara sahip iki silindirik numune aynı işlem parametreleri kullanılarak dikey ve yatay yönlerde üretilmişlerdir. Farklı karakterizasyon teknikleri kullanılarak numunelerin mikro yapıları ve bunlara bağlı mikro özellikleri incelenmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Numunelere uygulanan mikro yapısal çalışmalar yapı yönünün düşeyden yataya değiştirilmesiyle hem dentritik hem de tane yapılarının sütunludan eş eksenliye değiştiğini ortaya koymuştur.

- CET DML SAISI10Mg alaşımının mikro özelliklerini de etkilemiştir. Dikey numunede yüksek yoğunluklu dolaşık dislokasyonlarla karakterize edilen α -Al dentritlerin içinde çok ince şekilde dağılmış ve birbirini tutan Si çökeltileri gelişmiştir. CET sonucunda yatay numunede dislokasyon yoğunluğu azalmış ve Si çökeltilerinin boyutu artmıştır.
- Si çökeltileri dikey numunedeki matris ile tamamen uyumlu olsa da yatay numunedeki büyümeleri muhtemelen mekanik özellikleri etkileyebilecek şekilde uyumsuzluğa yol açmıştır [18].

E. Zaretsky ve arkadaşları, farklı yönelimlere sahip SLM ile üretilmiş AlSi10Mg numuneleri ve aynı bileşime sahip kum döküm yöntemiyle üretilmiş numuneleri 273 ve 470 m/s hızlarındaki bakır çarpma düzeneği tarafından bir dizi düzlemsel çok yüklemesine maruz bırakarak dinamik tepkilerini incelemişlerdir. Testler sonucunda SLM ile işlenmiş alaşımların dinamik tepkisinin, işlem yönünden hemen hemen bağımsız olduğu bulunmuştur. Aynı zamanda, SLM ile işlenmiş alaşımların dinamik akma dayanımı, döküm muadillerine göre neredeyse iki kat daha yüksekken, SLM ile hazırlanmış numunelerin dinamik gerilme (kopma) mukavemeti döküm alaşımının dört katıdır. Bunun sebebi ise SLM ile üretilmiş malzemelerin daha homojen yapıya sahip olmasına bağlanabilir [19].

B. Nurel vd. SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı numunelere dinamik özelliklerini araştırmak için parçalı Hopkinson ubuğu (SHPB-PH) testleri uygulamışlardır. X ve Z eksenli numuneler dinamik özellikleri, üretildiği haliyle ve T5 ısıl işlem görmüş (T5-HT) durumlarında, 700-7900 s⁻¹ aralığında değişen gerinim oranlarında SHPB kullanılarak incelenmiştir. Araştırma, söz konusu alaşımın 1000-3000 s⁻¹ düzeyinde gerinim hızlarına tabi tutulduğunda, dinamik özelliklerinin yapı yönüne önemli derecede bağlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Numunelerin T5 ısıl işlemine tabi tutulmasıyla farklı yönlerde yüklendiğinde alaşımın dinamik karakteristikleri arasında gözlenen farklılıkların azaldığı, ancak ortadan kaldırılmadığı bulunmuştur. Mikroskopik görüntülerde T5 ısıl işlem uygulanmamış test örneklerinde bulunan kusurların işlem uygulanmış örneklerde bulunmadığı grlmştir [20].

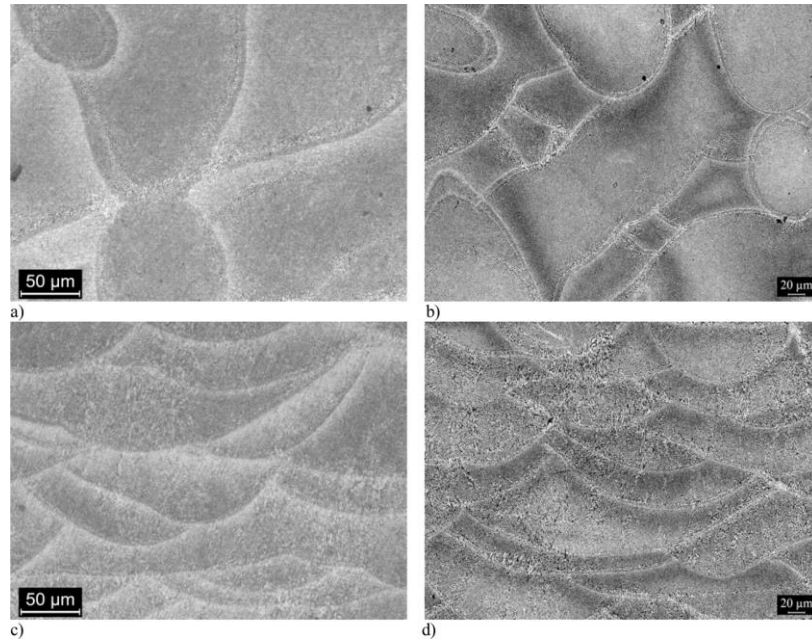
Brandão vd. yaptıkları çalışmada L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) yöntemini kullanarak ürettikleri AlSi10Mg numuneyi X-ışını tomografisi ve yorulma testleri ile analiz etmişlerdir. İşlem parametrelerinin değişimi % 0,4-0,8 seviyelerinde füzyon gözenekleri olmayan numune setlerinin ve % 0,05 çok düşük gözenekliliğe sahip bazı numune setlerinin oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca bazı numuneler yüzey işleme uygulamaları uygulandıktan sonra test edilmiştir. İşlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğünün kusur popülasyonlarından bağımsız olarak yorulma direncinde önemli etkiler göstermesi yüzey pürüzlülüğünün yorulma direnci açısından rolünün önemini göstermiştir [21].

L. Hitzler vd. yaptıkları çalışmada çökelme ile sertleştirilebilen AlSi10Mg alaşımı altı farklı karakteristik oryantasyonda konumlandırılmış ve eğim farklılıklarının sertleşme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ek olarak yüzey durumuna ve üretim sonrası uygulanan termal son işlemlere bağlı olarak üst üste binen etkiler hesaba katılmıştır. Çalışma kapsamında: gerinim ölçme cihazları ile kapsamlı gerilme testleri yapılarak iki yöndeki gerilmeler saptanmış, çeşitli koşullarda ayrıntılı yüzey sertliği araştırmaları yapılmış ve mikro kesitler incelenmiştir. Ana yön bağımlılıkları ortaya çıkarılmış ve tavlama prosedürleri ile birlikte gerilme mukavemeti ve yüzey sertliği sonuçları, karşılaşılan bulguları açıklayarak tutarlı sonuçlar sergilemiştir [22].

A. Hadadzadeh vd. çalışmalarında DMLS yöntemi kullanılarak üretilmiş AlSi10Mg numunelerin dinamik yüklere gösterdiği tepkileri farklı üretim açıları kullanarak incelemişlerdir. AlSi10Mg alaşımına ait çubuk şeklindeki numuneler doğrudan metal lazer sinterleme tekniği kullanılarak dikey ve yatay yönlerde üretilmiş ve 1400 s⁻¹ gerilme hızında Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHPB) kullanılarak dinamik yüklemeye tabi tutulmuştur. Örnekleri iki yönde de imal etmek için aynı işlem parametreleri kullanılmasına rağmen üretilen numuneler sırasıyla dikey ve yatay numunelerde sütunlu ve eş eksenli mikro yapılar şeklinde farklı mikro yapılara sahiptir. Buna ek olarak, dikey numunede ince ve tutarlı Si çökeltileri, yatay numunede kaba ve yarı tutarlı çökeltiler gözlenmiştir. Ayrıca üretim yönünün yataydan dikeye değiştirilmesi dislokasyon yoğunluğunda üç kat artışa neden olmuştur. Dikey ve yatay numunelere sıkıştırma darbe yükleri uygulandıktan sonra, ilk mikro yapılardaki

önemli farklılıklara rağmen, iki numunenin dinamik yükleme davranışının neredeyse benzer olduğu bulunmuştur [23].

M. Cabrini ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışma ısı işlemlerin doğrudan Metal Lazer Sinterleme yoluyla elde edilen bir AlSi10Mg alaşımının korozyon direnci üzerindeki etkisi ile ilgilenmektedir. Testler, işlenmiş alaşım üzerinde ve farklı ısı işlem sonrası stres giderici yüksek sıcaklıkta tavlama ve su verme işleminden sonra gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi testleri havalandırılmış Harrison solüsyonunda yapılmıştır. Sonuçlar işlenmemiş veya sadece gerilim giderme işlemi uygulanmış numunelerde eriyik havuzlarının sınırlarında lokalize korozyon ve seçici nüfuz etme davranışı olduğunu göstermektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda tavlama yapıldığında bu davranışlar görülmemiştir [24].



Şekil 2.3. Numune mikroyapılarına ait optik görüntüleri.

C. Zhang vd. yaptıkları çalışmada SLM ile üretilerek farklı ısı işlemlere tabi tutulan AlSi10Mg numunelerin yorulma özellikleri araştırılmıştır. Numuneler üretildikten sonra gerilim giderme, çözelti işlemi ve çözelti+yapay yaşlandırma gibi birtakım işlemler uygulandıktan sonra test edilmişlerdir. Testler sonucunda hiçbir işlemeye tabi tutulmamış numunenin en yüksek, çözelti işleme uygulanmış numunenin ise en düşük

yorulma özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlemler numunenin yorulmasını azaltmıştır. Yorulma özelliğinin, nihai gerilme mukavemeti veya uzamasının yanında akma mukavemeti ile de yakından ilgili olduğu bulunmuştur. Yorulma özelliğindeki ve statik mekanik özelliklerdeki değişiklik, esas olarak mikroyapısal dönüşümden kaynaklanmaktadır. Isıl işlem Si'nin boyutunu ve morfolojisini değiştirerek yorgunluk özelliğinde bir azalmaya neden olur [25].

E. Beevers vd. eklemeli imalatla üretilmiş AlSi10Mg'nin yorgunluk davranışı ve proses parametrelerinin etkisi ve bunlar sonucunda ortaya çıkan olası kusurların yorgunluk davranışları üzerindeki etkisini karakterize etmeye çalışmışlardır. İlk olarak, üretim yönü, platform sıcaklığı, toz tabakası kalınlığı, yüzey kalitesi ve ısıl işlemin yorulma özellikleri üzerindeki etkisi doğrulandı. Sonuçlar, işlem parametreleri ile aynı son işleme uygulanmış AlSi10Mg parçalarının yorulma özellikleri arasında doğrudan bir korelasyon olduğunu gösterdi. Gözlemler, parametrelerin değiştirilmesinin kusurlu popülasyon özelliklerini etkilediğini ve yorgunluk ömrünü belirlediğini göstermektedir. Uygulanan gerilim giderici ısıl işlemler, akma dayanımı test edilen gerilim seviyesine yakın bir seviyeye düşürüldüğünde potansiyel olarak numunelerde plastik deformasyona yol açtığından, yorgunluk özellikleri üzerinde de olumsuz bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [26].

Bazı çalışmalar SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg'nin mikro yapısını ve performansını karakterize etmeye çalışırken, özellikle anizotropik etkilerle ilgili yeterli çalışma yapılmamıştır. T. Maconachie ve arkadaşlarının çalışması literatürdeki bu eksiği gidermek için yapılmıştır. AlSi10Mg numuneler SLM yöntemiyle üç farklı üretim açısıyla üretilmiş ve malzemenin gerilme özelliklerini karakterize etmek için $3,33 \times 10^{-2}$ ila $2,4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ arasında değişen oranlarda yarı statik ve dinamik bölünmüş Hopkinson çekme çubuğu testleri yapılmıştır. Üretilen numunelerin mikro yapısı ve başarısız numunelerin kırılma yüzeyleri analiz edilmiştir. Yarı statik ve dinamik sonuçlar, mukavemet açısından yapı yönelimleri arasında çok az fark olduğunu, ancak üretim yönüne dik olarak yüklenen bileşenlerin diğer yapı yönelimlerine göre daha esnek olduğunu göstermiştir. Yapı oryantasyonunun, dinamik olarak test edilen numunelerin kırılma yüzey morfolojisini, eriyik havuzu sınırlarını takip eden kırılma yollarından dolayı etkilediği bulunmuştur [27].

2.3. JOHNSON-COOK MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASIYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Metallerin akış tepkisini anlamak için gerilme oranı, gerilme hızı ve sıcaklığın birleşik etkilerini dikkate alarak metallerin akış davranışının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, işlemin sayısal modellenmesi ve simülasyonu için temel bir gerekliliktir. Zhao ve arkadaşları bu amaçla yüksek gerilme oranının ve yüksek sıcaklığın, lazer eklemeli imalat (LAM) ile üretilmiş FeCr alaşımlı numuneye ait deformasyon davranışları üzerindeki etkilerini, $1000-8000 \text{ s}^{-1}$ gerilme oranları ve $20-800^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu testleri ile araştırmışlardır. Deneysel sonuçlara dayanarak LAM FeCr alaşımı için Johnson-Cook modeli ve değiştirilmiş Johnson-Cook modeli oluşturulmuştur. Bu modellere ait tahminler korelasyon kat sayısı ve mutlak ortalama hata gibi istatistiksel ölçümler kullanılarak karşılaştırılmıştır. İstatistiksel ölçümlerin analizi, J-C modelinin deneysel değerlerden daha fazla sapmaya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Buna rağmen değiştirilmiş J-C modelinden elde edilen verilerin deneysel sonuçlara oldukça yakın olması sebebiyle LAM FeCr alaşımının dinamik davranışını tahmin etmek için daha iyi bir model olduğunu belirtmişlerdir [28].

Xing vd., SLM ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı numunelerin ultrasonik işlem süreçleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. SLM yöntemiyle üretilmiş numunelerin üst yüzeylerine ultrasonik çekiçleme işlemi (Ultrasonic Peening Treatment-UPT) uygulanmıştır. Artık gerilmeler, UPT'den önce ve sonra bir X-ışını stres kırınım cihazı ile ölçülmüştür. Bu arada, UPT'nin numunelerin artık gerilme alanı üzerindeki etkisini analiz etmek için bir sonlu eleman simülasyon yöntemi önerilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. İlk olarak, fabrikasyon numunede artık gerilim dağılımını elde etmek için numunenin SLM işleminin termal mekanik bağlantılı sayısal simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunenin UPT sürecinin geçici dinamik sonlu eleman simülasyon modeli oluşturulmuş ve UPT etki analizi uygulanmıştır. UPT simülasyonunda, artık stres numune üzerinde bir ön stres olarak uygulanmıştır ve numunenin malzeme mekanik özellik parametreleri Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHPB) deneyi ile belirlenen Johnson-Cook modeli tarafından tanımlanmıştır. Bu

çalışmalar sonucunda sonlu elemanlar modeli tarafından tahmin edilen UPT öncesi ve sonrası artık gerilim dağılımının, ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirtilmiştir [29].

Kadkhodapour ve arkadaşları, 0.11-0.35 g/cm³ yoğunluk aralığında bulunan elmas ve kübik birim hücre kafes yapılarının tekrarlanmasıyla oluşturularak SLM yöntemiyle üretilmiş gözenekli ve biyouyumlu Ti6Al4V malzemelerin, deformasyon mekanizmalarını incelemişlerdir. Gözenekli numunelerin mekanik davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle incelendikten sonra deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Ayrıca numunelerin basınç altında sergiledikleri mekanik davranışlar yarı-statik yükleme koşullarında değerlendirilmiştir. J-C hasar modeli bulunan sonlu eleman modellerinin %18'den daha düşük hata ile gerilmelerin tahminini gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir. Kübik birim hücreli yapıların uzama eğilimi olan yapılarla benzer, elmas birim hücreli yapıların ise eğilme eğilimi olan yapılarla benzer karakteristiklere sahip olduğunu belirtmişlerdir [30].

Segebade vd. eklemeli olarak üretilen AlSi10Mg malzemelerde birikme yöntemine bağlı anizotropik malzeme deformasyon davranışlarını belirlemek için numunelere çekme testleri uygulayarak karakterize etmişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2B kesme simülasyonlarında da uygulamalarda bulunmuşlardır. Ek olarak, simülasyonları doğrulamak için ortogonal kesme deneyleri yapılmıştır. Araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini baz alan simülasyonlarda birim şekil değişim miktarı, şekil değişim hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak akış gerilimini hesaplamak için Johnson-Cook malzeme modelini kullanmışlardır. Kullanılan Hill 1948 anizotropi modeli en basit modellerden birisi olmasına rağmen talaş geometrisinin eğilimlerini ve talaş segmentasyon davranışlarını simülasyonlarda doğru bir şekilde gözlenmesini sağlamıştır [31].

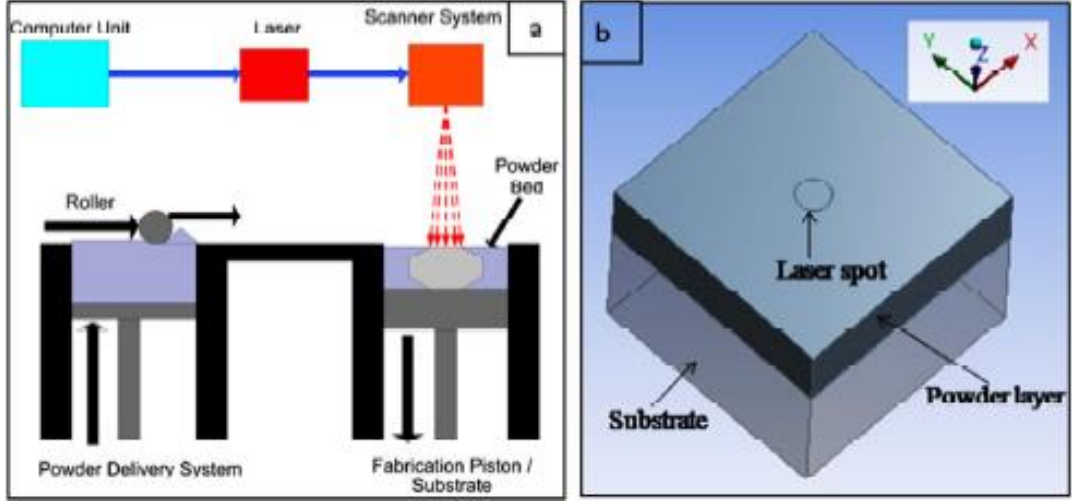
Qian vd. CuCrZr alaşımının çok çeşitli gerinim hızları ve sıcaklıkları üzerindeki dinamik sıkıştırma davranışını Split Hopkinson Basınç Çubuğu kullanarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarına dayanarak, CuCrZr alaşımının dinamik özelliğini tanımlamak için Johnson-Cook modeli kullanılarak yapısal bir denklem oluşturulmuştur. Sonuçlar dinamik davranış üzerindeki gerilim, gerilme hızı ve sıcaklığın etkilerinin bağımsız olmadığını göstermiştir. Bu nedenle değiştirilmiş bir

Johnson-Cook modeli gerilim, gerinim hızı ve sıcaklığın bağlantılı etkilerini hesaplayabilmek için daha da geliştirilmiştir. Orijinal Johnson-Cook modeliyle karşılaştırıldığında, değiştirilmiş Johnson-Cook modeliyle hesaplanan sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir [32].

2.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN ANALİZİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN KULLANIMI

Seçici lazer eritme (SLM) yöntemi geleneksel imalat işlemlerine kıyasla daha kontrol edilebilir hacim fraksiyonuyla periyodik kafes yapıları oluşturmaya imkân sağlaması açısından önemlidir. Z. Li vd. yüksek gözenekliliğe ve %4,5 ile %22,5 arasında hacimsel fraksiyona sahip 12 adet periyodik elmas kafes yapıları AlSi10Mg numune üretmişlerdir. Bu numuneler gerilim konsantrasyonunu azaltmak için düğümlerdeki optimize edilmiş yarıçapta ve kafes yapıları büyük boşluklar ve çatlaklar olmayan düzgün bir formda üretilmiştir. Kafes yapılarının gözle görülür deformasyonunu ve katı desteklerdeki mikroskobik gerilme ve gerinim gelişimini değerlendirmek için tam ölçekli üç boyutlu bir sonlu eleman (FE) modeli oluşturulmuştur. Lokal plastik gerilmeler, düğümlerin yakınında oluşarak bu bölgede plastik menteşe benzeri yapıların gelişimiyle destek yapılarının elastik kalmasını sağlamaktadır [33].

M. Samantaray ve arkadaşlarının bu araştırma çalışması, ANSYS 17.0 kullanılarak AlSi10Mg kompozit tozların DMLS üretim yönteminde sinterleme işlemi sırasında sıcaklık dağılımı ve erimiş havuz oluşumunun tahmini için sonlu bir eleman modeli geliştirmeye odaklanmıştır. Direkt metal lazer sinterleme işleminde sıcaklık dağılımı, termal geçmiş, erimiş havuz boyutu, sinterleme derinliği, farklı lazer nokta çapı ve toz tabaka kalınlığında incelenmiştir. Simülasyon sonucundan lazer nokta çapı 2 mm'den 6 mm'ye çıktıkça erimiş havuzun yüzey sıcaklığının 4626°C'den 541°C'ye düştüğü görülmüştür. Böylece toz yatağının erimiş havuz uzunluğu, genişliği ve sinterleme derinliği 3 mm'den 0 mm'ye düşer. Benzer şekilde, toz yatağı tabakası kalınlığı 1 mm'den 3 mm'ye çıktıkça eriyik havuzunun saha sıcaklığı 1200°C'den 1075°C'ye ve sinterleme derinliği 0,243 mm'den 0,112 mm'ye düştüğü görülmüştür [34].



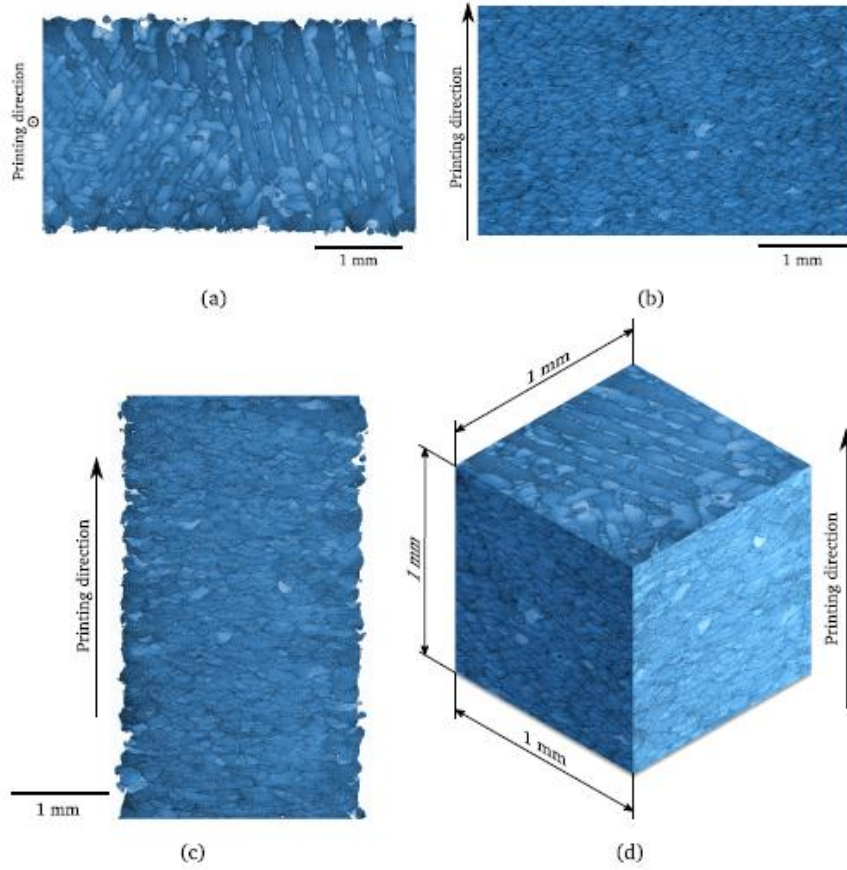
Şekil 2.4. (a) DMLS sürecinin şematik diyagramı; (b) hesaplama alanı.

S. Liu vd.'nin yaptığı çalışma, termal değişkenleri hesaplayarak ve sütunludan eş eksenliye geçiş (CET) kriterini kullanarak tek parça halinde SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg'nin mikro yapısını öngörmek için yapılmıştır. İlk olarak hem eriyik havuz boyutları hem de yol özelliği ile doğrulanan anizotropik termal iletkenliklerle yüksek doğrulukta bir geçici üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. İkinci olarak, sonlu eleman modeli, eriyik havuzunun sıcaklık gradyanı, soğutma hızı ve katılma hızı gibi termal değişkenleri doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılmıştır. Tahmin edilen termal değişkenler ve deneysel mikro yapı birleştirilmiş ve sütunludan eş eksenliye bir geçiş kriteri oluşturularak deneysel sonuçların AlSi10Mg'nin mikro yapısını çok iyi tahmin edebildiği doğrulanmıştır [35].

P. Wang vd. yaptıkları çalışmada seçici lazer eritme (SLM) ile üretilen AlSi10Mg bileşenlerinin gerilme davranışını, tek eksenli çekme testi ve görüntü tabanlı sonlu eleman simülasyonu ile araştırmışlardır. Yapıların ilk morfolojik özellikleri mikro X-ışını tomografisi ile görüntülenmiştir. Ayrıca, yeniden yapılandırılmış model ve ilk tasarlanan model karmaşık üretim süreçleri nedeniyle kaçınılmaz olan proses kaynaklı kusurları ölçmek için karşılaştırılmıştır. Yoğunlaşmadan sonra eritme havuzuna yapışan erimeyen AlSi10Mg tozlarının, yan kenarlarda sapma artışına neden olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, düzensiz dağılmış proses kaynaklı kusurlar AlSi10Mg alaşımının anizotropik mekanik özellikler göstermesine yol açmıştır. İlk morfolojik özelliklerin bu numunelerin mekanik davranışları üzerindeki etkisini tartışmak için

sonlu eleman çözücü ABAQUS / Standard tarafından simule edilen X-ışını tomografi görüntüleri ve CAD modelinden iki sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Geometrik kusurlar Young modülünü ve akma dayanımını biraz düşürmesine rağmen toplu yapıların eşdeğer plastik deformasyonunu önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca, görüntü tabanlı sonlu elemanlar modeli ve sünek başarısızlık kriteri tarafından tahmin edilen nihai mukavemet ve uzama, geometrik kusurların etkisi nedeniyle tasarlanan model tarafından tahmin edilen değerlerden çok daha düşüktür [36].

M. Costas vd. seçici lazer eritme (SLM) ile üretilen AlSi10Mg kare kutuların yarı statik yüklemesi üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Amaç, ortak sonlu eleman modelleme tekniklerinin malzeme ve bileşen ölçeklerinde, büyük deformasyonlar ve kırılma altında 3B üretilmiş parçalara uygulanabilirliğini değerlendirmektir. Tek eksenli çekme numuneleri çıkarılmış ve farklı yönelimlerde test edilmiş ve Voce sertleştirme ve Cockcroft-Latham kırılma kriterine sahip hipoelastik-plastik bir model deneysel sonuçlara göre kalibre edilmiştir. Kutular, küresel bir aktüatör kullanılarak bozulana kadar yanal olarak ezilmiştir. Ele alınan malzeme ve sonlu eleman modellerinin, incelenen senaryoda eklemeli imalatla üretilen bileşenlerin yapısal tepkisinin tahmini için çok uygun olduğu kanıtlanmıştır [37].



Şekil 2.5. Malzemenin mikro yapısının metalografik resimleri: üstten görünüş (a), önden görünüş (b), yandan görünüş (c) ve üç boyutlu görüntü (d).

2.5. LİTERATÜRÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde lazer toz yataklı eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımına dair yapılmış çalışmaların daha çok malzemenin dinamik özelliklerine odaklandığı görülmektedir. Ancak bu alaşıma ait malzeme yapısal parametrelerinin elde edilebilmesi amacıyla yapılmış çalışmalar yetersiz kalmaktadır.

Eklemeli imalat yöntemleri karmaşık yapıların yekpare olarak üretilmesine imkan sağlamasının yanısıra zaman ve nakit tasarrufu da sağladığı için her geçen gün kullanımı artan bir üretim şeklidir. Bunun yanısıra pahalı ve üretimi daha zor olduğu için özel üretim gerektiren parçalar da yine eklemeli imalat ile üretilmektedir. Özel üretim gerektiren bu parçalar numerik olarak modellenerek üretim öncesinde bilgisayar

destekli analiz programları (COMSOL Multiphysics, Ansys, Abaqus, Nastran vb.) sayesinde simülasyon ve analizleri yapılarak en optimum şekilde üretilmeye çalışılmaktadır. Eklemeli imalat ürünlerinin modellenmesi amacıyla en yaygın olarak kullanılan numerik yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sanal analizler kullanılacak malzemenin ve üretilecek ürünün davranışlarının üretim öncesinde tahmin edilerek zaman kaybını önlerken maliyetleri de düşürmesi sebebiyle mühendislik disiplinleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.

Malzemelere uygulanan plastik deformasyona sebep olan dinamik test verilerinin sonlu elemanlar yöntemini temel alan programlardan elde edilen veriler ile uyuşması sonuçların daha tutarlı olmasını sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan modellere bağlı olarak malzemenin gerilme değerleri, birim şekil değiştirme hızı, deformasyon miktarı ve sıcaklığa bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Malzemede elastik ve plastik bölgelerde yer alan değişimler, kullanılan malzemeye özgü bazı parametrelerle ifade edilir. Malzemedeki malzemeye farklılık gösteren bu değerler kullanılan bilgisayar programına girilerek değişen koşullar altında malzemenin göstereceği davranışlar belirlenebilmektedir. En yaygın kullanılan malzeme mukavemet modelleri Zerilli-Armstrong, Bodner-Partom ve Johnson-Cook (JC) modelleridir. Bu tez kapsamında Johnson-Cook malzeme modelinden yararlanılacaktır. JC modeli malzemeye ait akma dayanımı, yüksek sıcaklıklardaki davranışları, pekleşme özelliklerini ve plastik deformasyon davranışlarını ifade eden bazı parametrelerden oluşmaktadır.

Yapılan çalışmalar ve literatür incelendiğinde AlSi10Mg alaşımının elastik ve plastik deformasyon simülasyonlarının yapılabilmesi için malzemeye ait Johnson-Cook malzeme yapısal parametrelerini belirlemeye yönelik çalışmaların yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında bir eklemeli imalat yöntemi olan seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak üretilen AlSi10Mg alaşımlı numunelere çekme testleri uygulanacaktır. Testlerden elde edilen veriler ışığında Ansys programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak malzemeye ait Johnson-Cook yapısal parametrelerinin doğrulanması amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 3

EKLEMELİ İMALAT

ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu) F2792-10 standartına göre eklemeli imalat “geleneksel makineyle işleme gibi çıkarmalı üretim metodolojilerinin aksine, malzemelerin 3 boyutlu model verilerinden nesnelere yapmak için genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi sürecidir” [38,39].

Eklemeli imalat düşüncesi teorik olarak aslında 1970’li yıllara dayanmasına rağmen 1983 yılında Amerika’da Chuck Hull tarafından ilk defa son kullanıcıya yönelik parça imalatı amacıyla kullanılmış bir üretim şeklidir [40]. Eİ’nin pratikteki kullanımı 1987 yılında plastik işleme tekniği olan STL (stereolitografi) tekniğinin ticarileştirilmesi ile yaygınlaşmıştır. 90’lı yıllarda hammadde olarak metal ve seramik kullanımıyla üretim şeklinin ismi “Eklemeli İmalat” olarak tanımlanmıştır [41,42]. 1991 yılında FDM ve LOM yöntemleri ticarileşerek Eİ teknolojileri için bir dönüm noktası olmuştur. Bu sayede Eİ teknolojilerinin endüstride kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmıştır. Bu teknolojilerin keşfinden kısa bir süre sonra SLS yöntemi geliştirilmiş, 1994 yılında ise Alman EOS firması DMLS yöntemini kullanan M160 model kodlu makinesini tanıtmıştır. 2002 yılına gelindiğinde ise Doğrudan Metal Biriktirme (DMD) sistemlerinin satışına çoktan başlanmıştır. Zamanla bu sistemler daha verimli ve güvenilir hale gelirken kullanılan malzeme çeşitliliği de giderek artmıştır [43].

Üç boyutlu (3B) imalat ya da eklemeli imalat olarak bilinen üretim teknolojileri çok kapsamlı bir kullanım alanına sahiptir. Bu nedenle çok sayıda şirket ve araştırma kurumu bilinen yöntemleri bırakarak eklemeli imalat yöntemlerine yönelmektedirler. Sahip olduğu avantajlardan ötürü kullanımının yaygınlaşması kullanılan filament, malzeme ve tekniklerin de hızla gelişmesini sağlamaktadır [44].

Eklemeli imalat yöntemleri klasik talaşlı malzeme eksiltici imalat yöntemlerinin tersidir. Talaşlı imalatta ham malzeme bloğundan parçalar kopararak istenilen şekil ve boyutta ürün elde edilirken eklemeli imalatta ise parçalar katmanlar halinde birleştirilerek oluşturulur. Bu nedenle eklemeli imalatta malzeme kullanımı daha azdır. Eklemeli imalat yöntemlerinde metal, seramik, plastik, kompozit gibi malzemeler kullanılabilirdiği gibi ürüne özel spesifik üretim malzemeleri de kullanılabilir. Sahip olduğu geniş malzeme yelpazesinin yanında çok karmaşık geometrilerdeki ürünlerin en az malzeme kaybıyla üretilmesini sağladığı için her geçen gün kullanımı artmaktadır. 3D yazıcılarda sarf malzemesi olarak ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), plastik, poliamid (nylon), cam dolgulu poliamid, stereolitografi malzemeleri (epoksi reçineler), gümüş, titanyum, çelik, balmumu, fotopolimerler ve polikarbonat gibi birçok malzeme kullanılabilir [45].

Gelecekte çocuklar internetten indirecekleri üç boyutlu bir oyuncak verisi ile oyuncaklarını yapabilecekler ve evde kullanılan herhangi bir cihaz kırıldığında, kırılan parçayı doğrudan fabrikadan getirme ihtiyacı hissetmeden, sadece gerekli geometri veya malzeme bilgisini satın alarak üretmeleri mümkün olacaktır [46]. Bunun yanı sıra eklemeli imalat teknolojileri mobilya, oyuncak, kuyumculuk, tıp, diş hekimliği, havacılık ve uzay sanayi, otomotiv gibi birçok alanda kullanılmaktadır [47].

Eklemeli imalat ya da diğer adıyla 3 boyutlu baskı, hızlı prototipleme teknolojisiyle bütünleşmiş teknolojik bir terimdir. Hızlı prototipleme kavramı birçok farklı endüstride bir ürünün seri üretime geçmeden önce hızlı ve kolay bir şekilde prototipinin hazırlanmasına yardımcı olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün gelişim sürecinde müşteri ve ortakların ürüne dair fikir edinebilmeleri ve geri bildirimde bulunabilmelerine fırsat veren bu sisteme hızlı prototipleme adı verilmiştir. İlk başlarda sadece prototipleme amacıyla kullanılan bu teknoloji günümüzde ise birçok farklı amaç için kullanılmaktadır [48].

Eİ teknolojileri, geniş bir yelpazede ve birbirlerinden oldukça farklı ürünlerin üretimine imkân sağlayan sistemleridir. Bu teknolojiler imalatta kullanılan malzeme çeşidine ve işlem süreçlerine bağlı olarak birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Endüstride

yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemlerin kısa tanımları Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir [49].

Çizelge 3.1. Eklemeli imalat yöntemleri.

Eİ Teknolojisi	Tanımı
Binder Jetting (BJ)	Yapıştırıcı(bağlayıcı) püskürtme
Digital Light Processing (DLP)	Dijital ışık işleme
Direct Metal Deposition (DMD)	Direkt metal depozisyonu
Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Direkt metal lazer sinterleme
Electron Beam Melting (EBM)	Elektron ışını ile eritme
Fused Deposition Modeling (FDM)	Birleştirmeli yığma modellemesi
Laser Metal Deposition (LMD)	Lazer metal biriktirme
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Lamine nesne imalatı
Multijet Modeling (MJM)	Çok jetli modelleme
Plaster Based Printing (PP)	Alçı esaslı baskı
Selective Heat Sintering (SHS)	Seçici ısıtılmalı sinterleme
Stereolithography (SLA)	Stereolitografi
Selective Laser Melting (SLM)	Seçici lazer eritme
Selective Laser Sintering (SLS)	Seçici lazer sinterleme

ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu), 2012 yılında eklemeli üretim yöntemlerini üretimde kullanılan malzemenin türüne ve katmanların işlem süreçlerine göre 7 kategoriye ayırmıştır [50]. Bu kategoriler, ilgili Eİ teknolojisinde kullanılabilen materyaller ve yöntemin temel prensipleri göz önüne alınarak Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir [49].

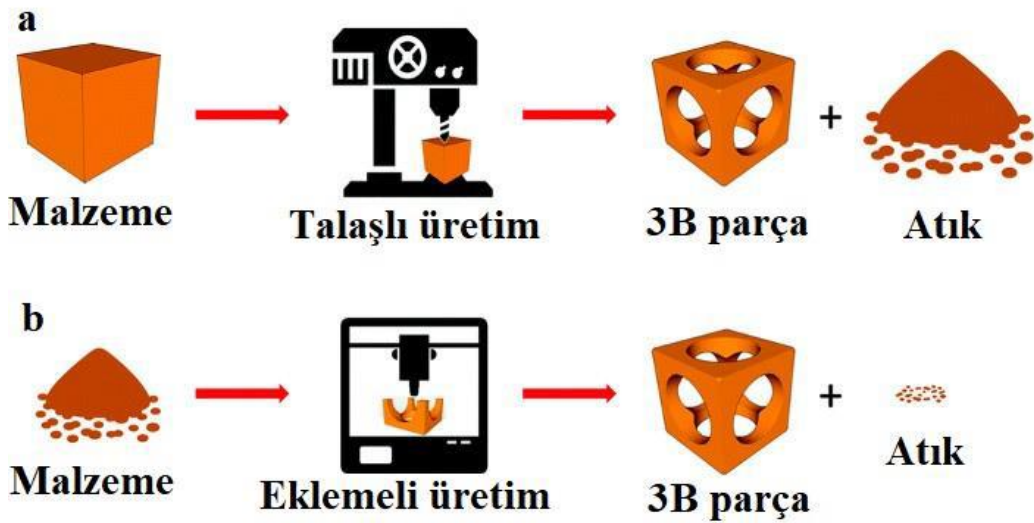
Çizelge 3.2. İşlem çeşidine göre eklemeli üretim teknolojileri.

İşlem kategorisi	Açıklama	Teknolojiler	Materyaller
Toz yatağı füzyonu	Toz yatağında seçili bölgelerin ısı ile birleştirilmesi	SLS, SLM, EBM, DMLS, SHS	Metaller ve polimerler
Doğrudan enerji biriktirme	Eriyik malzemenin ısı enerjisiyle birleştirilmesi	LMD, DMD	Metaller
Malzeme yığma	Eriyik malzemenin nozül vasıtasıyla yığın haline getirilmesi	FDM	Polimer esaslı malzemeler
Fotopolimerleşme	Likit fotopolimer ham maddenin UV ışını ile katılaştırılması	SLA, DLP	Fotopolimerik reçineler
Yapıştırıcı püskürtme	Toz yatağına yapıştırıcı püskürtülerek tozların birleştirilmesi	BJ, PP	Polimerler, metaller, alçı, kum
Malzeme jeti	Malzemenin damlacıklar şeklinde biriktirilmesi	MJM, Polyjet	Polimerler, mumlar

3.1. EKLEMELİ İMALATIN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

3.1.1. Avantajları

- Eklemeli imalat sadece üretim değil aynı zamanda tasarım sürecinde de hızlı olması sebebiyle hızlı prototipleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Öyle ki klasik üretim yöntemlerinde prototip üretme aşamasında elle şekillendirme, yontma, CNC işleme vb. zaman ve ekstra emek gerektiren uygulamalara eklemeli imalatta gerek duyulmamaktadır.
- Eklemeli imalat ile çok kompleks formdaki ürünler yekpare olarak, ekstra montaj, kaynak vb. işlemlere gerek duyulmadan üretilebilmektedirler. Klasik malzeme eksiltici talaşlı imalat uygulamalarında ise karmaşık formların üretimi zor ve birden fazla üretim sürecine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu tarz yapıların 5 eksenli CNC tezgahlarında dahi üretimi zordur.
- Talaşlı imalat yöntemleri ile kıyaslandığında eklemeli imalat teknolojilerinin üretimde daha az ham madde sarf ettiği ve daha az atık oluşturduğu görülmektedir. Bu da tercih edilecek Eİ teknolojisine bağlı olarak talaşlı imalata kıyasla daha ekonomik üretim yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.1. Üretim teknolojileri [43].

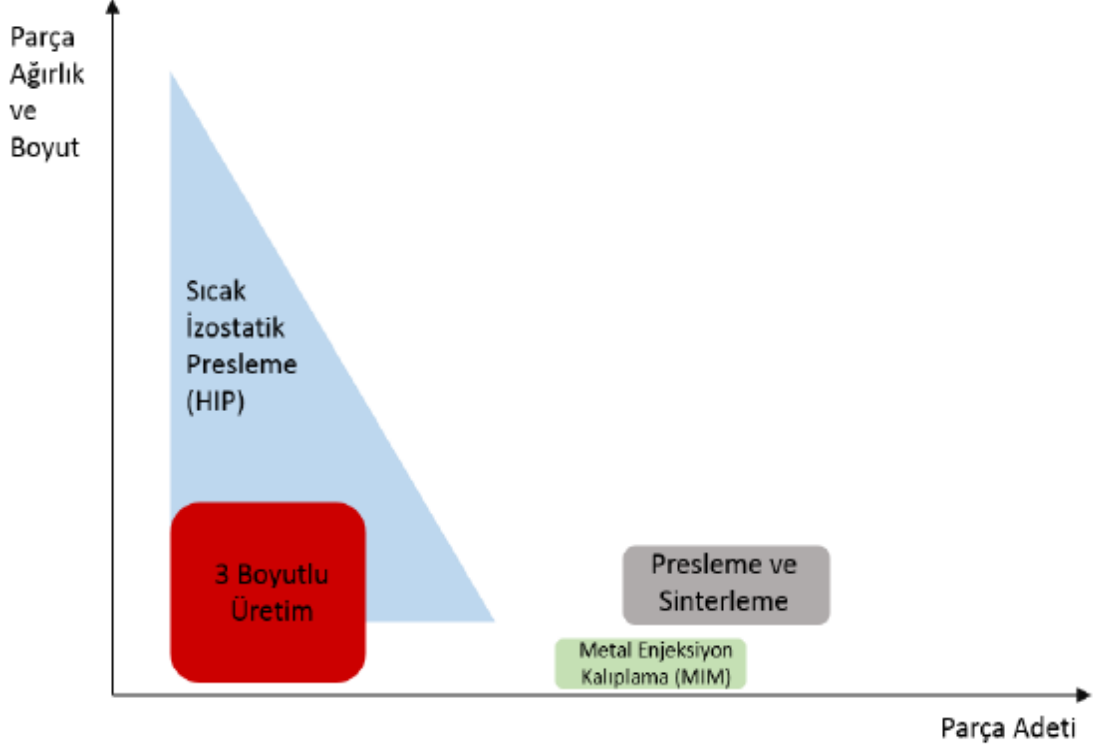
- Eklemeli imalat ürünleri sahip olduğu boşluklu yapılar sayesinde daha hafif ürünlerin üretilmesine fırsat tanımaktadır. Ayrıca bu gözenekli yapılar sayesinde medikal kullanım amacıyla üretilmiş protez ve implantlar üzerinde dokular daha kolay gelişebildiği için biyo uyumluluğu yüksek ürünler üretilmektedir.
- Tasarımcının daha özgür olabilmesine fırsat tanır. Bu sayede ürün çeşitliliğinde artış sağlanırken daha fazla kişiselleştirilmiş ürünler üretilerek spesifik ürün ihtiyacı olan müşterilerin talepleri karşılanabilmektedir.
- Kullanılan malzemeler açısından geniş bir yelpazeye sahiptir. Klasik yöntemlerde kullanılmayan malzemeler kullanılabilir. (hamur, çimento, çikolata, doku hücreleri vb.) Bunların yanısıra polimerik malzemeler, mum, kağıt laminant, kompozitler, metaller, seramikler, sunta (MDF) gibi malzemeler de kullanılabilir.
- Eklemeli imalat herhangi bir programlama diline ihtiyaç duymadan üretim yapabilmemizi sağlar. CNC tezgahları gibi klasik yöntemi kullanan cihazlar ise farklı programlama dillerini bilmemizi gerektirmektedir. Bir CNC tezgahında uygulanacak programların sırası, takım seçimi, yaklaşma açısı ve konumu, makine hızı gibi parametrelerin ayarlanması hayati öneme sahiptir. Oysa eklemeli imalatta bu parametreler daha az sayıda ve daha az karmaşıktır. Eklemeli imalatta bu değerlerin doğru belirlenmemesi parçanın hatalı üretilmesiyle sonuçlanırken klasik yöntemlerde hatalar makinenin bozulmasına ve hatta yaralanmalara neden olabilmektedir [51].
- Eklemeli imalatta çevre dostu ve ekolojik hayata zararsız malzemelerin kullanımı daha kolay olduğu için yeşil üretime imkân tanımaktadır. Günümüzde giderek önem kazanan “yeşil üretim” kavramı daha yaşanılabilir bir gelecek için önemlidir. Yeşil üretim, üretim adımlarının yenilenecek şekilde üretilmesiyle çevre dostu yöntem ve malzemelerin kullanılmasıdır. İş gücünün daha düşük doğal kaynak kullanması, daha az atık ve kirleticinin oluşması, ürünlerin geri dönüştürülebilmesi yeşil üretim kapsamında ele alınabilir [52].

- 3D yazıcılar, üretim adımlarını basitleştirmeyi, üretim süreçlerini modernleştirmeyi ve stokları azaltmayı mümkün kılar [53]. Sipariş teslimat süreleri kısa olduğu için stok amaçlı depo kullanma ihtiyacı da minimuma indirgenebilmektedir.
- 3B üretim yapan yazıcıların sahip olduğu bir diğer avantaj ise bulut tabanlı üretim yapabilmeleridir. Gelen siparişler yazıcıya direkt iletilerek kalıp ve hat ihtiyacı olmadan hızlı bir şekilde üretim yapılabilir. Sahip olduğu bu teknolojik özellikleri sayesinde endüstri 4.0 uygulamaları içinde önemli bir yere sahiptir [54].

3.1.2. Dezavantajları

- Eklemeli imalat her ne kadar hızla yaygınlaşıyor olsa da günümüzde hala en yaygın kullanılan üretim yöntemleri klasik yöntemlerdir. Bu da özellikle metal eklemeli imalatta kullanılan malzeme yelpazesinin klasik yöntemlerdeki kadar geniş olmamasına neden olmaktadır.
- Karmaşıklık içermeyen basit parçaların üretimi klasik yöntemlerle daha kolay olabilmektedir. Talaşlı imalat ile ekstra yüzey işlemeye gerek duyulmadan üretilebilecek parçalar eklemeli imalat ile üretildiğinde yüzey hassasiyetleri düşük olduğu için ekstra işleme ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle yüksek hassasiyet gerektiren parçalar çoğunlukla klasik yöntemlerle üretilmekte veya yüzey finiş işlemleri klasik yöntemlerle yapılmaktadır. Eğer ürün sadece yüzey işleme uygulamasına değil farklı işlemlere de ihtiyaç duyuyorsa gerekli süreçler doğru analiz edilerek en uygun yöntem seçilmelidir.
- Eklemeli imalat teknolojisi, sınırlı sayıda ve kompleks parçaların üretimi açısından uygun olmasına rağmen seri üretim için ekonomik bir çözüm değildir.

3.2. EKLEMELİ İMALATIN KULLANIM ALANLARI



Şekil 3.2. 3B Üretim teknolojisinin diğer sistemler içerisindeki konumu [55].

3B imalat yöntemleri heykel, mozaik, gravür vb. kültür miraslarının eksik veya kırılan kısımlarının restorasyonunda da kullanılabilir. Bu sayede daha önce 3 boyutlu olarak taranmış görselleri kullanılarak orijinal görüntülerine kavuşabilmektedirler [56].

Tıp alanında 3B üretim giderek yaygınlaşmaktadır. Mühendisler ve doktorlar birlikte çalışarak tamamen kullanıcıya göre özelleştirilmiş 3 boyutlu yazdırılabilir protezler geliştirebilmektedirler. Örneğin Alman bisiklet yarışı şampiyonu Denise Schindler, Rio 2016 Paralimpik Oyunlarında tamamen 3D baskılı protez bacakla rekabet eden ilk kişi olmak için Autodesk ile çalışmıştır [57]. 3B teknolojileri ile üretilmiş protez ve implantlar sahip olduğu gözenekli yapılar sayesinde kemik ve diğer dokuların bu gözeneklerle daha kolay bütünleşmesini sağlamaktadır. 3B üretim yöntemleri ile üretilmiş organlar kullanılarak karmaşık cerrahi operasyonlar daha basite

indirgenebilmektedir [58,59]. Gelecekte insanoğlunun ihtiyaç duyduğu birçok organı 3B üretim yöntemleri ile üretebilecek duruma geleceği düşünülmektedir [60].

İnşaat sektöründe de 3B üretim teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Yaygın olarak ekstrüzyon (çimento, köpük, balmumu ve polimerler), toz bağlama ve katkı kaynağı yöntemleri kullanılmaktadır. Bu teknolojilerin ortak avantajları; karmaşık yapıların yüksek doğrulukla üretilebilmesi, düşük inşa süresi, düşük işçilik maliyeti, az atık oluşturması ve yüksek entegrasyon sayılabilir. Dünyada 3B üretim yöntemleriyle üretilmiş ilk bina 2017 yılında Rusya'da tamamlanmıştır. Ayrıca mimari projelerde çizime ait ölçekli maketlerin ve görsellerin hazırlanmasında da sıklıkla tercih edilmektedir [61].

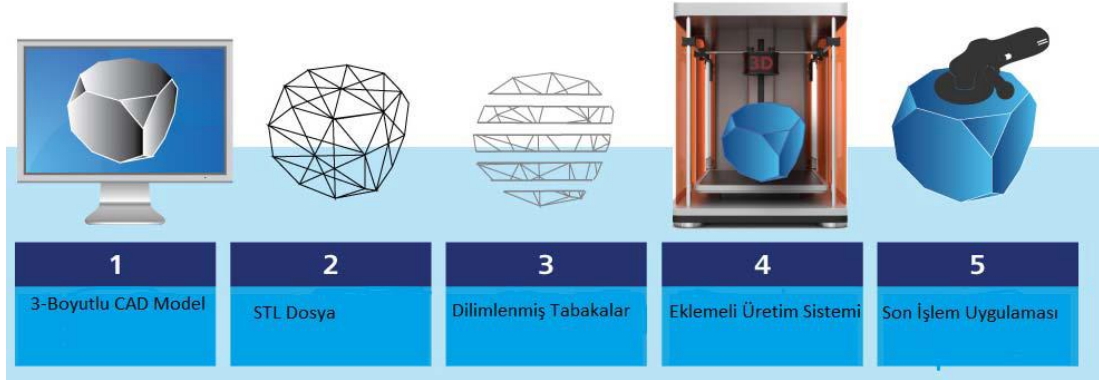
Eİ teknolojileri takı ve mücevherat üretiminde model kalıplarının üretilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. 3B yazıcılar sayesinde mücevher tasarımcıları klasik tasarım yöntemlerinin dışına çıkarak sıradışı tasarımlara imza atabilmektedirler.

Günümüzde birçok eğitim kurumu eklemeli imalat teknolojilerini müfredatlarına dahil ederek öğrencilerin daha uygun maliyetlerde hızlı bir şekilde proje geliştirebilmelerini sağlamaktadır. Bu sayede soyut fikirler daha kolay hayata geçirilebilmektedir. Özellikle üniversitelerde öğrenci projelerinde hızlı prototip ve numune üretimine yardımcı olarak uygulanacak test ve analizler sırasında öğrencilere büyük kolaylık sağlamaktadır.

3.3. EKLEMELİ İMALATTA İŞLEM ADIMLARI

Eklemeli imalat ile bir parçanın üretiminde temel mantık bilgisayar destekli tasarımı yapıp katmanlara ayrılmış modele ait parametrelere bağlı kalınarak ürünün katmanlar halinde üst üste birleştirilmesidir. Bu katmanların kalınlığına bağlı olarak üretilen ürünün yüzey kalitesi artarken ürünün son yüzey işleme uygulamalarına olan ihtiyacı da azalmaktadır. Katman kalınlığı, üretim şekli, kullanılan malzemelerin farklı oluşu gibi etkenler üretilen ürünün yüzey kalitesi, üretimin maliyeti, üretim hızı, ürünün mekanik davranışları ve diğer malzeme özelliklerinin de farklı olmasına neden olmaktadır.

Eklemeli imalat, sanal ortamda ürün tasarımından başlayıp somut nihai ürünün üretilmesine doğru uzanan birçok işlem basamağına sahip bir üretim şeklidir. Eİ uygulamalarının hemen hemen tümünde benzer olarak uygulanan bu üretim basamakları Şekil 3.3’de gösterilmiştir [62]. Elde edilmek istenen ürün özelliklerine bağlı olarak bu işlem basamakları artabilmekte ve farklı üretim teknikleri kullanılabilir. İlk prototip oluşturma aşamasında hassas üretim yapmak önemli bir ihtiyaç değilken nihai üretim sürecinde daha hassas ürün özellikleri önem arz etmektedir. Bu nedenle nihai üretim aşamasında üretime ait işlem basamakları daha planlı, optimum maliyetli ve maksimum ürün kalitesine yönelik olacak şekilde seçilmelidir.



Şekil 3.3. Eklemeli imalat işlem basamakları.

3.3.1. 3B Modelin Oluşturulması

Eklemeli imalat sürecinde üretilecek ürünün 3 boyutlu tasarımı ve buna ait parametreler (et kalınlığı, yükseklik, genişlik vb.) bilgisayar ortamında bulunmak zorundadır. Bu tasarım bilgisayar destekli çizim (CAD) programlarıyla oluşturulabileceği gibi halihazırda üretilmiş bir ürünün uygun tarayıcı teknolojileri ile taranarak bilgisayar ortamına aktarılıp düzenlenmesiyle de oluşturulabilir.

3.3.2. Modelin Uygun Formatta Kaydedilmesi

Bu aşamada tasarımı tamamlanmış CAD modeli tasarımın yapıldığı arayüzde veya Alibre, AutoCAD, Blender, Solidworks, Magic vb. programlar aracılığıyla STL dosya

formatında kaydedilir. Bu işlem 3B modelin yüzeyini küçük üçgenlere ayırarak yüzey geometrisinin daha basite indirgenmesini bu sayede de dilimleme yazılımının 3B CAD modeline ait geometrik parametreleri tanımlamasını sağlar. Günümüzde bir standart haline gelen STL dosya biçimi dışında .3MF, .obj, .X3D gibi formatlar da endüstriyel olarak kullanılabilir. STL dosyası kaydedildikten sonra model üzerinde tasarımsal değişiklik yapılamamasına rağmen modelin yönü ve ölçeği değiştirilebilir.

3.3.3. Modelin Dilimlenmesi

Uygun formatta kaydedilmiş modellerin üretilebilmesi için 3B modelin 2B katmanlar halinde dilimlenmesi gerekmektedir. Modelin üretimi için uygun katman kalınlıkları dilimleyici yazılımla ayarlanarak nozül hareketleri için gerekli G-kodlarını da elde etmemizi sağlar. Aynı zamanda bu programlar sayesinde modelin tamamen boş mu yoksa dolu mu olacağı, baskı yoğunluğu, baskı hızı, modelin yönü gibi parametreler de ayarlanabilir. Modelin üretim yönü kullanılacak malzeme miktarını ve üretim süresini değiştirebildiği için en uygun yön tayin edilmelidir.

3.3.4. İmalat Aşaması

Belirlenen katman kalınlıklarında dilimlenerek imalata hazır hale getirilmiş modele ait veriler üretimin yapılacağı platforma aktarılır. Bu verilerin transferi kablolu, kablosuz veya fiziksel bir depolama aygıtıyla yapılabileceği gibi bulut depolama sistemleri de kullanılabilir.

Veri transferi gerçekleştikten sonra imalata başlanabilmesi için kullanılacak makineye ait malzeme ayarları, enerji kaynağı, üretim kalınlığı ve zamanlama ayarlarının düzgün şekilde yapılması gerekmektedir. Bu ayarlar doğrultusunda üretim aşaması başlatılır. Üretim aşamasında güç kesintisi, malzemenin bitmesi veya herhangi bir aksilik durumunda müdahalede bulunabilmek için cihazın izlenmesi yeterlidir.

3.3.5. Son İşlemlerin Uygulanması

İmalatı tamamlanan ürünler, üretim tablası ile birlikte makineden çıkarıldıktan sonra uygun kesici ekipman kullanılarak tabladan ayrılır. Üretim aşamasında ürünün ihtiyaç duyduğu destek yapıları temizlenerek parçanın kullanım amaçlarına yönelik son yüzey işlemleri ve ısıl işlemler uygulanır. Kullanılan destek yapısı malzemenin ham maddesinden farklı olabilir. Geleneksel petrol bazlı destek yapıları sürdürülebilir değildir, geri dönüştürülemezler ve imalat sonrası temizlenmeleri zordur. Petrol türevi destek yapılarının yerine selüloz nano kristal jel kullanılabilir. Bu jel suda nano partiküllerine ayrışabilmesi sebebiyle üretim sonrası destek yapılarının temizlenmesini oldukça kolaylaştırmaktadır. Ayrıca UV ışınlarına duyarlı olmaması UV ışını kullanılan eklemeli imalat uygulamalarında diğer malzemelerle bağlanabilirliğinin düşük olmasını sağlar. Bu da kolay temizlenebilirliği artıran başka bir etkidir [63].

3.4. EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN MALZEMELER

3.4.1. Metal Eklemeli İmalat (MEİ) Dışında Kullanılan Malzemeler

Eİ yöntemlerinde rijit haldeki polimerlerden akışkan reçinelere kadar oldukça farklı malzemeler ham madde olarak kullanılabilir. MEİ yöntemlerinde kullanılan cihazlardan farklı olarak taşınabilir kompakt yazıcılar, daha çok son kullanıcıyı hedeflediği için kullanılacak malzemelerin de daha uygun fiyatlı ve kolay elde edilebilir olması gerekmektedir. Bu malzemelerin başlıcaları şunlardır;

- Polimerler (ABS, PLA)
- Kağıt
- Laminant
- Kompozitler
- Termoplastikler
- Fotopolimerlerik reçineler
- Beton, alçı, kum
- Tahta, ağaç kabuğu, bamboo
- Karbon fiber ve grafen
- Çikolata, hamur, mum vb. spesifik malzemeler

Her geçen gün artan plastik kullanımına bağlı olarak artan plastik üretimi metal üretim hızıyla yarışacak bir konuma gelmiştir. Plastikler içeriğinde yer alan polimer çeşidine göre iki gruba ayrılmaktadırlar. En yaygın olarak kullanılan polimerler termoplastik polimerlerdir. Diğer polimer çeşidi ise termostatik polimerlerdir [64].

Malzeme ekstrüzyonuna dayanan eklemeli imalat yöntemlerinde en yaygın olarak kullanılan malzeme ABS içerikli filamentlerdir. ABS üçlü monomer yapısına sahip, stiren ve akrilonitrilin polibütadien ortamında polimerleştirilmesiyle üretilen bir termopolimerdir [65].

3.4.2. Metal Eklemeli İmalatta (MEİ) Kullanılan Malzemeler

MEİ teknolojilerinde istenilen ürün özelliklerine bağlı olarak çeşitli metal toz karışımları kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan alüminyum, paslanmaz çelik, kobalt-krom, nikel, titanyum ve diğer alaşımlar Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir [66].

Çizelge 3.3. Metal eklemeli imalatta yaygın kullanılan malzemeler.

	Malzeme	DIN Standartı
Alüminyum Alaşımları	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Kobalt Alaşımları	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Takım Çelikleri	AISI420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357
Nikel Alaşımları	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856

Çizelge 3.4. (devam ediyor).

	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Paslanmaz Çelikler	SS 304	1.4301
	SS 316L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542
Titanyum Alaşımları	Titanyum Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Değerli Metal Alaşımları	Altın	18 Carat
	Gümüş	930 Sterling
Bakır Alaşımları	CC 480 K	2.1050

Titanyum Alaşımları

Milan vd. yaptıkları çalışmada titanyumun sahip olduğu kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı yüksek aşınma ve korozyon direnci, yüksek ağırlık oranı, yüksek sıcaklıklara dayanım gibi avantajlara sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu özellikleri titanyumun denizcilik, tıp, nükleer, havacılık ve uzay teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [62,67].

Alüminyum Alaşımları

Dünya üzerinde silisyum ve oksijenden sonra en fazla bulunan element alüminyumdur. Yer kabuğundaki elementlerin yaklaşık %8'ini alüminyum ve onun bileşikleri oluşturmaktadır. Alüminyum ve alaşımları, doğada fazla bulunması, kolay elde edilebilmesi, düşük ağırlıkta olması, uygun mekanik özellikleri (yüksek

dayanım/ağırlık oranına sahip olması), yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, koku ve kimyasallara karşı direnci, geri dönüştürülebilirliği gibi birçok avantajı sebebiyle günümüzde çelikten sonra en yaygın kullanılan metal türüdür [68,69].

Alüminyumun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri, kullanılacak alaşım elementlerinin mikro yapıda oluşturduğu değişimlere bağlı olarak değişmektedir. Uluslararası otoritelerce kabul edilmiş Amerikan Alüminyum Birliği (Aluminum Association, AA) tarafınca üretim yöntemleri esas alınarak alüminyum alaşımları, dökümlenebilen ve yoğrulabilen alaşımlar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Yoğrulabilir alüminyum alaşımlar genellikle döküm sonrası plastik şekil değişimine uğrayarak istenilen son şekli almaktadırlar. Döküm alaşımlar ise ergitme işleminden sonra istenilen geometriye sahip kalıba eriyik malzemenin dökülerek daha sonrasında katılaştırılması ile elde edilmektedirler [69,70].

Alüminyum sahip olduğu bu avantajlarından ötürü Eİ yöntemlerinde kendine çok fazla kullanım alanı bulmaktadır. Eklemeli imalatta en yaygın kullanılan alüminyum alaşımları AlSi10Mg, AlSi7Mg, AlSi12'dir.

3.5. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ

3.5.1. Lazer Esaslı Yöntemler

Lazer eklemeli imalat yöntemleri düşük veya orta güçte lazer ışınları kullanılarak malzemenin eritilmesi, katılaştırılması veya sertleştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Lazer esaslı işlemler malzemenin faz değişim mekanizmalarına bağlı olarak farklılık göstermektedirler. Bu işlemler lazer polimerizasyon ve lazer eritme olarak ikiye ayrılır. Lazer polimerizasyon işleminde daha çok ışın tepkimesi olan reçine türevleri kullanılarak ışın sonrası reçinenin katılaşması sağlanır. Lazer eritme işleminde ise toz yatağındaki ya da nozül tarafından püskürtülen toz lazer ışını sayesinde önce eriyip daha sonra katılaşarak istenilen ürün elde edilir.

3.5.1.1. Stereolitografi (Stereolithography-SLA)

Stereolitografi teknolojisi oda sıcaklığında sıvı olarak bulunan fotopolimerik reçinenin UV lazer ışınlarına maruz kaldıktan sonra katılarak şekil alması mantığına dayanmaktadır [71]. 3B üretim mantığına uygun olarak yapılmakta olan bu katılaştırma işlemi kürleştirme olarak adlandırılmaktadır. Diğer Eİ yöntemlerinde olduğu gibi yazılımla dilimlenmiş tasarım, G-kodları sayesinde katmanlar halinde üretilmektedir. Bu teknoloji ile belirli bir şekli bulunmayan akışkan reçineden kompleks yapılarda ürünler elde edilebilmektedir. Ayrıca reçine içerisine eklenecek seramik tozlarının fotopolimerizasyonu ile daha karmaşık yapıların üretimi yapılabilir [72]. SLA teknolojisi ile 0.05-0.15 mm aralığında değişen katman kalınlıklarında üretim yapılabilmektedir. Ancak bu yöntemde kullanılan reçineler ve cihazlar diğer üretim teknolojilerine kıyasla daha maliyetlidir. Ayrıca ürünlerde büzülme ve çarpılma olabilmesi bu teknolojinin dezavantajlarından biridir.

3.5.1.2. Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing-DLP)

DLP teknolojisi de SLA teknolojisinde olduğu gibi enerji yüklü ışınların fotopolimer yapıdaki reçinelerde meydana getirdiği değişim sonucu reçinenin katılarak istenilen formlarda ürünlerin üretilmesini sağlayan bir yöntemdir. SLA yönteminden farkı, bu yöntemde kürleştirme için ışın kaynağı olarak lazer yerine LCD veya projektör kullanılıyor olmasıdır [73]. SLA, görüntü katmanını çizerek oluşturan kılavuzlu bir lazer kullanırken, DLP bir görüntünün projeksiyonunu kullanarak tüm katmanı oluşturmaktadır [74]. DLP yöntemiyle üretilen parçalar SLA yöntemiyle üretilenlerle benzer standartlara sahiptirler. Ancak DLP ile üretilen ürünlerde daha az atık parça oluşması ve üretim maliyetlerinin bir miktar daha düşük olması bu yöntemi daha avantajlı kılmaktadır.

3.5.1.3. Sürekli Dijital Işık İşleme (Continuous Digital Light Processing-CDLP)

CDLP yöntemi SLA ve DLP yöntemleriyle oldukça benzer özellikler taşıyan fotopolimerizasyon Eİ yöntemidir. Ancak kürleşmenin lazer ışını ile sağlandığı SLA ve kürleşmenin UV ışın ile sağlandığı DLP yöntemlerinden farklı olarak bu yöntemde kürleşme oksijen ve ışık ile gerçekleştirilmektedir. Özellikle tıp ve sağlık alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojiye de benzer olarak ışığa duyarlı

fotopolimerik epoksi veya akrilik reçine içerisine gönderilen ışın sonucu katmanlar halinde kürlenene form detaylı tasarımların üretilebilmesi için oldukça elverişlidir [75]. Bununla birlikte foto çapraz bağlantı tabanlı olan bu yöntemde ürün doğruluk oranı, ışık dağıtımını destekleyen donanıma, ışık kaynağına, bu ışığa yanıt veren reçine kimyasına ve yapı platformunun konumlandırmasına bağlı olarak değişmektedir. Reçineye eklenen foto-initiatörler ve polimerler dışındaki boya veya çözücü benzeri bileşenler bu kimyayı etkileyebilir [76]. Katman çözünürlüğü veya diğer bir tabirle X ve Y eksenlerindeki çözünürlük, Dijital Işık İşleme yongası ve içinden zemin plakasına ışık yansıtan merceğ tarafından kontrol edilir. Katmanlar arası çözünürlük (Z yönündeki çözünürlük) ışığın nüfuz etme derinliği, boyaların kullanımı ve step motorun adım doğruluğu ile kontrol edilir. Katmanlar arasında yeterli yoğunlukta çapraz bağ elde etmek için genellikle bir miktar aşırı sertleştirme gerekir [77].

3.5.2. Malzeme Püskürtme (Material Jetting)

3.5.2.1. Çoklu Püskürtme Modelleme (Multi Jet/Polyjet Modelling-MJM/PJM)

MJM, toz yatak füzyon (PBF) teknolojisi prensibiyle çalışan ve polimer esaslı parçaların üretiminde kullanılan yeni Eİ teknolojilerinden biridir [78]. Henüz gelişmekte olan bir teknoloji olduğu için hakkında yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. HP firması tarafından geliştirilmiştir ve 2016 yılından beri ticari olarak kullanılmaktadır [79]. MJM sistemi inşa ünitesi ve son işlem ünitesi gibi iki farklı kısımdan oluşmaktadır. Polimer tozunun malzeme erime sıcaklığına yakın bir noktada birbiriyle kaynaştırılmasıyla istenilen parçanın formu elde edilmektedir. Üretilmek istenen geometri nozüller tarafından hassas konumlara bırakılan yapıştırma ve detaylandırma araçları ile tanımlanır. İnşa platformu üzerine polimer tozunun ilk tabakası yayıldıktan sonra üretilecek parçanın geometrisine uygun olarak nozüller tarafından tozun üzerine biriktirilen kaynaştırma araçları uygun sinterleme sıcaklıklarına getirilir. Daha sonra sinterlemeyi engellemek için detaylandırma aracı parçanın kenarına bırakılır. Son olarak infrared (IR) enerji kaynağı hat tabanlı bir yol boyunca inşa platformunda bulunan tozun üzerinden geçerek kaynaştırma yardımcısı bulunan kısımları sinterler. İşlemler tüm parçaların üretimi tamamlanıncaya kadar

devam eder. Bu yöntemle dakikada otuz milyon damla basılabilir ve diğer teknolojilere kıyasla daha yüksek boyutsal hassasiyet sağlanabilmektedir [80,81,82].

Bu yöntemde çok sayıda nozül içeren baskı kafası çizgisel malzeme biriktirme işlemini çok hızlı şekilde gerçekleştirebilmektedir. Kullanılan fotopolimerler akrilik esastır. 3B üretim yapan yazıcılar içerisinde en fazla kullanılan modeller püskürtme (jetting) sistemli modellerdir. Bu modeller, kişisel üretim yapan son kullanıcıya yönelik küçük modeller olabileceği gibi küresel üretim yapan büyük firmalara yönelik pahalı modeller de olabilir. MJM yüksek hassasiyetli üretim gerektiren parçalar için mükemmel bir üretim teknolojisidir. Oldukça geniş malzeme yelpazesine sahip bu yöntem ile biyokompozit üretimi de yapılabilmektedir [83,84].

3.5.3. Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)

3.5.3.1. Eriyik Yığıma/Biriktirme Modelleme-EBM (Fused Deposition Modelling-FDM)

3B üretim denilince aklımıza ilk gelen, bireysel kullanımı en fazla olan Eİ teknolojisi eriyik yığıma modelleme (FDM) yöntemidir. 1988 yıllarında ilk defa ortaya çıkan Fused Deposition Modelling (FDM) yöntemi dilimize Eriyik Yığıma/Biriktirme Modelleme (EYM/EBM) olarak geçmiştir. Bilgisayar yazılımı sayesinde iki eksenle hareket eden ekstrüzyon başlığında bulunun ince bir nozülden eriyik plastik malzemenin akıtılarak katmanlar halinde biriktirilmesi mantığına dayanır. Üretimde kullanılan malzemeye bağlı olarak eriyik plastiğin katılaşmasını sağlayan mekanizmalar nozüle eklenebileceği gibi malzemenin hava ile doğal şekilde katılaşması da sağlanabilmektedir. Parça üretilirken oluşturulan destek yapıları üretim sonrasında ana üründen temizlenmektedir [44].

FDM yönteminin ucuz olması ve piyasada çok farklı türde masaüstü yazıcının bulunması nedeniyle son kullanıcının bu teknolojiye erişimi oldukça kolaydır. Yaygın olarak ABS, PLA ve karbon fiber filamentler kullanılırken bunların dışında özelleştirilmiş farklı kompozitlerden oluşan filamentler de kullanılabilir. Örneğin destek yapıları, suda veya başka bir solüsyonda çözünebilir içeriğe sahip

filamentlerle üretilirse üretim sonrası destek yapılarını temizlemek için harcanması gereken zaman ve iş kaybının önüne geçilmiş olur.

3.5.4. Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion-PBF)

3.5.4.1. Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS)

SLS teknolojisi, toz yataklı bir Eİ çeşidi olup üretim tozların lazer ışını sayesinde birleştirilmesi temel mantığına dayanır. Model inşa düzleminde, düzgün bir yapı elde edebilmek için kullanılan toz sistemde bulunan merdane vasıtasıyla eşit şekilde dağıtılır. Daha sonra yönlendirilmiş lazer ışını üretim düzlemindeki tozu istenilen model katmanlarına uygun şekilde tarar. Tarama sonrası yeni katman oluşumu için merdane bir katman daha toz serer. Bu işlem basamakları parça tamamlanıncaya kadar devam etmektedir [85]. SLS, hammadde olarak poliamid benzeri plastikleri ve çok çeşitli metal toz karışımlarını kullanabilen, geniş uygulama alanları bulunan bir teknolojidir.

3.5.4.2. Seçmeli Lazer Ergitme (Selective Laser Melting-SLM)

SLM üretim tekniği SLS ile benzerdir, aradaki tek fark bu yöntemle tozun sinterlenme yerine ergitilmesidir. Bu yöntemle de karmaşık 3B modeller katmanlar halinde birkaç saat içerisinde üretilebilmektedir. Hammadde olarak kobalt-krom, paslanmaz çelikler, Inconel, titanyum tozları kullanılabilir. Spesifik üretimler için harika bir teknoloji olmasına rağmen yüksek adetlere ulaşan üretimlerde birim ürün maliyeti fazla olduğundan dolayı seri üretime uygun değildir. Basit tasarımlı parçalar daha ekonomik teknolojiler ile seri üretilebilir.

3.5.4.3. Elektron Işın Ergitme (Electron Beam Melting-EBM)

EBM yöntemi genel olarak SLM yöntemiyle benzerdir. Ancak bu yöntemde önceden ısıtılmış tozlar lazer ışını yerine elektron tabancası vasıtasıyla ergitilmektedir. Bu fark EBM teknolojisinin SLM'den daha hızlı olmasını sağlamaktadır. Karmaşık geometrilere ürünler üretilebilmektedir. Buna rağmen kullanılacak malzemelerin

elektriksel iletkenliğe sahip olma zorunluluğu ve üretimin vakum ortamında yapılması bu yöntemin kullanımını sınırlandırmaktadır.

3.5.4.4. Direkt/Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering-DMLS)

Toz metal eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan DMLS teknolojisi, metal toz karışımının yüksek enerjili lazer ışınlarıyla eritilmeden sinterlenmesi temel mantığına dayanmaktadır. İmalat işlemi sırasında metal tozu bulunduğu havuzdan bir merdane ya da bıçak aracılığıyla üretim platformuna istenilen katman kalınlığında serilir. Serilmiş bu toz CAD tasarım verilerine göre yüksek enerjili lazer ışınlarıyla sinterlenir. Toz serme ve sinterleme işlemleri istenilen ürün geometrisi tamamlanuncaya kadar birbiri ardına tekrarlanır. Özel geometrilere sahip parçaların üretimi için benzersiz bir yöntem olmasına rağmen imalat süresinin, üretim aşamalarının ve maliyetinin geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla fazla olması bu teknolojinin kullanım alanlarını sınırlandırmıştır. Bu teknolojinin prototip veya deneysel amaçlı üretilecek parçalar gibi sınırlı sayıdaki üretimler için daha yaygın bir kullanımı söz konusudur [86].

3.5.5. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition-DED)

3.5.5.1. Doğrudan Metal Biriktirme-DMB (Direct Metal Deposition-DMD)

DMD üretim teknolojisi, doğrudan metal parça üretimi amacıyla kullanılan lazer teknolojisi, toz metalürjisi ve hassas üretim teknolojilerini birleştiren patentli bir Eİ yöntemidir. Tamamen patentli parçalardan oluşan bu yöntemde; patentli DMD nozülü, malzeme reçetesi, DMDCAM Eİ yazılımı ve 6 eksenli hareket kabiliyetine sahip robot kol bulunmaktadır. 20 yılı aşkın bir süredir kullanılmakta olan bu teknolojinin ilk örnekleri Dr. Jyoti Mazunder tarafından bulunmuş olup POM (Precision Optical Manufacturing) Auburn Hills isimli ABD firması iş birliği ve devlet desteğiyle daha da geliştirilmiştir. Bu gelişim sayesinde süper alaşım tozları gibi karmaşık bileşikler kullanılarak katma değeri yüksek parçalar üretilebilmektedir. Geleneksel kaplama ve

lazer eklemeli imalat teknolojilerine kıyasla elde edilen ürünler daha güçlü metalürjik bağa sahip oldukları için daha yoğundurlar [87].

3.5.5.2. Lazer Metal Biriktirme-LMB (Laser Metal Deposition-LMD)

LMB yöntemi, enerji kaynağı olarak lazer ışını kullanan ve metal bir altlık üzerinde eriyik metal havuzu oluşturma mantığına dayanan bir Eİ teknolojisidir. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition) veya Lazer Kaplama (Laser Cladding) olarak da adlandırılmaktadır. Bu teknolojiye kullanılan nozül metal tozunu koruyucu gaz ile birleştirdikten sonra lazer ışınıyla eritir. Koruyucu gaz kullanımı özellikle alüminyum gibi ısı iletkenliği yüksek metallerde istenilen mikro yapı özelliklerinin oluşturulabilmesi bakımından önemlidir. Örneğin koruyucu gaz kullanılmaması durumunda ortamda bulunan oksijen yapıda gözenekliliği artırıp ilerleyen dönemlerde oksit oluşumunu hızlandırarak ürün ömrünü kısaltmaktadır. LMB teknolojisinin ilk örneklerinde altlık sabitken günümüzde kullanılan altlıklar farklı eksenlerde açılabilir hareket edebilmektedir. Bu sayede farklı açılarda üretim yapılabilir. Üretilen ürünün kalitesini de kullanılan tezgâhın kabiliyeti belirlemektedir.

3.5.6. Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting-BJ)

BJ teknolojisi metal toz parçacıklarının sıvı bağlayıcı püskürtülerek birleştirilmesini sağlayan bir metal eklemeli imalat yöntemidir. 50µm boyutundaki toz partiküllerin bağlayıcı püskürtülerek 3 boyutlu modelin elde edildiği bu teknoloji MIT (Massachusetts Institute of Technology) laboratuvarlarında geliştirilmiştir. Üretim zeminine serilmiş metal tozlarının üzerine nozüller aracılığıyla yapıştırıcı püskürtülür ve ardından kütleme yapılır. Bu işlemler sırasında üretim platformu üretilen ürünün katman kalınlıkları kadar aşağıya indirilir. İstenilen mekanik özelliklere bağlı olarak üretilmiş parçaya sinterleme yapılmaktadır [87]. Bu üretim yönteminde platformun yükselme ve alçalmasını sağlayan sistemin hassasiyet ve titreşim oranlarının yüksek olması üretilen ürünün kalitesinin dolaylı olarak etkilemektedir.

3.5.7. Tabaka Laminasyonu (Sheet Lamination)

3.5.7.1. Lamine (Katmanlı) Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing- LOM)

Bu teknolojiye lamine (tabaka halinde bulunan) malzemeler önce kesilir ve daha sonra katman katman yapıştırılarak üretim yapılır. Besleme rulosundan gelen üretim malzemesinin üzerinden sıcak silindirin geçerek yapıştırma işlemini gerçekleştirmesi mantığına dayanmaktadır. Daha sonra istenilen şeklin ana hatları dışındaki kısımları platformun üstünde bulunan lazer yardımıyla kesilir. Bu işlemler sırasında inşa platformu, oluşturulan her katman kalınlığı kadar aşağı indirilmek zorundadır. Bu senkronize platform hareketi step motorlar ve bilgisayar kontrolcülerini vasıtasıyla sağlanmaktadır. Her katman kendisinden önceki katmana kullanılan malzemenin türüne (kâğıt, plastik, metal vb.) bağlı olarak uygun yapıştırıcı ile yapıştırılır. Tüm bu işlemler 3B geometri oluşturma işlemi tamamlanıncaya kadar tekrarlanır. Kâğıt, seramik, metal, polimer kompozitlerin kullanılabilirdiği bu yöntem büyük boyutlarda ürünlerin üretimine izin vermesi ve çevre dostu olması yönüyle klasik teknolojilerden avantajlıdır.

3.5.7.2. Ultrasonik Birleştirme (Ultrasonic Consolidation-UC)

UC teknolojisi serbest formlarda metal ürünlerin oluşturulmasına imkân sağlayan bir metal eklemeli imalat yöntemidir. Temel üretim mantığı, metal folyoların birleştirilerek istenilen formlarda ürün elde edilmesidir. ABD merkezli Solidica şirketi tarafından keşfedilmiş ve patenti alınmıştır. Genellikle prototip parçaları, plastik enjeksiyon takımları ve küçük hacimli parçalar oluşturmak için kullanılmaktadır. Kullanılan folyolar bir katı hal kaynak işlemi olan ultrasonik kaynak ile birbirlerine bağlanır. Ultrasonik kaynaktaki parçaları birleştirmek için büyük miktarlarda termal enerjiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu da füzyon bölgesinin ve termal bozulmaların oluşumunu engellemektedir. Parçanın dış hatlarını oluşturmak için üç eksenli CNC frezeleme ile parçadaki fazla malzeme kaldırılır [88].

BÖLÜM 4

MALZEME YAPISAL DENKLEMLERİ

4.1. YAPISAL DENKLEMLERİN UYGULANMASI

Mühendislik malzemeleri kullanımlarına bağlı olarak farklı gerinim kuvvetleri, gerinim hızları ve sıcaklıklara maruz kalmaktadırlar. Jet motoru parçaları, nükleer enerji reaktörleri, uzay ve havacılık malzemelerinde olduğu gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalmalarının yanı sıra savunma sanayi gibi yüksek dayanım ve mukavemet ihtiyacı olan alanlarda da kullanılmaktadırlar. Kullanılan bileşenlerin değişen bu koşullara karşı göstereceği davranışların iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu davranışlar çoğunlukla yapılacak testlerle önceden tahmin edilebilirken bazı malzemelerin ise davranışlarını ölçümleyebilmek diğer malzemelere kıyasla daha fazla zaman ve nakit kaybına neden olmaktadır.

Malzemelerin yüksek şekil değişim hızı ve farklı sıcaklıklardaki davranışlarını modelleyebilmek amacıyla mukavemet modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller basit anlamda birim şekil değişim oranı, şekil değişim hızı ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlı olarak gerilme değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu hesaplamalar sayesinde üretim öncesi tahminler yapılarak üretim ve analiz aşamalarında zaman ve nakit kaybının önüne geçilmektedir. Malzemenin elastik ve plastik deformasyon bölgelerindeki davranışları malzemenin malzemeye farklılık göstermektedir. Bu davranışlar malzemeye özgü bir takım parametrelerle ifade edilir. Bu parametreler bilgisayar ortamında kullanılarak üretilecek malzemenin istenilen koşullarda göstereceği mukavemet performansı önceden tahmin edilebilmektedir. Çizelge 4.1.'de yaygın olarak kullanılan malzeme yapısal denklemleri ve bunlara ait parametreler gösterilmektedir [89]. Johnson-Cook malzeme modeli parametrelerinin kolay belirlenebilmesi sebebiyle yüksek gerinim hızlarına bağlı deformasyonların simülasyonunda diğer modellere kıyasla daha yaygın kullanılmaktadır.

Bu model Johnson ve Cook tarafından 1983 yılında mermilerin yüksek hızlardaki deformasyonlarını belirleyebilmek için yaptıkları çalışma sırasında oluşturulmuş bir modeldir.

Çizelge 4.1. Yapısal denklem modelleri.

Yazarlar	Denklemler	Parametreler
Ludwik	$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$	$\sigma_0, K, \varepsilon^n$
Holloman	$\sigma = K\varepsilon^n$	K, n
Swift	$\sigma = K(\varepsilon_1 + \varepsilon)^n$	K, n
Voce	$\sigma = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_1)\exp(-n\varepsilon)$	σ_0, σ_1, n
Ludwingson	$\sigma = K_1\varepsilon^{n_1} + \exp(K_2 + n_2\varepsilon)$	K_1, K_2, n_1, n_2
Gladman	$\sigma = \sigma_0 + K_1 \ln \varepsilon + K_2 \varepsilon$	σ_0, K_1, K_2
El-Magd and Troost	$\sigma = K\varepsilon^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m$	$K, n, m, \dot{\varepsilon}_0$
Reiff	$\sigma = \left[K_1 + K_2 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{m}} + K_3 \sqrt{\varepsilon} \right]$	K_1, K_2, K_3, m
Cowper Symond	$\sigma_y = [\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p] \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{D}\right)^{\frac{1}{p}} \right]$	D, P $\sigma_y = \text{İlk akma gerilmesi}$ $E_p = \text{Plastik sertleşme modülü}$
Zerilli and Armstrong	$\sigma = \sigma_0 + K_1 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}}\right)^{-K_3 T} + \frac{K_2}{e^{-K_4 T}} \varepsilon^n + K_5 d^{-\frac{1}{2}}$	$\sigma_0, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, n, \dot{\varepsilon}_0$
Johnson and Cook	$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] [1 - (T^*)^m]$	A, B, n, C, m

4.1.1. Johnson- Cook Malzeme Modeli

JC malzeme modeli, gerilime etki eden gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık parametrelerinin ilişkisini Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'yi kullanarak Eş. 4.3 formülü ile ifade etmektedir.

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (4.1)$$

$$\sigma = \sigma_r \left[1 - \left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r} \right)^m \right] \quad (4.2)$$

$$\sigma \propto \ln \dot{\varepsilon}$$

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - (T^*)^m] \quad (4.3)$$

$$T^* = \frac{T-T_r}{T_m-T_r} \quad (4.4)$$

Eş. 4.3'teki m, n, A, B, C ve m sabitleri, $\dot{\varepsilon}_0$ referans gerinim hızını göstermektedir. T^* ise Eş. 4.4 şekliyle ifade edilebilir. Eş. 4.4'te bulunan T_r ifadesi referans sıcaklığını, T_m ise ergime sıcaklığını göstermektedir.

Eşitlik 4.3'te bulunan ilk parantez izotermal gerilmeyi verirken ikinci parantez gerinim hızının etkisini, son parantez ise termal etkileri kapsamaktadır. Testlerde kullanılan en düşük gerinim hızı olan referans gerinim hızında ve yarı statik gerinim hızlarından elde edilen gerinim-gerilim grafiğinden A, B ve n sabitleri elde edilebilmektedir. JC modelinin oluşturulabilmesi için minimum üç eşdeğer gerinim-gerilme eğrisi gereklidir.

Yüksek gerinim hızlarında gerçekleştirilen testlerde malzemedeki plastik deformasyondan ötürü ısınmanın etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek hızlı gerinimden kaynaklanan bu ısınma, termal yumuşatma olgusu olarak adlandırılmaktadır. Deformasyona uğrayan malzemelerin sıcaklıklarındaki bu artış, aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\Delta T = \frac{\alpha}{\rho c} \int \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.5)$$

Burada ΔT sıcaklıktaki artışı, α ısıya dönüştürülmüş plastik deformasyon yüzdesini, c ısı kapasitesini, ρ ise yoğunluğu ifade etmektedir.

4.1.2. Johnson-Cook Hasar Modeli

Johnson-Cook hasar modeli kırılma noktasına karşılık gelen gerininin yansıttığı yüklemeyi ele almaktadır. Bu modelin türetilmesi aşağıdaki Eş. 4.6'daki kırılma yasasıyla başlar. Eş. 4.6'daki $\Delta\varepsilon$ plastik gerinimdeki artışı, ε_f mevcut şartlarda kırılmaya karşılık gelen gerinimi göstermektedir. Kırılma, $D \geq 1,0$ ve ε_f 'nin Eş. 4.7'de olduğu hallerde gerçekleşir.

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - D_5 T^*] \quad (4.7)$$

$D_1, D_2, D_3 =$ üçeksenli gerilme parametreleri

$D_4 =$ gerinim hızı parametresi

$D_5 =$ yüksek sıcaklık parametresi

$$\sigma^* = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}$$

Bu genel ifade $\sigma^* \leq 1,5$ ve σ^*, T^* 'ın sabit olduğu durumlar için geçerlidir.

JC hasar modelinin parametrelerinin bulunabilmesi için en az üç test yapılması gereklidir. Kırılma gerinimini belirleyebilmek için farklı çentik yarıçaplarında numuneler kullanılmalıdır. Yarı-statik ve izotermal koşullarda testler yapılarak D_1, D_2 ve D_3 değerleri tayin edildikten sonra test verileri üç eksenli gerilmenin bir fonksiyonu olarak kırılmaya karşı gerinim amacıyla kullanılır [89].

BÖLÜM 5

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma, geleneksel talaşlı imalat ve eklemeli imalat teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından birisi olan AlSi10Mg alaşımının malzeme yapısal parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışma dört temel aşamadan oluşmaktadır:

- Malzeme ve ekipmanın tedariki,
- Malzeme modeli için gerekli testler,
- Sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme,
- Test ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması.

5.1. DENEY MALZEMESİ

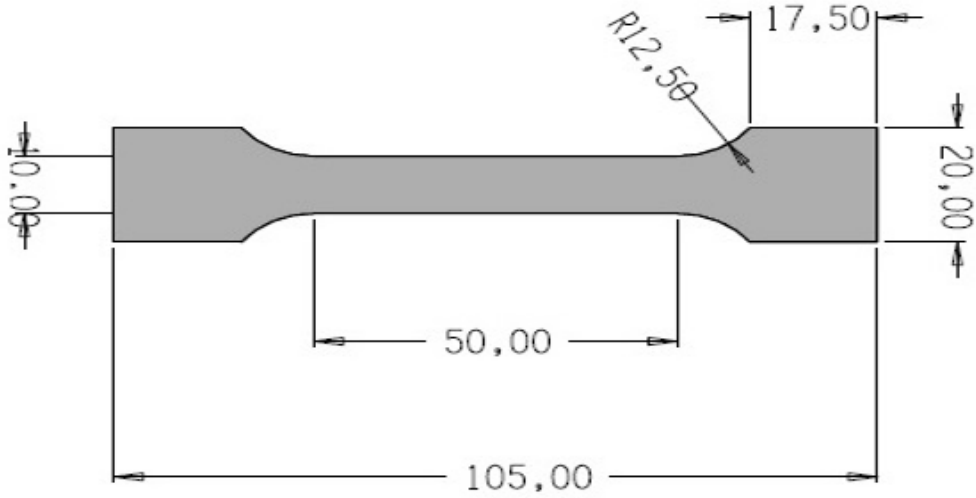
Bu çalışma kapsamında AlSi10Mg alaşım tozu kullanılarak bir lazer eklemeli imalat yöntemi olan SLM teknolojisiyle üretilmiş numuneler kullanılmıştır. Üretimde EOS firmasının “EOS art.-no. 9011-0024” kodlu AlSi10Mg toz karışımı kullanılmış olup karışımda yer alan elementler oranları ile birlikte Çizelge 5.1.’de gösterilmiştir. Numuneler General Electric firmasına ait Concept Laser MLab Cusing 200R model SLM cihazında üretilmiştir.

Çizelge 5.1. AlSi10Mg tozuna ait bileşim yüzdesi.

Si (9.0 - 11.0 wt-%)	Fe (0.55 wt-%)	Cu (0.05 wt-%)
Mn (0.45 wt-%)	Mg (0.2 - 0.45 wt-%)	Ni (0.05 wt-%)
Zn (0.10 wt-%)	Pb (0.05 wt-%)	Sn (0.05 wt-%)
Ti (0.15 wt-%)	Boşluk (0,15 wt-%)	Al (kalan)

5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Malzeme modelinin oluşturulabilmesi amacıyla yarı-statik çekme testi uygulanacak numuneler Şekil 5.1’de verilen ölçülerde ve 2mm kalınlıkta üretilmiş olup Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü bünyesindeki çekme test cihazlarına uygun olarak TS EN ISO 6892-1 ve TS 206 standartlarındadır.



Şekil 5.1. Deney numunelerine ait boyut parametreleri.

5.3. ÇEKME TESTİ

Çekme testi, malzemelerin yarı-statik gerinim hızlarında test edilmesi için yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Çekme testi basit bir test olmasına rağmen test edilen malzemenin mekanik özellikleri hakkında hayati bilgiler sağlar. Test numunesinin şekli, boyutları ve test prosedürü, ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu) standartları ile tanımlanır. Çekme testinde, numune çekme test makinesinin kavrama kısımlarına monte edilir ve sabit bir hızda uzatılır. Test sırasında uygulanan yük ve numunenin uzaması eşzamanlı olarak kaydedilir. Uzama ölçümleri ayrıca video veya mekanik ekstansometreler kullanılarak yapılabilir. Deney kuvveti karşısında uzama verileri elde edilir ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak malzemenin mühendislik gerilme-gerinim tepkisi hesaplanabilir:

$$\text{Mühendislik gerilmesi} = \sigma_{müh} = \frac{P}{A_0} \quad (5.1)$$

$$\text{Mühendislik gerinimi} = \varepsilon_{müh} = \frac{l_s - l_0}{l_0} \quad (5.2)$$

Eş. 3.9 ve 3.10'da P uygulanan yükü, A_0 başlangıç kesit alanı, l_s ölçülen son master uzunluğu, l_0 ölçülen ilk master uzunluğunu göstermektedir. Gerçek gerilme ve gerçek gerinim Eş. 3.11 ve 3.12 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\text{Gerçek gerilme} = \sigma_g = \frac{P}{A_a} \quad (5.3)$$

$$\text{Gerçek gerinim} = \varepsilon_g = \frac{l_s}{l_0} \quad (5.4)$$

Eş. 3.11'de, A_a anlık kesit alanını göstermektedir. Gerçek gerilme-gerinim, aşağıdaki gibi sabit hacimli bir proses olarak plastik deformasyonu dikkate alıp mühendislik gerilme-gerinim eğrisiyle ilişkilendirilebilir.

$$A_1 l_1 = A_2 l_2 = \text{sabit}$$

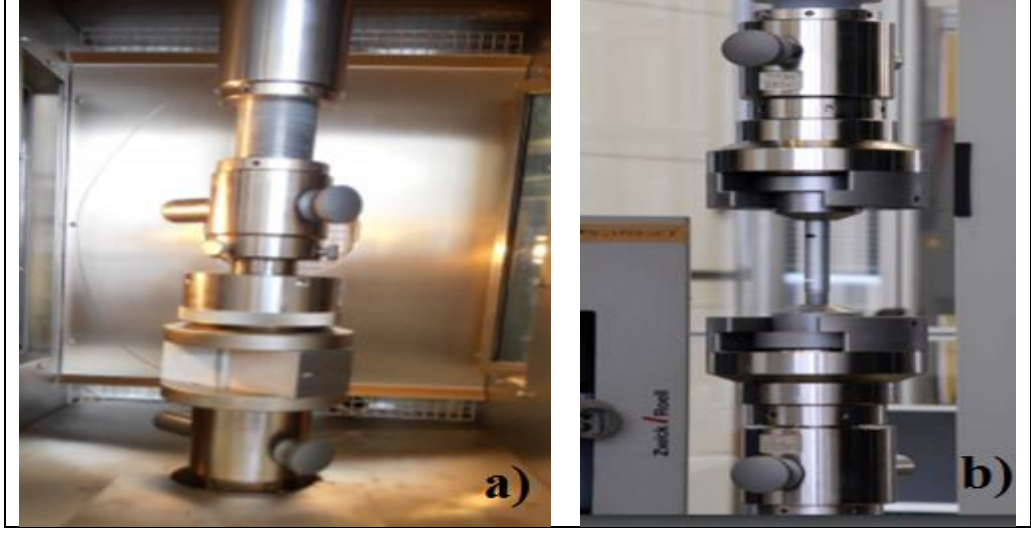
A_1 ve A_2 sırasıyla başlangıç ve son kesit alanını, l_1 ve l_2 de sırasıyla başlangıç ve son master uzunluğunu göstermektedir. Sabit hacim ilişkisini kullanarak gerçek gerilme ve gerinim ilişkileri Eş. 3.13 ve 3.14 kullanılarak türetilebilir.

$$\sigma_g = \sigma_{müh} (1 + \varepsilon_{müh}) \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_g = \ln (\varepsilon_{müh} + 1) \quad (5.6)$$

Bu çalışma kapsamında SLM üretim teknolojisi kullanılarak üretilmiş AlSi10Mg alaşımının Johnson-Cook malzeme modeline ait A , B , n ve C parametrelerini belirleyebilmek için öncelikle yarı-statik çekme testleri Karabük Üniversitesi Demir-Çelik Enstitüsünde bulunan Zwick/Roell Z600 Universal çekme-basma test cihazı

(Şekil 5.2) kullanılarak yapılmıştır. Testler yapılırken, TS EN ISO 6892-1 ve TS 206 standartlarına uygun olarak literatürde verilen sınır şartları dikkate alınmıştır.



Şekil 5.2. Çekme testleri için kullanılan cihaz; a) Basma, b) Çekme test cihazı.

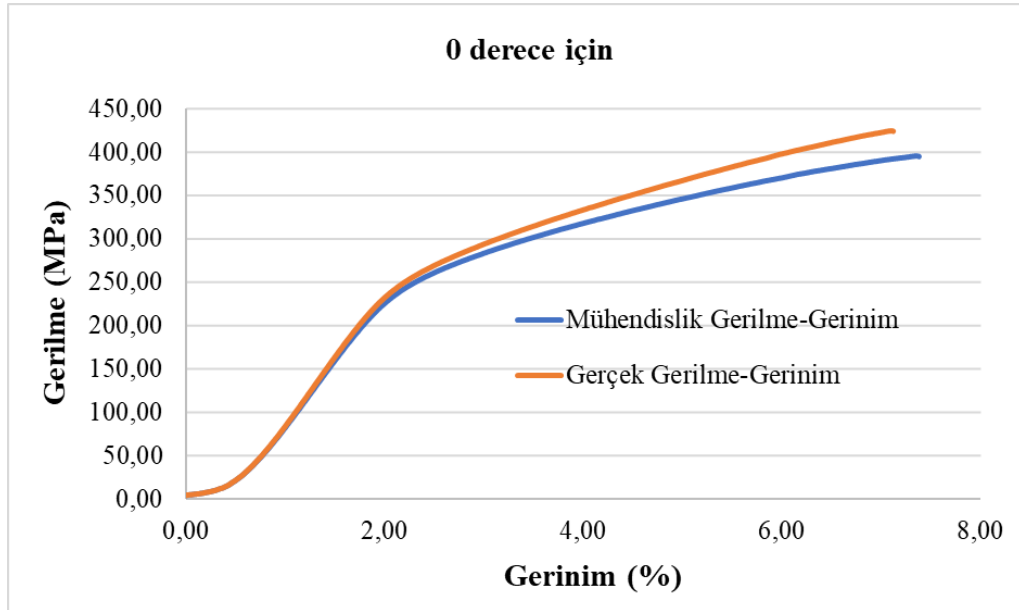
BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

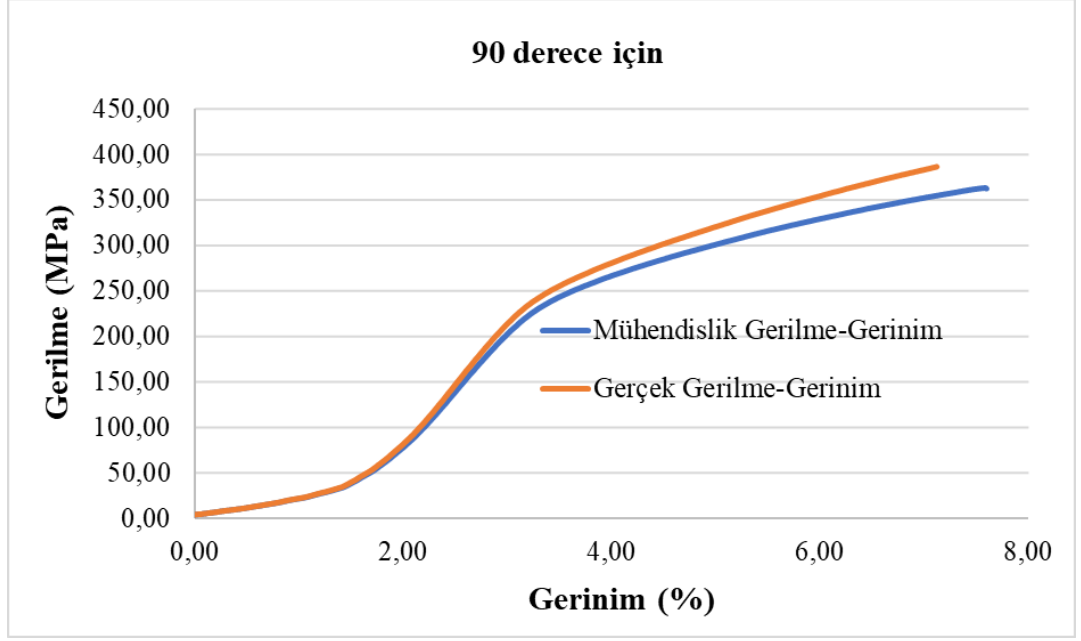
6.1. YARI-STATİK ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

6.1.1. “A, B ve n” parametrelerinin belirlenmesi

JC malzeme modelindeki *A* sembolü ile ifade edilen parametre, referans gerinim hızına karşılık gelen akma gerilmesini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, 0° ve 90° olmak üzere iki farklı üretim açısı ile üretilmiş farklı numuneler incelenmiştir. Numunelerle 10^{-3} s^{-1} referans gerinim hızında ve 24°C oda sıcaklığında gerçekleştirilen yarı-statik çekme testlerinde akma gerilmesi (*A*) değerleri, 0° numune için 250,6 MPa (Şekil 6.1) ve 90° numune için ise 258,8 MPa (Şekil 6.2) olarak ölçülmüştür. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'deki gerilme-gerinim grafikleri karşılaştırıldığında 90° ile üretilmiş numunelerin daha yüksek akma dayanımı gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.1. 0° numunelere oda sıcaklığı (24°C) ve referans gerinim hızında (10^{-3} s^{-1}) uygulanan çekme testine ait gerilme-gerinim grafiği.



Şekil 6.2. 90° numunelere oda sıcaklığı (24°C) ve referans gerinim hızında (10^{-3} s^{-1}) uygulanan çekme testine ait gerilme-gerinim grafiği.

Oda sıcaklığı ve referans gerinim hızında yapılan deneylerde akma gerilmesinin olduğu nokta sıfır gerinim olarak kabul edilerek farklı uzama miktarlarına karşılık gelen gerilme değerlerindeki artışa göre B ve n sabitleri belirlenmektedir. Bu varsayımına göre elde edilen veriler akma gerilmesi-maksimum gerilme değerleri arasındaki gerilme değerlerine karşılık gelmekte ve gerçek gerilme-gerinim eğrisi baz alınarak bulunmaktadır. Bu amaçla gerçek gerilme-gerinim eğrileri, çekme testi sonucu elde edilen mühendislik gerilme-gerinim eğrileri ve Eşitlik 5.1-5.6 kullanılarak bulunmuştur. 0° ve 90° üretim açıları için iki farklı eğri kullanıldığı için elde edilen eğriler de farklılık göstermektedir. 0° ve 90° için bulunan akma gerilmeleri birbiri ile farklılık göstermesine rağmen kendi içlerinde ayrı ayrı incelendiklerinde gerçek ve mühendislik gerilme-gerinim eğrilerinde aynı noktaya karşılık gelmektedirler. Yani 0° için bulunan her iki eğride de akma gerilmesinin değişmediği görülmektedir (Şekil 6.1). Bundan bağımsız olarak 90° için bulunan her iki eğride de akma gerilmesi aynı noktaya denk gelmektedir (Şekil 6.2).

0° için elde edilen gerçek gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde %3,3, %4,3, %5,3 ve %6,3 gerinim değerlerinde sırasıyla 295, 327, 354 ve 377 MPa gerilme değerleri

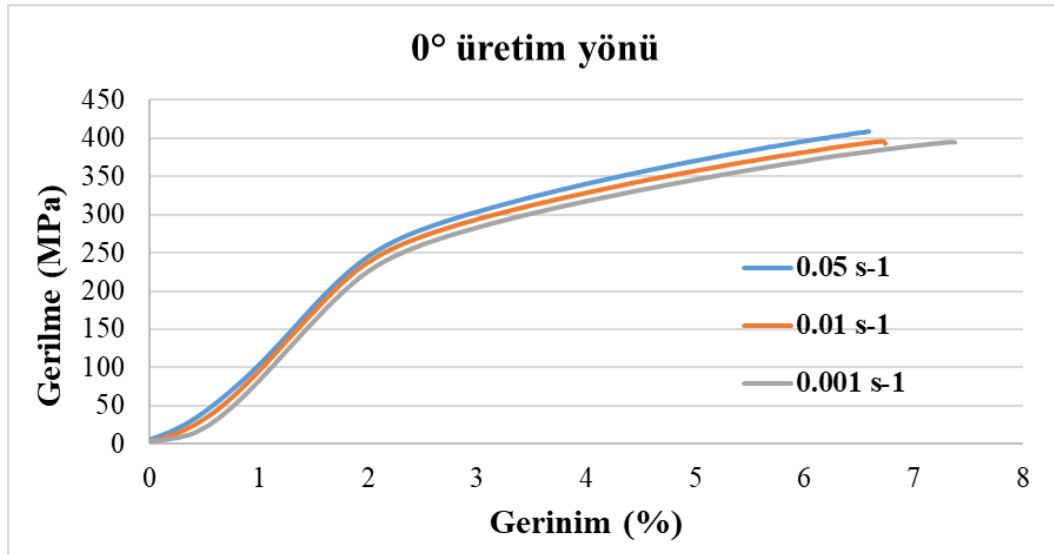
gözlenmiştir. Bu ortalama gerilme-gerinim değerleri ve Eş. 5.1 kullanılarak B ve n sabiti sırasıyla 1443 MPa ve 0,75 olarak hesaplanmıştır.

90° için elde edilen gerçek gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde %3,3, %4,3, %5,3 ve %6,3 gerinim değerlerinde sırasıyla 287, 310, 331 ve 348 MPa gerilme değerleri gözlenmiştir. Bu ortalama gerilme-gerinim değerleri ve Eş. 6.1 kullanılarak B ve n sabiti sırasıyla 1592 MPa ve 0,81 olarak hesaplanmıştır.

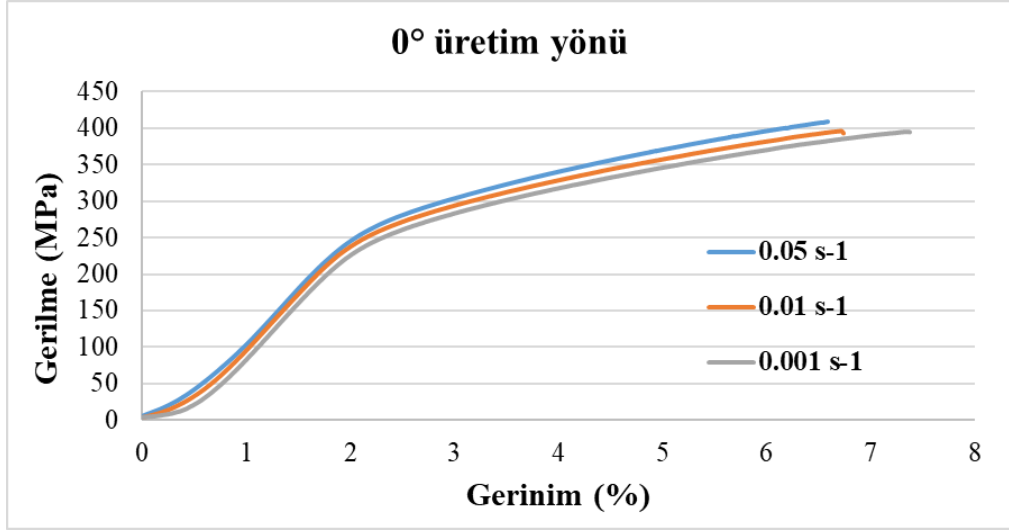
$$\sigma^0 = (A + B(\epsilon^p)^n) \quad (6.1)$$

6.1.2. “C” parametresinin belirlenmesi

JC malzeme modeline ait C parametresi gerinim hızı sabitini ifade etmektedir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen testlerde gerinim hızının artmasıyla birlikte akma gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de gerinim hızının artmasına bağlı olarak gerilme değerlerinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. “ C ” parametresi hesaplanırken, yalnızca akma noktaları dikkate alındığı için gerçek gerilme-gerinim eğrileri oluşturulmamıştır.



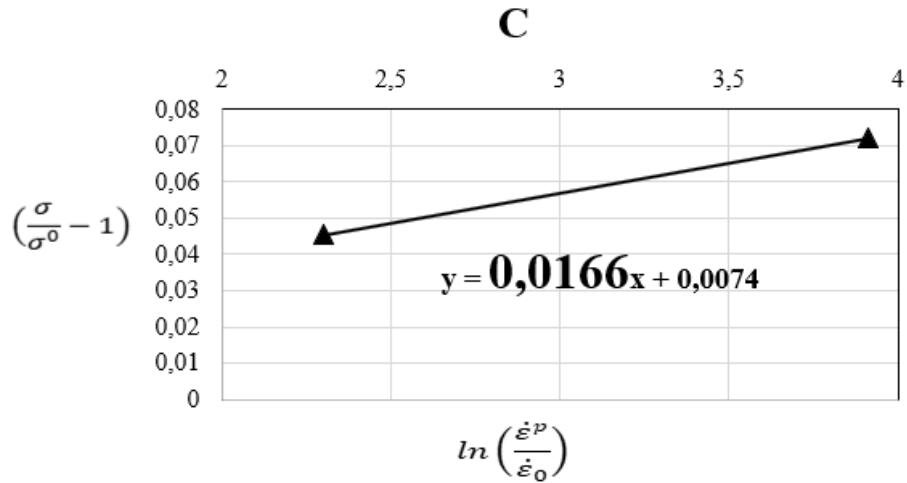
Şekil 6.3. Farklı gerinim hızlarına ait gerilme-gerinim grafiği (0° için).



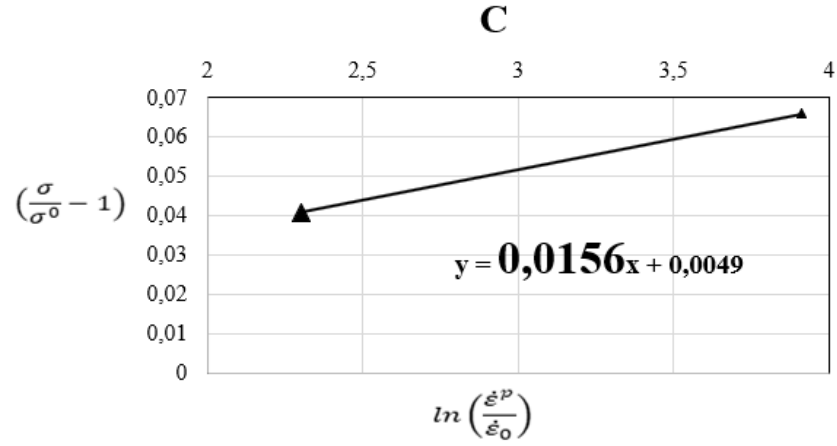
Şekil 6.4. Farklı gerinim hızlarına ait gerilme-gerinim grafiği (90° için).

0° için bakıldığında, Şekil 6.3'e göre 10^{-3} , 10^{-2} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızlarında 250, 259 ve 268 MPa akma gerilmesi değerlerinin oluştuğu görülmüştür. 90° için Şekil 6.4'e bakıldığında ise, 10^{-3} , 10^{-2} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızlarında 259, 267 ve 276 MPa akma gerilmesi değerleri ölçülmüştür. Eş 6.2. kullanılarak oluşturulmuş Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da bulunan grafikler sayesinde C sabiti; 0° için 0,0166 ve 90° için 0,0156 olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sigma^0 \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (6.2)$$



Şekil 6.5. "C" parametresini belirlemek için gerekli logaritmik ilişki (0° için).

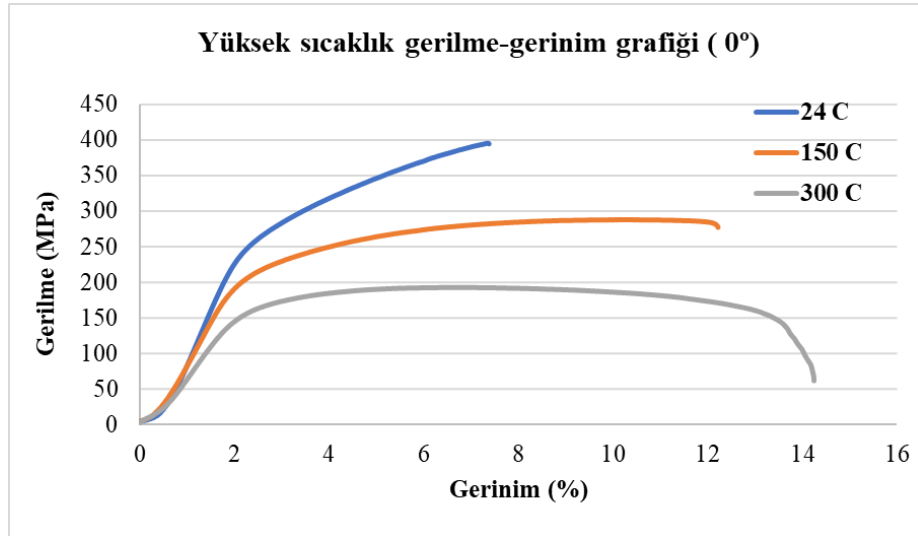


Şekil 6.6. "C" parametresini belirlemek için gerekli logaritmik ilişki (90° için).

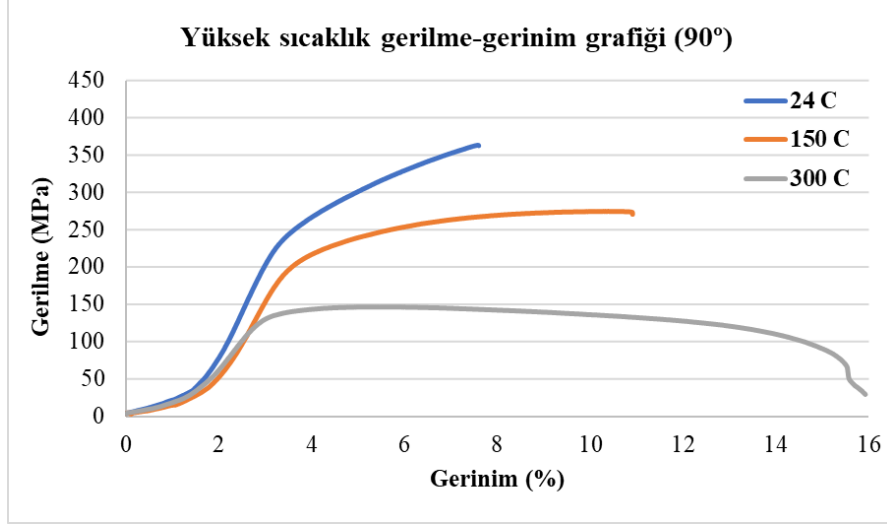
6.2. YÜKSEK SICAKLIK ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

6.2.1. "m" parametresinin belirlenmesi

JC malzeme modeline ait m parametresi sıcaklık sabitini ifade etmektedir. Bu parametrenin bulunması amacıyla çalışma kapsamında 10^{-3} s^{-1} referans gerinim hızında ve 24, 150 ve 300°C sıcaklıklarında gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 grafikleri oluşturulmuştur. "m" parametresinin belirlenmesinde, sadece akma noktaları dikkate alınmaktadır. Bu nedenle gerçek gerilme-gerinim eğrileri oluşturulmamıştır.

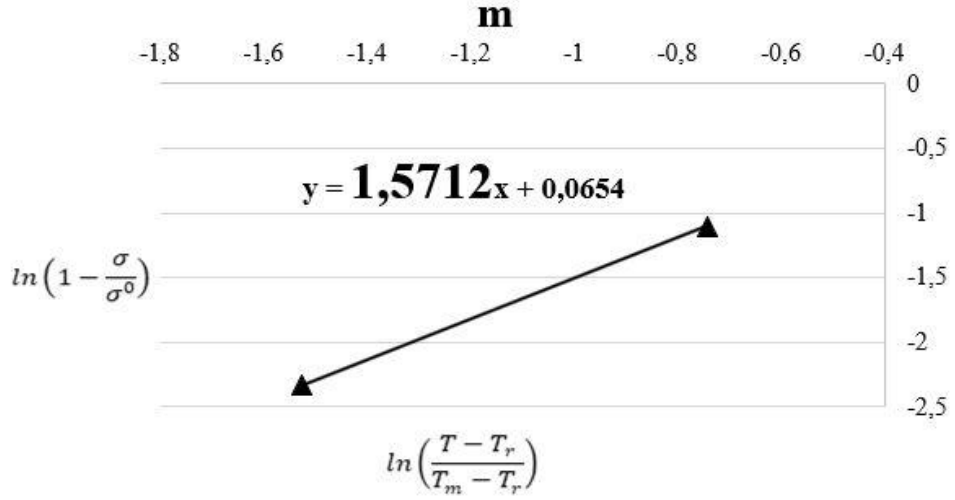


Şekil 6.7. 0° üretim yönü için farklı sıcaklıklara ait gerilme-gerinim grafiği.



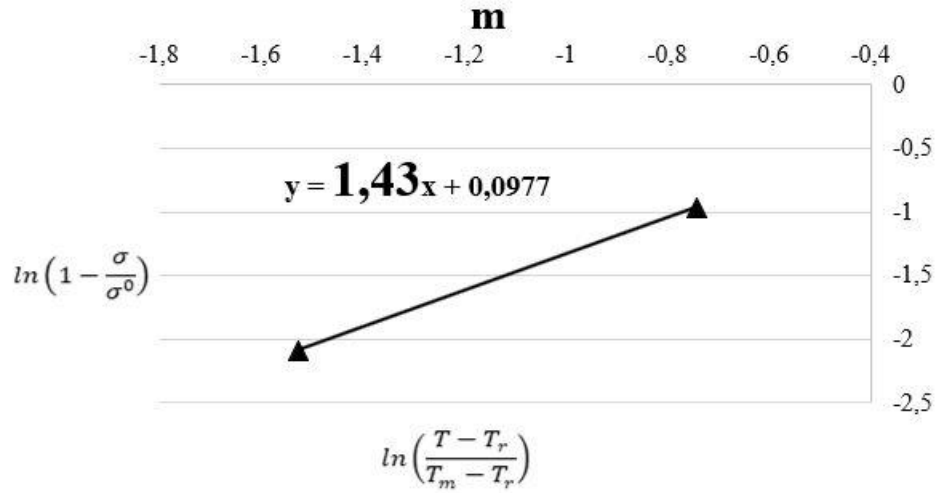
Şekil 6.8. 90° üretim yönü için farklı sıcaklıklara ait gerilme-gerinim grafiği.

0° için, Şekil 6.7'ye bakıldığında oda sıcaklığı (24°C), 150 ve 300 °C sıcaklıklarda, akma gerilmelerinin sırasıyla 251, 226 ve 167 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Eş. 6.3 kullanılarak oluşturulan Şekil 6.9'dan m sabiti 1,571 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.9. “ m ” parametresini belirlemek için logaritmik ilişki (0° için).

90° için, Şekil 6.8'e bakıldığında oda sıcaklığı (24°C), 150 ve 300 °C sıcaklıklarda, akma gerilmelerinin sırasıyla 259, 237 ve 145 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Eş. 6.3 kullanılarak oluşturulan Şekil 6.10'dan m sabiti 1,43 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.10. “m” parametresini belirlemek için logaritmik ilişki (90° için).

$$\sigma = \sigma^0 \left(1 - \left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r} \right)^m \right) \quad (6.3)$$

Gerçekleştirilen yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testlerinden elde edilen veriler ile 0° ve 90° için ayrı ayrı belirlenen AlSi10Mg alaşımına ait JC parametreleri Çizelge 6.1. ve Çizelge 6.2.’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. AlSi10Mg için JC çekme parametreleri (0°).

Malzeme	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)
AlSi10Mg	250,6	1443	0,749	0,0166	1,571	10 ⁻³

Çizelge 6.2. AlSi10Mg için JC çekme parametreleri (90°).

Malzeme	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)
AlSi10Mg	258,58	1592	0,81	0,0169	1,43	10 ⁻³

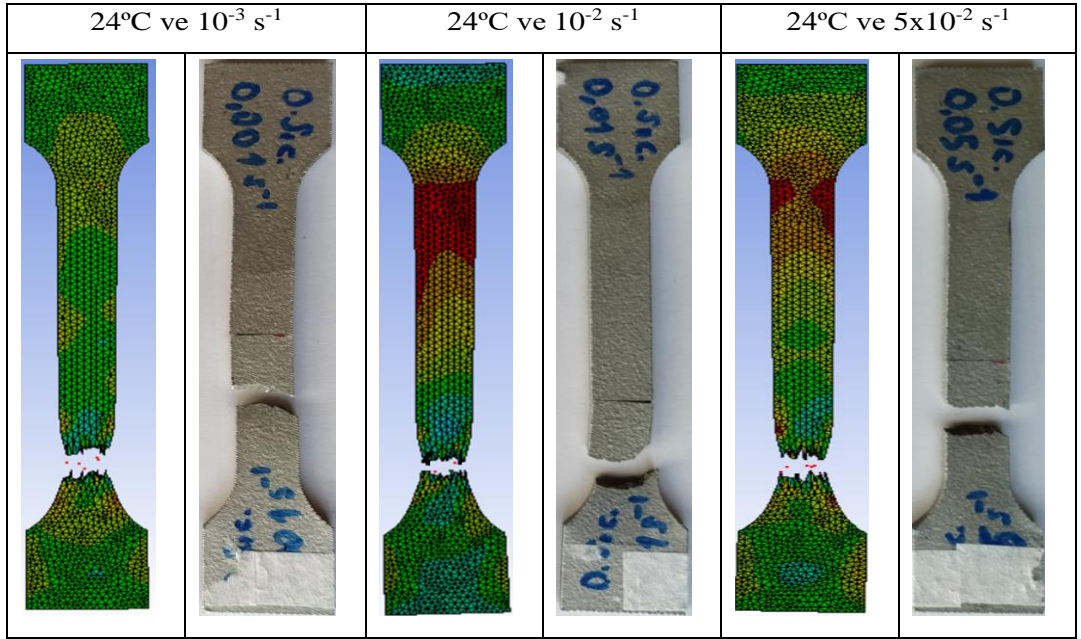
6.3. YARI-STATİK ÇEKME SİMÜLASYONU SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yarı-statik çekme testlerinden elde edilen verilerle oluşturulmuş J-C parametreleri, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Ansys programında belirlenen geometrik parametrelere uygun olarak tanımlanmıştır. Tanımlanmış olan bu parça üzerinde 10⁻³

s^{-1} , $10^{-2} s^{-1}$ ve $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızlarında ve $24^{\circ}C$ 'de yarı-statik çekme testi simülasyonları 0 ve 90 derece üretim açıları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucu elde edilen maksimum akma değerleri ve bunlara ait görseller 0 ve 90 derece için iki ayrı başlık altında ele alınmıştır.

6.3.1. 0 Derece İçin Yarı-Statik Çekme Simülasyonu Sonuçları

0 derece üretim açılı simülasyon numunesine uygulanan yarı-statik çekme testi simülasyonu sonucunda bu parçanın akma dayanımı $10^{-3} s^{-1}$, $10^{-2} s^{-1}$ ve $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızları için sırasıyla 268, 273 ve 292 MPa olarak bulunmuştur. Deney ve simülasyon sonucunda numunelerde oluşan kırılmalar Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11. 0 derece için farklı gerinimlerde gerçekleşen deney ve simülasyon kırılmaları.

Bunun yanı sıra yarı-statik çekme testi simülasyonu sonucunda elde edilen akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değerleri de Çizelge 6.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Yarı-statik çekme testi simülasyon sonuçları (0 derece).

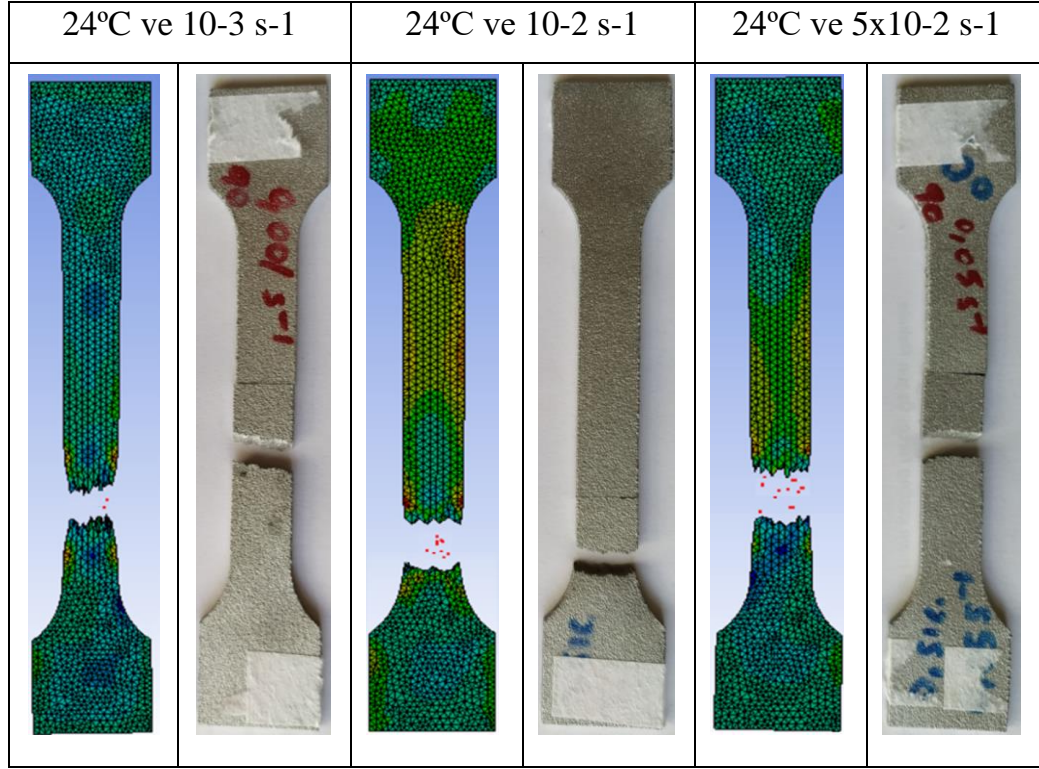
GERİNİM HIZI	AKMA GERİLMESİ	MAKSİMUM GERİLME	% UZAMA
10^{-3} s^{-1}	268 MPa	423 MPa	% 7,93
10^{-2} s^{-1}	273 MPa	414 MPa	% 7,09
$5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$	292 MPa	445 MPa	% 7,18

Çizelge 6.3.'te belirtilen veriler göz önüne alındığında AlSi10Mg alaşımının akma gerilmesi değerlerinin artan gerinim hızına bağlı olarak arttığı ancak maksimum gerilme değerlerinin ise 10^{-2} s^{-1} gerinim hızında düştüğü ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ hızında ise yeniden arttığı gözlemlenmiştir.

6.3.2. 90 Derece İçin Yarı-Statik Çekme Simülasyonu Sonuçları

90 derece üretim açılı simülasyon numunesine uygulanan yarı-statik çekme testi simülasyonu sonucunda bu parçanın akma dayanımı 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızları için sırasıyla 273, 288 ve 301 MPa olarak bulunmuştur. Deney ve simülasyon sonucunda numunelerde oluşan kırılmalar Şekil 6.12'de gösterilmiştir.

Bunun yanı sıra yarı-statik çekme testi simülasyonu sonucunda elde edilen akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değerleri de Çizelge 6.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.12. 90 derece için farklı gerinimlerde gerçekleşen deney ve simülasyon kırılmaları.

Çizelge 6.4. Yarı-statik çekme testi simülasyon sonuçları (90 derece).

GERİNİM HIZI	AKMA GERİLMESİ	MAKSİMUM GERİLME	% UZAMA
10^{-3} s^{-1}	301 MPa	413 MPa	% 7,18
10^{-2} s^{-1}	288 MPa	388 MPa	% 7,42
10^{-1} s^{-1}	273 MPa	383 MPa	% 8,2

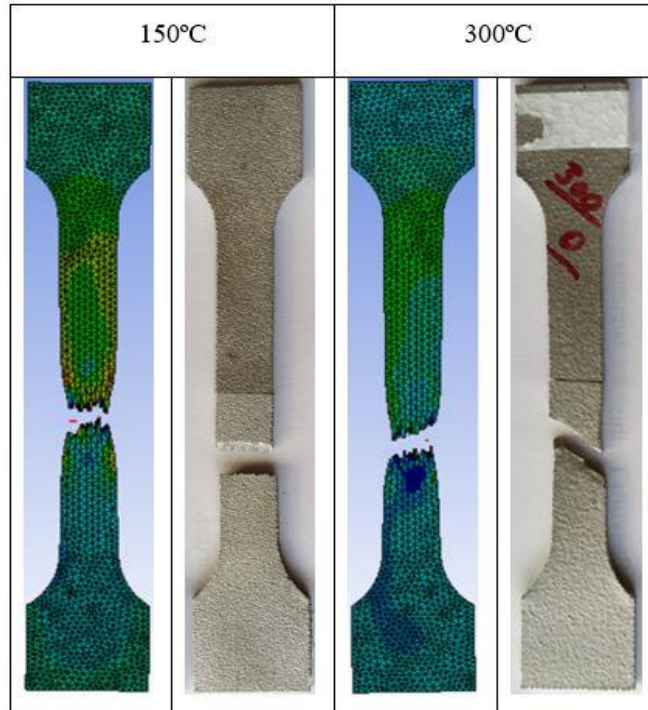
Çizelge 6.4.'te belirtilen veriler göz önüne alındığında AlSi10Mg alaşımının akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerlerinin artan gerinim hızına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum beklendiği bir durum olup literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermektedir [90–92].

6.4. YÜKSEK SICAKLIK ÇEKME SİMÜLASYONU SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

AlSi10Mg alaşımı için bulunan J-C parametreleri ve belirlenen geometriye uygun olarak 150°C ve 300°C sıcaklıklarda $10^{-3}s^{-1}$ gerinim hızı ile çekme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar 0 ve 90 derece üretim yönlü numuneler için ayrı ayrı yapılmış olup elde edilen sonuçlar da farklı başlıklar altında ele alınmıştır.

6.4.1. 0 Derece İçin Yüksek Sıcaklık Çekme Simülasyonu Sonuçlarının Değerlendirilmesi

0 derece üretim açısıyla üretilmiş AlSi10Mg alaşımının 150°C ve 300°C sıcaklık ve referans gerinim hızında ($10^{-3}s^{-1}$) gerçekleştirilen deneyler ve simülasyonlar sonucunda oluşan kırılmalar Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13. 0 derece için yüksek sıcaklık çekme testi ve simülasyon kırılmaları.

0 derece için yapılan simülasyonlar sonucunda 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla 213 MPa ve 154 MPa akma gerilmesi olduğu gözlemlenmiştir. Akma

gerilmesine ek olarak maksimum gerilme ve uzama değerleri de izelge 6.5.'te gösterilmiştir.

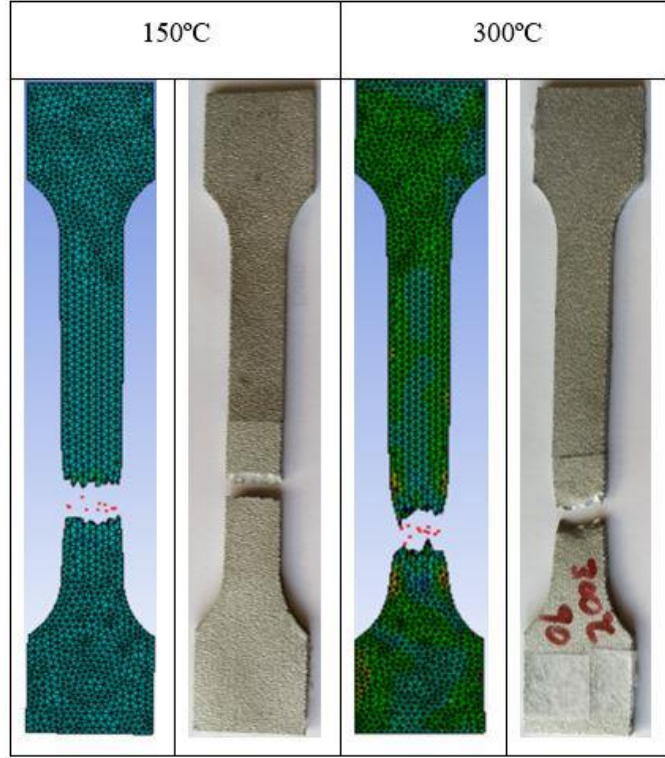
Çizelge 6.5. Yüksek sıcaklık çekme testi simülasyon sonuçları (0 derece).

SICAKLIK DEğERİ	AKMA GERİLMESİ	MAKSİMUM GERİLME	% UZAMA
24 C	268 MPa	423 MPa	% 7,93
150 C	213 MPa	271 MPa	% 12,96
300 C	154 MPa	178 MPa	% 14,01

0 derece üretim açılı AlSi10Mg numunelere uygulanan yüksek sıcaklık çekme testi sonuçları incelendiğinde artan sıcaklığa bağlı olarak akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerleri azalış göstermiştir. Buna karşılık %uzama miktarlarının ise artan sıcaklık ile birlikte arttığı gözlenmiştir. Artan sıcaklık değerine bağlı olarak gerilme değerlerinin azalırken uzama miktarlarında artış gözlenmesi literatürdeki bilgiler ile uyulmaktadır [93,94]. Bu durum gerilme-gerinim eğrisinin yatay yönde gelişmesine neden olmaktadır.

6.4.2. 90 Derece İçin Yüksek Sıcaklık ekme Simülasyonu Sonuçlarının Değerlendirilmesi

90 derece üretim açısıyla üretilmiş AlSi10Mg alaşımın 150C ve 300C sıcaklık ve referans gerinim hızında ($10^{-3}s^{-1}$) gerçekleştirilen deneyler ve simülasyonlar sonucunda oluşan kırılmalar Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14. 90 derece için yüksek sıcaklık çekme testi ve simülasyon kırılmaları.

90 derece için yapılan simülasyonlar sonucunda 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla 216 MPa ve 131 MPa akma gerilmesi olduğu gözlemlenmiştir. Akma gerilmesine ek olarak maksimum gerilme ve uzama değerleri de Çizelge 6.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6. Yüksek sıcaklık çekme testi simülasyon sonuçları (90 derece).

SICAKLIK DEĞERİ	AKMA GERİLMESİ	MAKSİMUM GERİLME	% UZAMA
24 °C	273 MPa	383 MPa	% 8,20
150 °C	216 MPa	246 MPa	% 11,67
300 °C	131 MPa	162 MPa	% 14,41

90 derece üretim açılı AlSi10Mg numunelere uygulanan yüksek sıcaklık çekme testi sonuçları incelendiğinde 0 derece üretim açılı numuneye ait sonuçlar ile benzer şekilde; artan sıcaklığa bağlı olarak akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerleri

azalış göstermiştir. Yine aynı şekilde %uzama miktarlarının ise artan sıcaklık ile birlikte arttığı gözlenmiştir.

6.5. TEST VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

6.5.1. Yarı-statik Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

6.5.1.1. 0 Derece İçin Yarı-statik Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

0 derece üretim açılı AlSi10Mg alaşımına ait yarı-statik çekme testi ve Ansy simülasyonuna ait gerilme ve uzama değerleri % sapma oranları ile birlikte çizelge 6.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.7. 0 derece için yarı-statik çekme testi ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

0 DERECE		DENEY SONUÇLARI	SİMÜLASYON SONUÇLARI	% SAPMA
$(10^{-3} s^{-1})$	Akma	251 MPa	268 MPa	6,77
	Max. Gerilme	395 MPa	423 MPa	7,09
	% Uzama	% 7,37	% 7,93	7,59
$(10^{-2} s^{-1})$	Akma	259 MPa	273 MPa	5,41
	Max. Gerilme	394 MPa	414 MPa	5,07
	% Uzama	% 6,73	% 7,09	5,35
$(5 \times 10^{-2} s^{-1})$	Akma	269 MPa	292 MPa	8,55
	Max. Gerilme	409 MPa	445 MPa	8,80
	% Uzama	% 6,58	% 7,18	9,11
ORTALAMA SAPMA			Akma Gerilmesi	6,91
			Max. Gerilme	6,98
			% Uzama	7,35

Çizelge 6.7. incelendiğinde 0 derece açılı numune için; yarı-statik çekme testi sonuçlarına ait akma gerilmesi değerlerinin 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızlarında sırasıyla 251 MPa, 259 MPa ve 269 MPa olduğu, simülasyon sonuçlarında ise sırasıyla % 6,77, % 5,41 ve % 8,55 artış göstererek 268 MPa, 273 MPa ve 292 MPa olduğu belirlenmiştir. Maksimum gerilme değerleri, testler sonucunda 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızlarında sırasıyla 395 MPa, 394 MPa ve 409 MPa olarak ölçülürken, simülasyonlar sonucunda sırasıyla % 7,09, % 5,07 ve % 8,8 artış göstererek 423 MPa, 414 MPa ve 445 MPa değerlerini almıştır. % uzama miktarları ise test sonuçlarına göre 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızlarında sırasıyla % 7,37, % 6,73 ve % 6,58 olurken simülasyon sonuçlarında bu değerler sırasıyla % 7,59, % 5,35 ve % 9,11 artış göstererek % 7,93, % 7,09 ve % 7,18 değerlerini almıştır.

Çizelge 6.7.'de belirtilmiş olan değerler göz önüne alındığında 0 derece AlSi10Mg alaşımına uygulanan yarı-statik çekme testleri ve simülasyon sonuçları kıyaslandığında akma gerilmesi için % 6,91, maksimum gerilme için % 6,98 ve uzama değeri için % 7,35 sapma olduğu belirlenmiştir.

Johnson-Cook hasar modeli kullanılarak geliştirilen Ansys simülasyon modelinin uygunluğunun tespiti amacıyla hasar kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Testler ve simülasyonlardan elde edilen değerler arasındaki sapma miktarının düşük olması modelin uygunluğu ve kullanılabilirliği açısından öneme sahiptir. Bu sapma miktarı hata kareler ortalaması (*mean squared error, MSE*) olarak bilinmektedir. JC parametreleri kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modelinden elde edilen değerlerin gerçek deney sonuçlarına uygulanması aşamasında; hata kareler ortalaması karekökü (*root-mean-squared, RMSE*), belirlilik katsayısı (R^2) ve ortalama mutlak yüzde hata (*mean absolute percentage error, MAPE*) kriter olarak alınmıştır. Bunun yanı sıra sonlu elemanlar analiz sonucu belirlenen tüm değerlerin yüzde hata (*% Hata*) değerleri bulunur:

$$MSE = \frac{1}{p} \sum_i e_i^2 = \frac{1}{p} \sum_i (t_i - o_i)^2 \quad (6.4)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_i e_i^2} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_i (t_i - o_i)^2} \quad (6.5)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_i (t_i - o_i)^2}{\sum_i o_i^2} \right) \quad (6.6)$$

$$\%Hata = \frac{|t_i - o_i|}{t_i} \times 100 \quad (6.7)$$

$$MAPE = \frac{1}{p} \sum_i \frac{|t_i - o_i|}{t_i} \times 100 \quad (6.8)$$

Eş. 6.4 – Eş. 6.8’de verilmiş olan eşitliklerde; p örnek deney sayısını, t_i deney sonucu elde edilen çıktı değişkeni değerini, o_i sonlu elemanlar analizi kullanılarak bulunan çıktı katmanı değerini ve e_i ise hata değerini göstermektedir. %hata değeri bütün örnekler için hesaplanarak bunlar içindeki en yüksek olan değer maksimum yüzde hatayı vermektedir. Yüzde hatalar toplamının örnek sayısına bölünmesiyle ortalama mutlak yüzde hata ($MAPE$) değerleri bulunmuştur. Eş. 6.5’deki RMS’nin 0’a olan yakınlığı geliştirilen modelin başarı oranını belirten bir kriter olarak kullanılmıştır. Eş. 6.6’daki R^2 , gerçek deney sonuçları ve sonlu elemanlar modelinin sonuçları arasındaki uyumu gösteren bir katsayıdır. R^2 değerinin 1’e yakınlığı modelin başarı oranı yükselmektedir. Eş. 6.8’deki en küçük MAPE değeri modelin uygulanabilirlik başarısını göstermektedir.

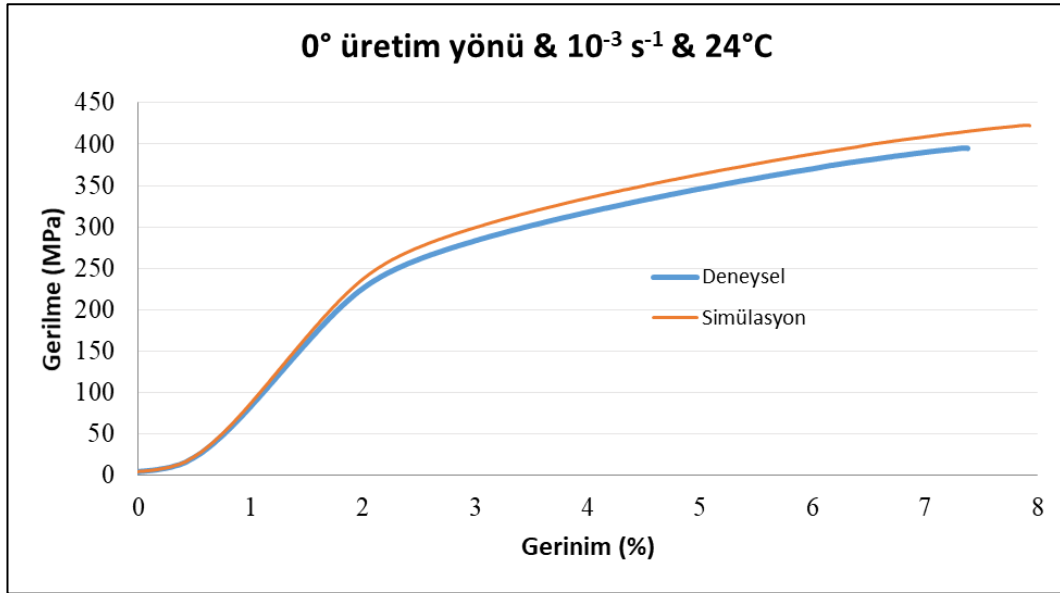
Çizelge 6.8.’de, akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değeri için geliştirilen model kullanılarak hesaplanan gerilme ve uzama değerlerinin, gerçek sonuçlara uygunluğunda kullanılan hata kareler ortalaması karekökü ($RMSE$), belirlilik katsayıları (R^2), ve ortalama mutlak yüzde hata ($\pm \% MAPE$) değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.8. 0 derece numunenin yarı-statik etkiler sonucundaki gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu

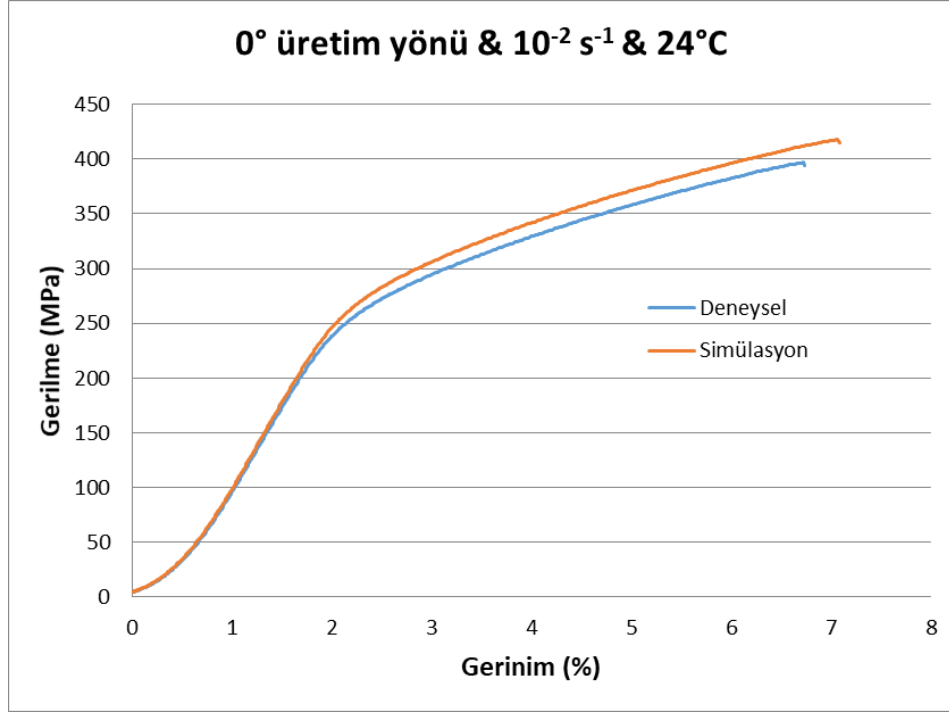
	RMSE	R²	MAPE
Akma Gerilmesi	1,46622	0,995622	6,4494
Max. Gerilme	1,485416	0,995618	6,619385
% Uzama	1,300971	0,997422	5,077574

Çizelge 6.8. incelendiğinde, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), akma gerilmesi için %6,45 bulunurken, maksimum gerilme için % 6,62 ve uzama değeri için % 5,07 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.8.'de elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, özellikle R^2 değerinin %99 olarak hesaplanması, sonlu elemanlar modelinin kullanılabilirliğini ve uygunluğunu göstermiştir.

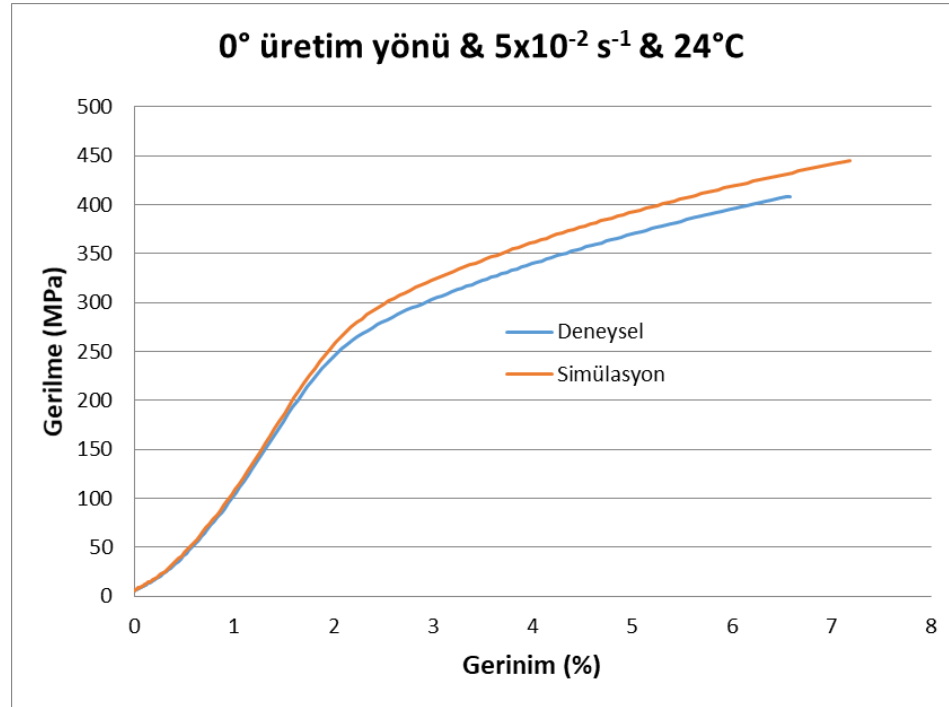
Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de AlSi10Mg alaşımının 0 derece için sırasıyla $10^{-3} s^{-1}$, $10^{-2} s^{-1}$ ve $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızlarında, test sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim grafikleri ile sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen gerilme-gerinim grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 6.15. 0 derece için $10^{-3} s^{-1}$ gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları

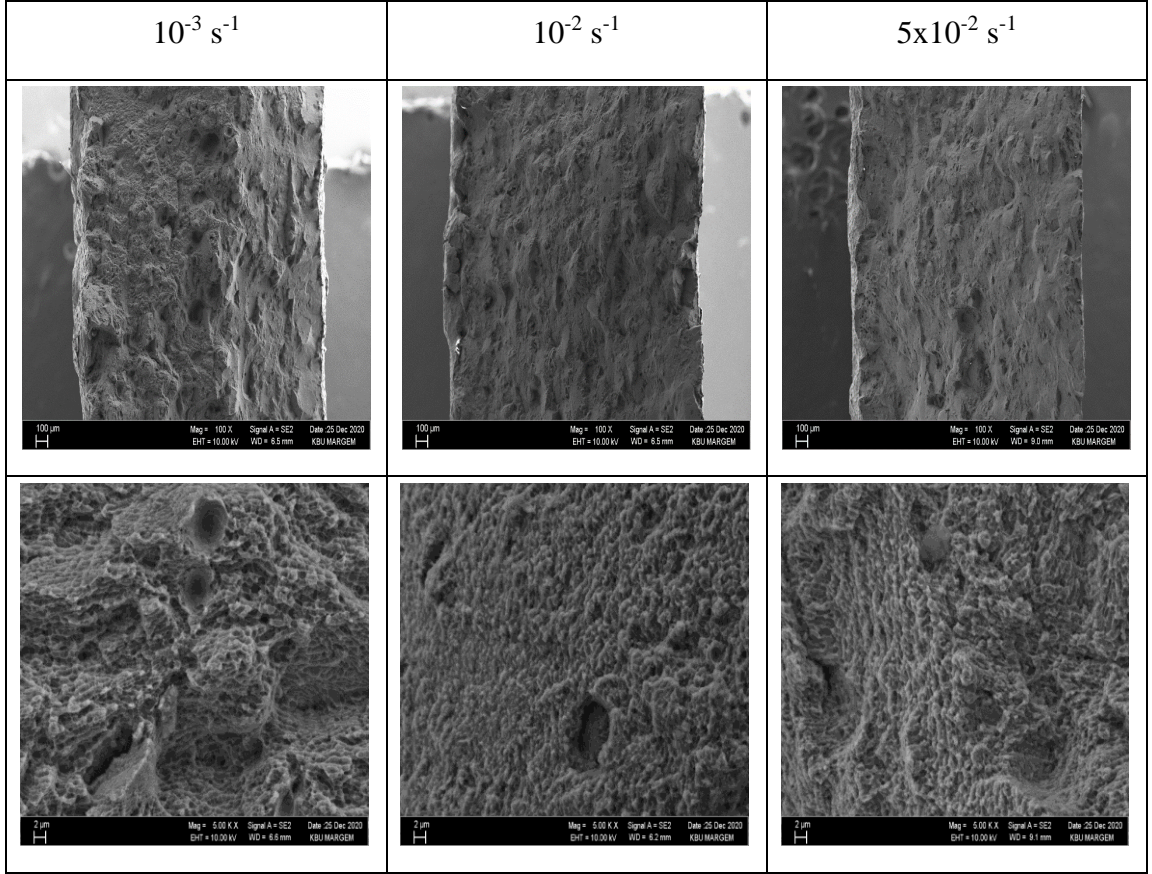


Şekil 6.16. 0 derece için 10^{-2} s^{-1} gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları



Şekil 6.17. 0 derece için $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları

0 derece üretim yönlü numuneye uygulanan yarı-statik çekme testleri ve simülasyonlardan elde edilen verilerle oluşturulan Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 grafikleri incelendiğinde verilerin birbirleri ile benzer olduğu görülmektedir. Numune, 10^{-3} s^{-1} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ hızlarında sünek davranış gösterirken $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ise gevrek davranış sergileyerek kırılmıştır. Bunun yanı sıra kırık yüzeylerdeki mikro yapılar üzerinde SEM analizleri yapılmış ve SEM görüntülerinin de bu verileri doğrular nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.18’de 0 derece üretim yönlü numunenin farklı gerinim hızlarındaki kopma yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.18. 0 derece yarı-statik çekme testi SEM görüntüleri.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, 0 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımı için tespit edilen Johnson-Cook parametrelerinin doğruluğu ispatlanmıştır. Gelecekte bu malzeme ile ilgili plastik deformasyon analizlerinin bu çalışma kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak yapılabileceği anlaşılmıştır.

6.5.1.2. 90 Derece İçin Yarı-statik Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

90 derece üretim açılı AlSi10Mg alaşımına ait yarı-statik çekme testi ve Ansy simülasyonuna ait gerilme ve uzama değerleri % sapma oranları ile birlikte çizelge 6.9.'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.9. 90 derece için yarı-statik çekme testi ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

90 DERECE		DENEY SONUÇLARI	SİMÜLASYON SONUÇLARI	% SAPMA
(10-3 s-1)	Akma Gerilmesi	259 MPa	273 MPa	5,40
	Max. Gerilme	362 MPa	383 MPa	5,80
	% Uzama	% 7,59	% 8,2	8,03
(10-2 s-1)	Akma Gerilmesi	267 MPa	288 MPa	7,86
	Max. Gerilme	359 MPa	388 MPa	8,07
	% Uzama	% 6,82	% 7,42	8,79
(5x10-2 s-1)	Akma Gerilmesi	275 MPa	301 MPa	9,45
	Max. Gerilme	378 MPa	413 MPa	9,26
	% Uzama	% 6,58	% 7,18	9,11
ORTALAMA SAPMA			Akma Gerilmesi	7,57
			Max. Gerilme	7,71
			% Uzama	8,64

Çizelge 6.9. incelendiğinde 90 derece açılı numune için; yarı-statik çekme testi sonuçlarına ait akma gerilmesi değerlerinin $10^{-3} s^{-1}$, $10^{-2} s^{-1}$ ve $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızlarında sırasıyla 259 MPa, 267 MPa ve 275 MPa olduğu, simülasyon sonuçlarında ise sırasıyla % 5,4, %7,86 ve % 9,45 artış göstererek 273 MPa, 288 MPa ve 301 MPa olduğu belirlenmiştir. Maksimum gerilme değerleri, testler sonucunda $10^{-3} s^{-1}$, $10^{-2} s^{-1}$ ve $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızlarında sırasıyla 362 MPa, 359 MPa ve 378 MPa olarak ölçülürken, simülasyonlar sonucunda sırasıyla % 5,8, %8,07 ve % 9,26 artış göstererek 383 MPa, 388 MPa ve 413 MPa değerlerini almıştır. % uzama miktarları ise test sonuçlarına göre $10^{-3} s^{-1}$, $10^{-2} s^{-1}$ ve $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızlarında sırasıyla % 7,59, %

6,82 ve % 6,58 olurken simülasyon sonuçlarında bu değerler sırasıyla % 8,03, % 8,79 ve % 9,11 artış göstererek % 8,2, % 7,42 ve % 7,18 değerlerini almıştır.

Çizelge 6.9.'da belirtilmiş olan değerler göz önüne alındığında 90 derece AlSi10Mg alaşımına uygulanan yarı-statik çekme testleri ve simülasyon sonuçları kıyaslandığında akma gerilmesi için % 7,57, maksimum gerilme için % 7,71 ve uzama değeri için % 8,64 sapma olduğu belirlenmiştir.

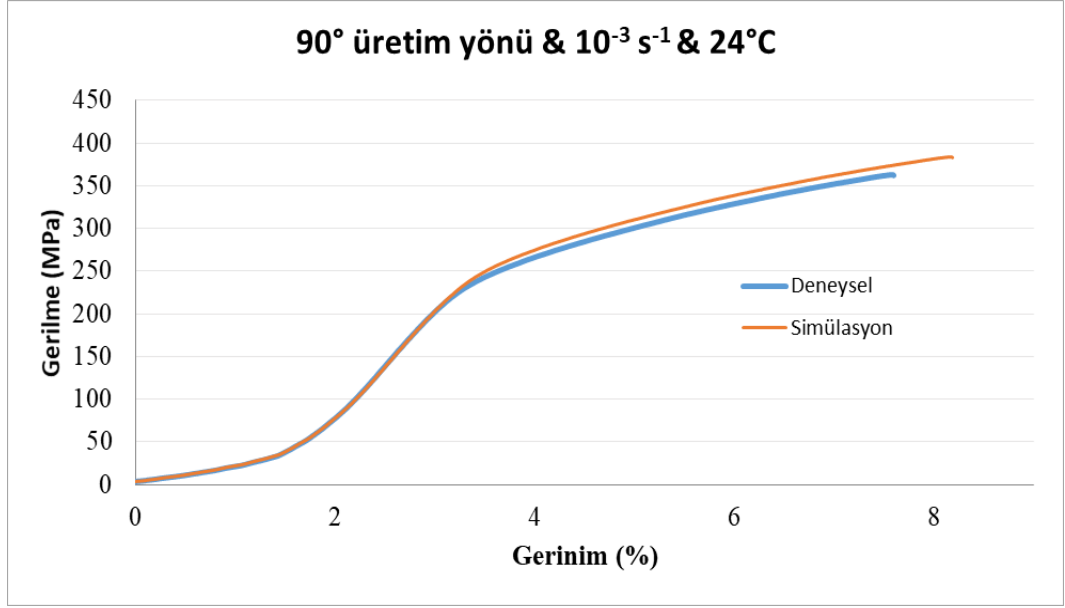
Çizelge 6.10.'da, akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değeri için geliştirilen model kullanılarak hesaplanan gerilme ve uzama değerlerinin, gerçek sonuçlara uygunluğunda kullanılan hata kareler ortalaması karekökü (*RMSE*), belirlilik katsayıları (R^2), ve ortalama mutlak yüzde hata (\pm % *MAPE*) değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.10. 90 derece numunenin yarı-statik etkiler sonucundaki gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.

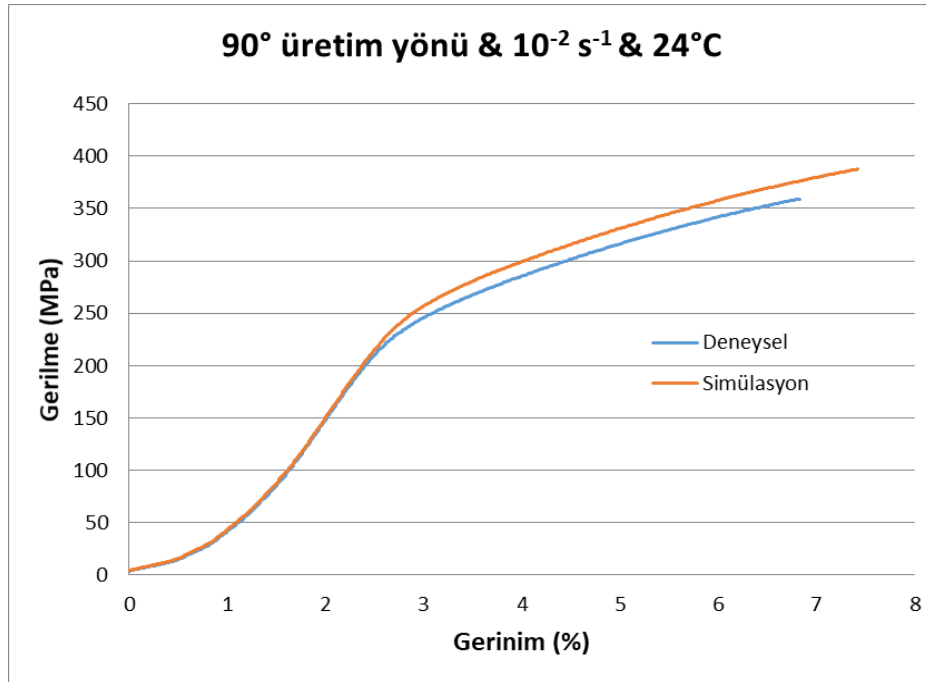
	RMSE	R²	MAPE
Akma Gerilmesi	1,529624	0,994707	7,019249
Max. Gerilme	1,351916	0,996994	5,483029
% Uzama	1,641773	0,993461	8,086253

Çizelge 6.10. incelendiğinde, ortalama mutlak yüzde hata (*MAPE*), akma gerilmesi için %7,02 bulunurken, maksimum gerilme için %5,48 ve uzama değeri için %8,09 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.10.'da elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, özellikle R^2 değerinin %99 olarak hesaplanması, sonlu elemanlar modelinin kullanılabilirliğini ve uygunluğunu göstermiştir.

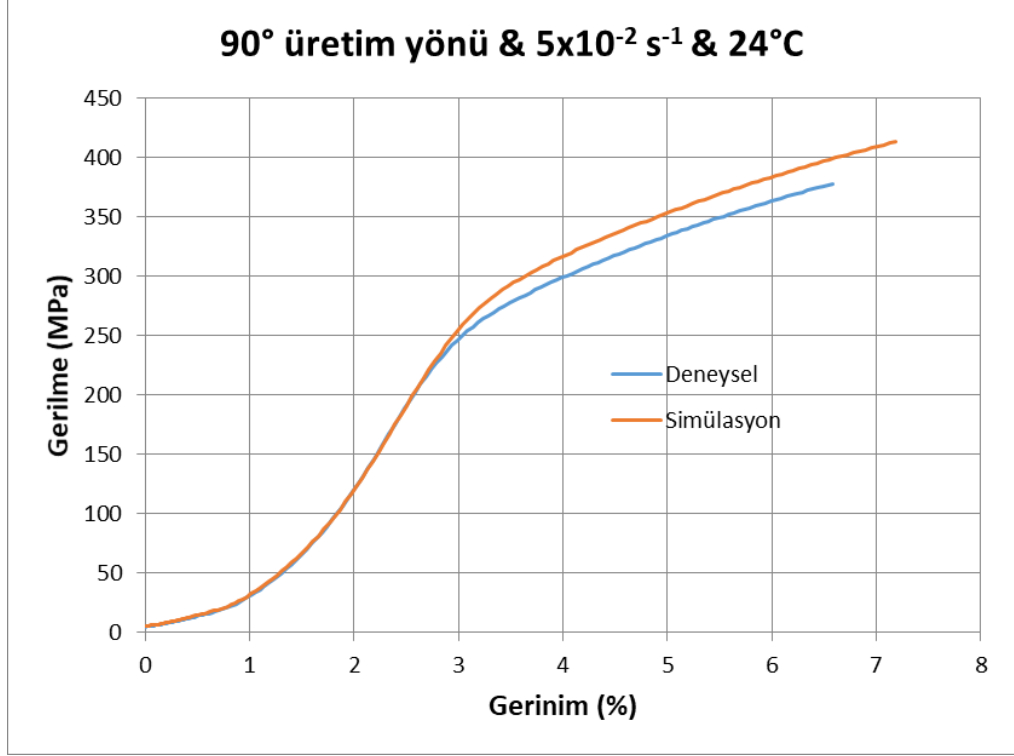
Şekil 6.19, Şekil 6.20 ve Şekil 6.21'de AlSi10Mg alaşımının 90 derece için sırasıyla $10^{-3} s^{-1}$, $10^{-2} s^{-1}$ ve $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ gerinim hızlarında, test sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim grafikleri ile sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen gerilme-gerinim grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 6.19. 90 derece için 10^{-3} s^{-1} gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.

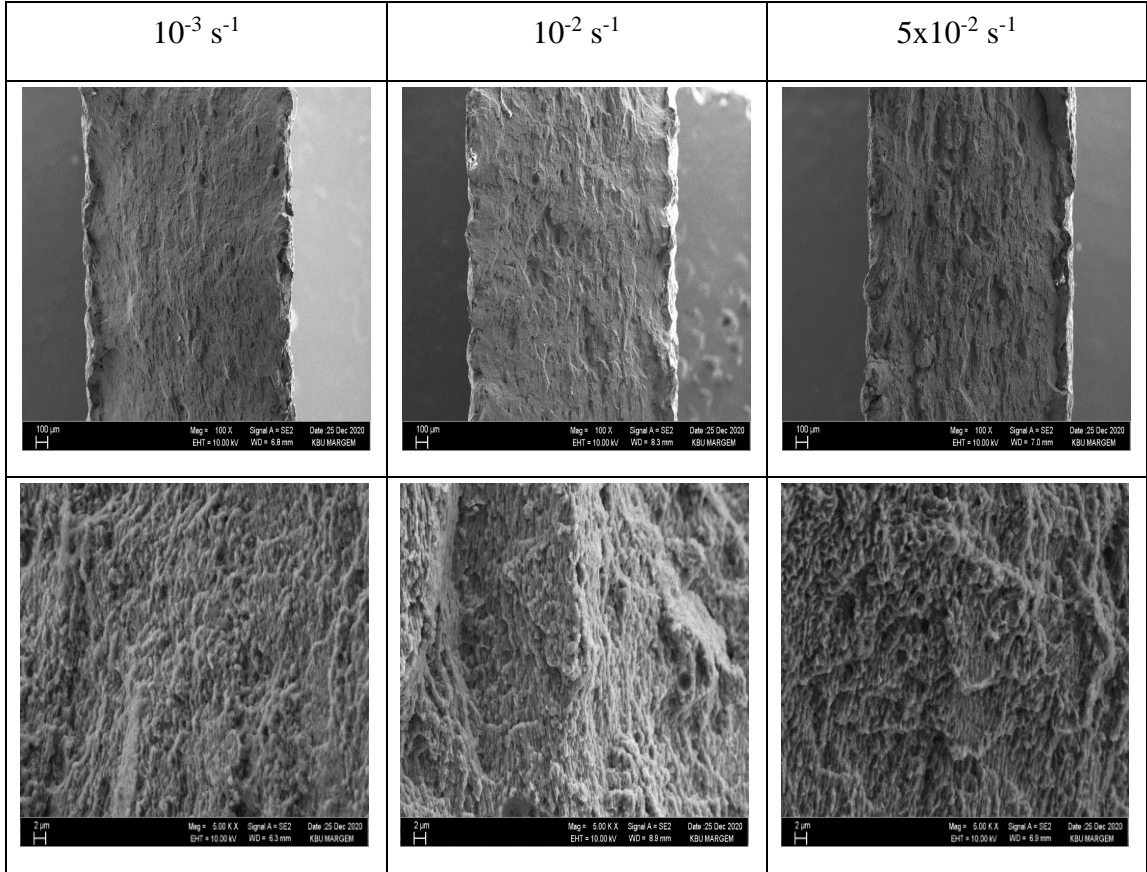


Şekil 6.20. 90 derece için 10^{-2} s^{-1} gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.



Şekil 6.21. 90 derece için $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızına ait deney ve simülasyon sonuçlarının grafik karşılaştırmaları.

90 derece üretim yönlü numuneye uygulanan yarı-statik çekme testleri ve simülasyonlardan elde edilen verilerle oluşturulan Şekil 6.19, Şekil 6.20 ve Şekil 6.21 grafikleri incelendiğinde verilerin birbirleri ile benzer olduğu görülmektedir. Numune, 10^{-3} s^{-1} , 10^{-3} s^{-1} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ hızlarında sünek davranış sergileyerek kırılmıştır. 10^{-3} s^{-1} gerinim hızında maksimum süneklik sergilerken $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ise minimum süneklik sergilemiştir. Grafiklerin yatay yönde uzaması malzemenin sünekliğine dair bilgi vermektedir. Bunun yanı sıra kırık yüzeylerdeki mikro yapılar üzerinde SEM analizleri yapılmış ve SEM görüntülerinin de bu verileri doğrular nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.22’de 90 derece üretim yönlü numunenin farklı gerinim hızlarındaki kopma yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.22. 90 derece yarı-statik çekme testi SEM görüntüleri.

6.5.2. Yüksek Sıcaklık Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

6.5.2.1. 0 Derece İçin Yüksek Sıcaklık Çekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

0 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımı için yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen akma, maksimum gerilme ve uzama değerleri ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen akma, maksimum gerilme ve uzama değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. 0 derece üretim yönü için yüksek sıcaklık test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

0 DERECE		DENEY SONUÇLARI	SİMÜLASYON SONUÇLARI	% SAPMA
(24°C)	Akma Gerilmesi	251 MPa	268 MPa	6,77
	Max. Gerilme	395 MPa	423 MPa	7,09
	% Uzama	% 7,38	% 7,93	7,45
(150°C)	Akma Gerilmesi	226 MPa	213 MPa	6,1
	Max. Gerilme	288 MPa	271 MPa	6,27
	% Uzama	% 12,22	% 12,96	6,06
(300°C)	Akma Gerilmesi	167 MPa	154 MPa	8,44
	Max. Gerilme	193 MPa	178 MPa	8,43
	% Uzama	% 14,24	% 14,01	1,64
ORTALAMA SAPMA			Akma Gerilmesi	7,10
			Max. Gerilme	7,26
			% Uzama	5,05

Çizelge 6.11.'de verilen sonuçlara bakıldığında 0 derece üretim yönüne ait akma gerilmeleri, yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen testlerde 24°C, 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla 251 MPa, 226 MPa ve 167 MPa olarak bulunurken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 6,77, % 6,1 ve % 8,44 oranlarında sapma göstererek 268 MPa, 213 MPa ve 154 MPa olarak bulunmuştur. Maksimum gerilmeler, testlerde 24°C, 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla 395 MPa, 288 MPa ve 193 MPa ölçülürken, sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar sırasıyla % 7,09, % 6,27 ve % 8,43 oranlarında sapma göstererek 423 MPa, 271 MPa ve 178 MPa olarak bulunmuştur. Uzama değerleri ise testlerde, 24°C, 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla % 7,38, % 12,22 ve % 14,24 olarak ölçülürken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 7,45, % 6,06 ve % 1,64 oranlarında sapma göstererek % 7,93, % 12,96 ve % 14,01 olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.11.'de bulunan değerlerin tamamı değerlendirildiğinde sonlu elemanlar analizinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen

sonuçlar arasında akma gerilmesi için % 7,1, maksimum gerilme için % 7,26 ve uzama değeri için ise % 5,05 sapma olduğu belirlenmiştir.

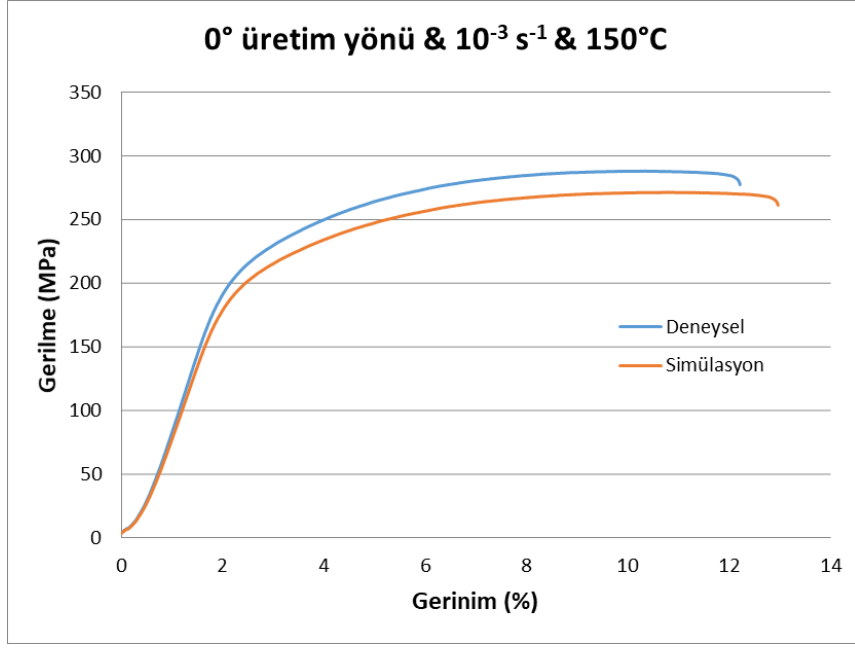
Çizelge 6.12.'de, akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değeri için geliştirilen modelle hesaplanan kuvvet değerlerinin, gerçek sonuçlara uygunluğunda kullanılan hata kareler ortalaması karekökü (*RMSE*), belirlilik katsayıları (R^2), ve ortalama mutlak yüzde hata (\pm % *MAPE*) değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.12. 0 derece numunenin yüksek sıcaklık etkilerine bağlı gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu.

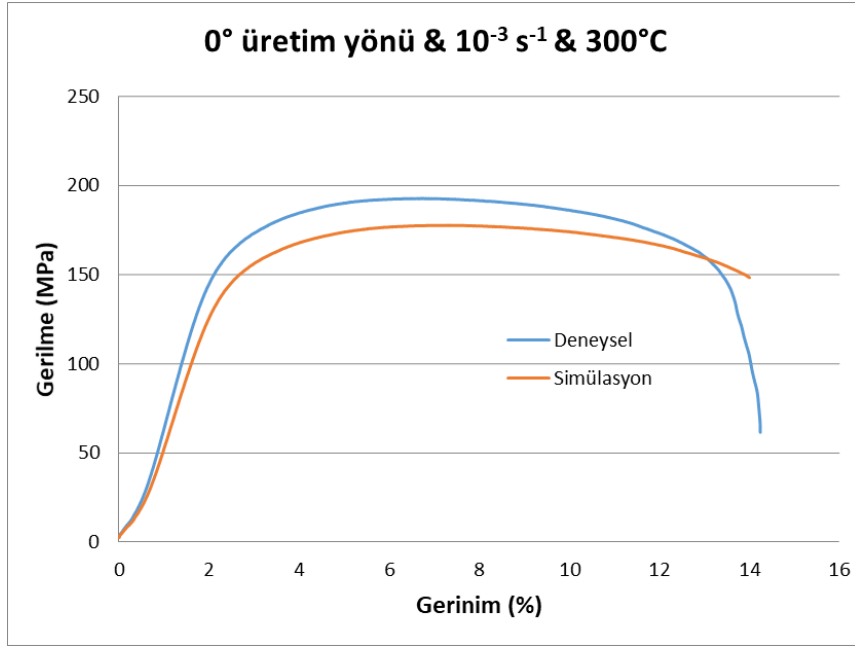
	RMSE	R²	MAPE
Akma Gerilmesi	1,523451	0,99555	6,962709
Max. Gerilme	1,485416	0,99562	6,61939
% Uzama	1,379599	0,99674	5,709877

Çizelge 5.9 incelendiğinde, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), akma gerilmesi için %6,96 bulunurken, maksimum gerilme için %6,62 ve uzama değeri için %5,71 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.9'da verilen tablodan elde edilen sonuçlara bakıldığında, özellikle R^2 değerinin %99 olarak hesaplanması, sonlu elemanlar modelinin uygunluğunu belirlenmiştir.

şekil 6.24 ve şekil 6.25'te 0 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımı için sırasıyla 150°C ve 300°C sıcaklık değerlerinde, testlerden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri karşılaştırılmal olarak verilmiştir.

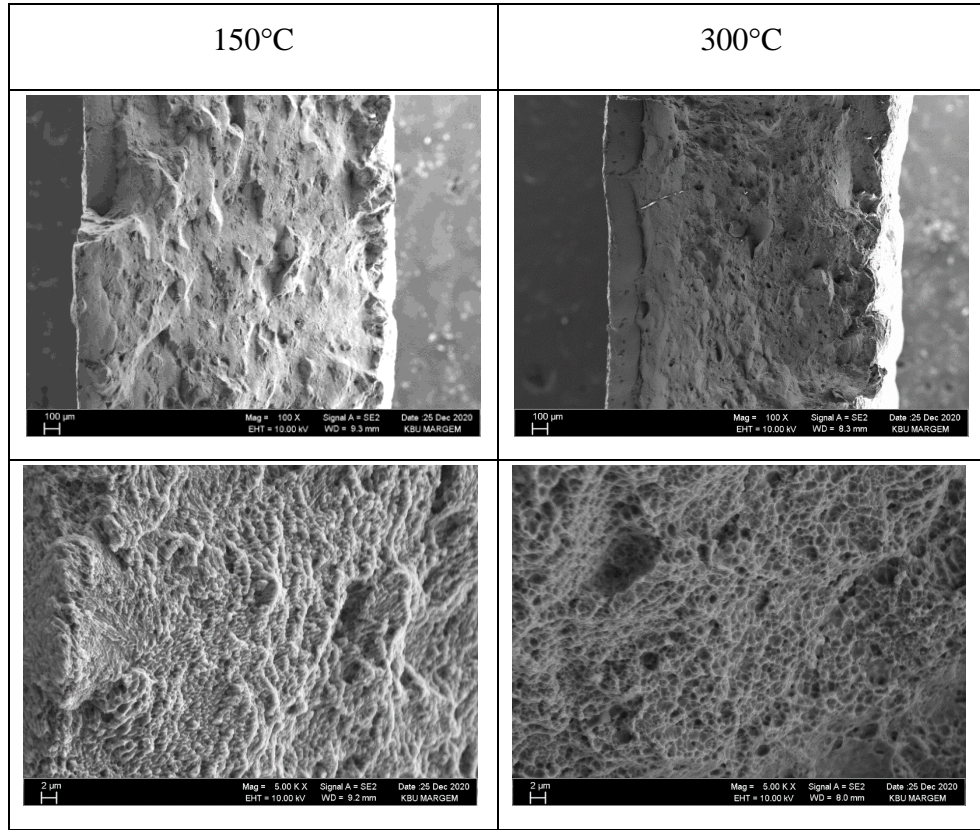


Şekil 6.23. 0 derece üretim yönlü numunenin 150°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması.



Şekil 6.24. 0 derece üretim yönlü numunenin 300°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması.

0 derece üretim yönlü numuneye uygulanan yüksek sıcaklık çekme testleri ve simülasyonlardan elde edilen verilerle oluşturulan Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24 grafikleri incelendiğinde verilerin birbirleri ile benzer olduğu görülmektedir. Numune, 150°C sıcaklıkta gevrek davranış göstererek kırılmış, 300°C’de ise daha sünek davranış göstererek kopmuştur. Bu da bize malzemenin artan sıcaklığa bağlı olarak sünekliğinin de artacağını göstermektedir. Grafiklerin yatay yönde uzaması malzemenin sünekliğine dair bilgi vermektedir. Bunun yanı sıra kırık yüzeylerdeki mikro yapılar üzerinde SEM analizleri yapılmış ve SEM görüntülerinin de bu verileri doğrular nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.25’de 0 derece üretim yönlü numunenin farklı sıcaklıklardaki kopma yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.25. 0 derece numuneye ait yüksek sıcaklık SEM görüntüleri.

0 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımının yüksek sıcaklık etkilerine karşı gösterdiği davranışlar ölçülerek bu alaşıma dair belirlenen Johnson-Cook parametrelerinin doğruluğu ispatlanmıştır. Bu alaşım ile ilgili gelecekte yapılacak yüksek sıcaklık

uygulamalarında 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda gerçekleştirilecek plastik deformasyon uygulamalarında elde edilen malzeme parametrelerinin kullanılabilceği kanıtlanmıştır.

6.5.2.2. 90 Derece İçin Yüksek Sıcaklık ekme Testi ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

90 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımı için yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen akma, maksimum gerilme ve uzama değerleri ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen akma, maksimum gerilme ve uzama değerlerinin karşılaştırılması izelge 6.13.'de verilmiştir.

Çizelge 6.13.'de verilen sonuçlara bakıldığında 90 derece üretim yönüne ait akma gerilmeleri, yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen testlerde 24°C, 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla 259 MPa, 237 MPa ve 145 MPa olarak bulunurken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 5,41, % 9,72 ve % 10,69 oranlarında sapma göstererek 273 MPa, 216 MPa ve 131 MPa olarak bulunmuştur. Maksimum gerilmeler, testlerde 24°C, 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla 356 MPa, 271 MPa ve 146 MPa ölçülürken, sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar sırasıyla % 7,58, % 10,16 ve % 10,96 oranlarında sapma göstererek 383 MPa, 246 MPa ve 162 MPa olarak bulunmuştur. Uzama değerleri ise testlerde, 24°C, 150°C ve 300°C sıcaklık değerleri için sırasıyla % 7,59, % 10,91 ve % 15,92 olarak ölçülürken, sonlu elemanlar analizinde sırasıyla % 8,04, % 6,97 ve %10,48 oranlarında sapma göstererek % 8,20, % 11,67 ve % 14,41 olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.13.'de bulunan değerlerin tamamı değerlendirildiğinde sonlu elemanlar analizinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar arasında akma gerilmesi için % 8,61, maksimum gerilme için % 9,57 ve uzama değerleri için ise % 8,5 sapma olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.13. 90 derece üretim yönü için yüksek sıcaklık test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

90 DERECE		DENEY SONUÇLARI	SİMÜLASYON SONUÇLARI	% SAPMA
(24°C)	Akma Gerilmesi	259 MPa	273 MPa	5,41
	Max. Gerilme	356 MPa	383 MPa	7,58
	% Uzama	% 7,59	% 8,20	8,04
(150°C)	Akma Gerilmesi	237 MPa	216 MPa	9,72
	Max. Gerilme	271 MPa	246 MPa	10,16
	% Uzama	% 10,91	% 11,67	6,97
(300°C)	Akma Gerilmesi	145 MPa	131 MPa	10,69
	Max. Gerilme	146 MPa	162 MPa	10,96
	% Uzama	% 15,92	% 14,41	10,48
ORTALAMA SAPMA			Akma Gerilmesi	8,61
			Max. Gerilme	9,57
			% Uzama	8,5

Çizelge 6.14'te, akma gerilmesi, maksimum gerilme ve uzama değeri için geliştirilen modellerle hesaplanan kuvvet değerlerinin, gerçek sonuçlara uygunluğunda kullanılan hata kareler ortalaması karekökü (*RMSE*), belirlilik katsayıları (R^2), ve ortalama mutlak yüzde hata (\pm % *MAPE*) değerleri verilmiştir.

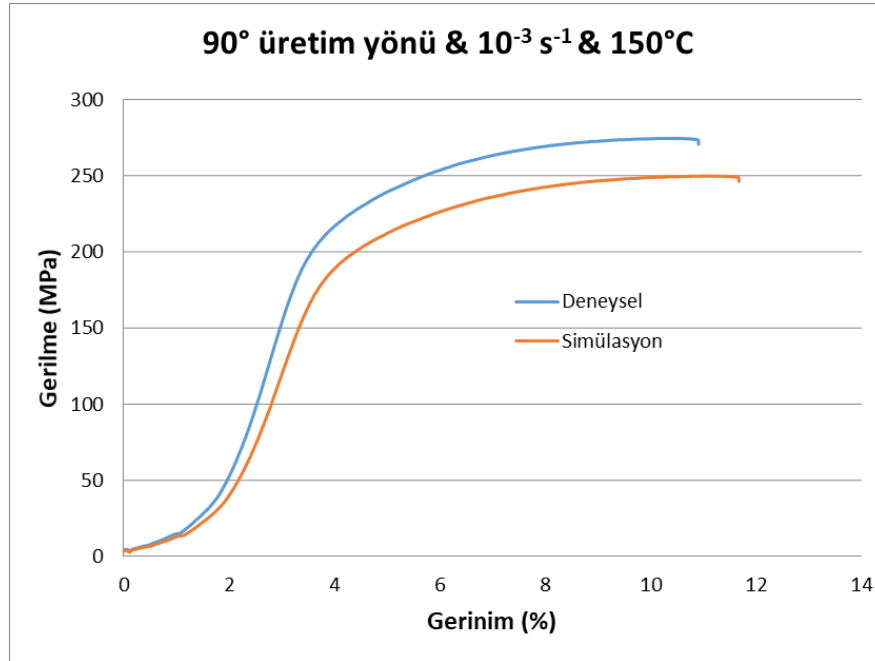
Çizelge 6.14. 90 derece numunenin yüksek sıcaklık etkilerine bağlı gerilme ve uzama miktarlarının sonlu elemanlar modeline ait hata kontrol tablosu

	RMSE	R^2	MAPE
Akma Gerilmesi	1,684486	0,993979	8,512483
Max. Gerilme	1,532928	0,99503	7,049608
% Uzama	1,408105	0,996462	5,948276

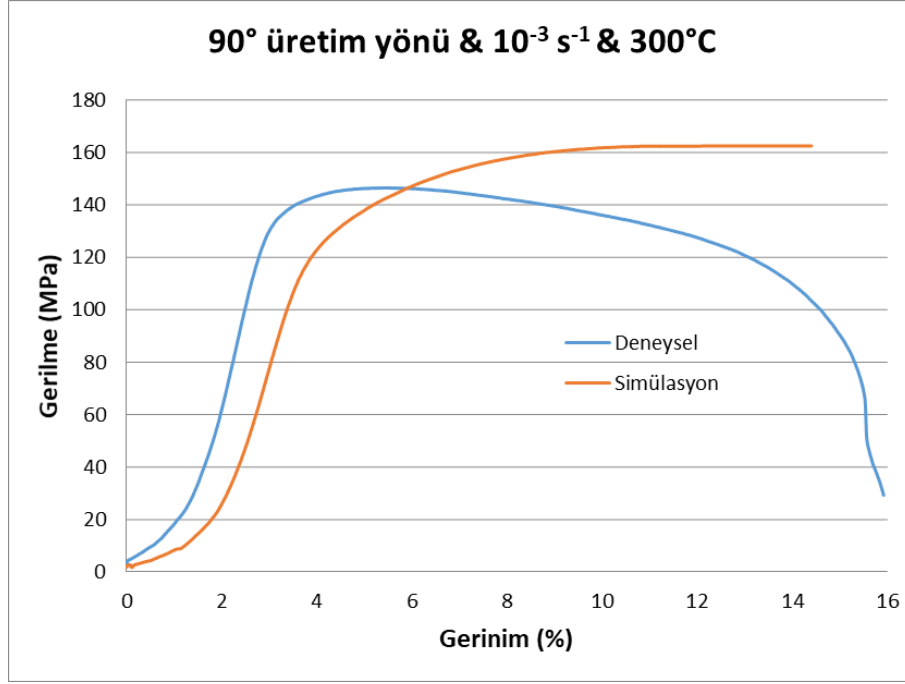
Çizelge 6.14. incelendiğinde, ortalama mutlak yüzde hata (*MAPE*), akma gerilmesi için %8,51 bulunurken, maksimum gerilme için %7,05 ve uzama değeri için % 5,95

olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.9'da verilen tablodan elde edilen sonuçlara bakıldığında, özellikle R^2 değerinin %99 olarak hesaplanması, sonlu elemanlar modelinin uygunluğunu belirlenmiştir.

Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de 90 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımı için sırasıyla 150°C ve 300°C sıcaklık değerlerinde, testlerden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

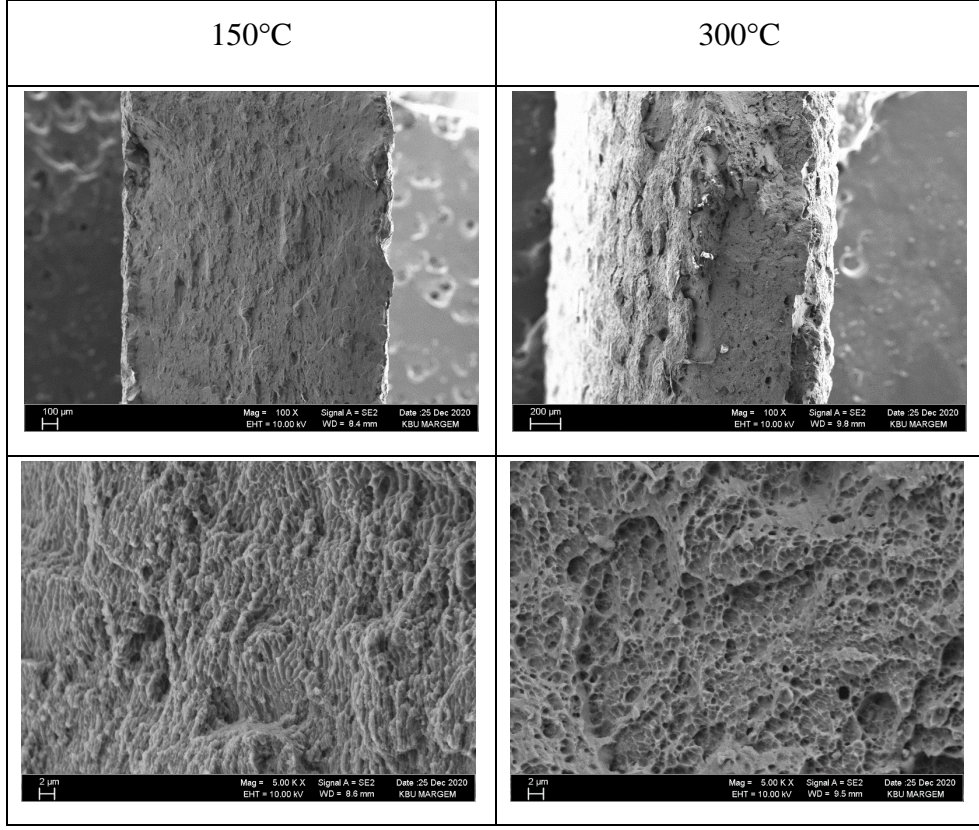


Şekil 6.26. 90 derece üretim yönlü numunenin 150°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması



Şekil 6.27. 90 derece üretim yönlü numunenin 300°C için test ve simülasyon sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması

90 derece üretim yönlü numuneye uygulanan yüksek sıcaklık çekme testleri ve simülasyonlardan elde edilen verilerle oluşturulan Şekil 6.26'da bulunan grafikler incelendiğinde verilerin birbirleri ile benzer olduğu görülmektedir. Buna karşın 300°C için oluşturulan Şekil 6.27'de bulunan grafiklerde sapma oranı yüksek olmuştur. 90 derece üretim yönlü numuneler için artan sıcaklığa bağlı olarak hata oranının da artacağı belirlenmiştir. Numune, 150°C sıcaklıktaki grafiklerin her ikisinde de benzer değerlerde gevrek davranış göstererek kırılmış, 300°C'de ise daha sünek davranış göstererek kopmuş olmasına rağmen akma ve kopma noktaları farklılık göstermektedir. Bu da bize malzemenin 0 derece yönlü numunede de olduğu gibi artan sıcaklığa bağlı olarak sünekliğinin de artacağını göstermektedir. Bunun yanı sıra kırık yüzeylerdeki mikro yapılar üzerinde SEM analizleri yapılmış ve SEM görüntülerinin de bu verileri doğrular nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.28'de 90 derece üretim yönlü numunenin farklı sıcaklıklardaki kopma yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde malzemenin 300°C'de daha fazla gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve sünek kırılma gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 6.28. 90 derece numuneye ait yüksek sıcaklık SEM görüntüleri

90 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımının yüksek sıcaklık etkilerine karşı gösterdiği davranışlar ölçülerek bu alaşıma dair belirlenen Johnson-Cook parametrelerinin doğruluğu ispatlanmıştır. Numunenin 150°C sıcaklık değerinde daha doğru sonuçlar vermesine rağmen 300°C sıcaklık değerinde hata oranında artış görülmüştür. Artan sıcaklığa bağlı olarak hata oranının artması, bu alaşıma dair bulunan malzeme parametrelerinin gelecekte yapılacak yüksek sıcaklık uygulamalarında 150°C'ye kadar olan sıcaklıklarda gerçekleştirilecek plastik deformasyonlarda kullanılabileceğini, ancak daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilecek uygulamalardaki başarı oranını düşürebileceği belirlenmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) teknolojisi kullanılarak 0 ve 90 derece üretim yönlerinde üretilen AlSi10Mg alaşım numunelerinin Johnson-Cook malzeme yapısal parametrelerinin belirlenerek doğrulanabilmesi amacıyla öncelikle yarı-statik ve yüksek sıcaklık çekme testleri yapılmıştır. Ardından çekme testlerinden elde edilen veriler kullanılarak JC parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelerin uygunluğunun kontrolünü sağlamak amacıyla sonlu elemanlar yöntemini baz alan bir analiz programı olan Ansys'te aynı test ve JC parametreleri kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Yarı-statik test ve simülasyonlar 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} ve $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızlarında, yüksek sıcaklık testleri ise 150°C ve 300°C sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen test ve analizler grafikler oluşturularak kıyaslanmış ve elde edilen JC parametrelerinin uygulanabilirliği belirtilmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Referans gerinim hızında (10^{-3} s^{-1}) gerçekleştirilen yüksek sıcaklık çekme testlerinde, artan deney sıcaklığıyla birlikte malzemenin akma ve maksimum gerilme değerlerinin literatürdeki çalışmalara benzer bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durum gerilme-gerinim eğrisinin daha yatay bir hal almasına neden olmuştur.
- 0 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımı için Johnson-Cook parametreleri A , B , n , C ve m değerleri sırasıyla 251 MPa, 1443 MPa, 0.749, 0.0166, 1.571 olarak hesaplanmıştır.

- 90 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımı için Johnson-Cook parametreleri A , B , n , C ve m değerleri sırasıyla 259 MPa, 1592 MPa, 0.81, 0.0169, 1.43 olarak hesaplanmıştır.
- Oda sıcaklığında (24 °C) gerçekleştirilen yarı-statik çekme testlerinde 0 ve 90 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımına ait akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerlerinin artan gerinim hız değerlerine bağlı olarak arttığı görülmüştür. Bu durum literatürde de belirtildiği üzere, soğuk işlemlerde malzemenin üzerine uygulanan çekme hızının artışına bağlı olarak malzeme mukavemetinin ve dislokasyon hızının arttığını göstermiştir.
- Referans gerinim hızında (10^{-3} s^{-1}) gerçekleştirilen yüksek sıcaklık çekme testlerinde her iki üretim yönü için de malzemenin artan sıcaklıkla ters orantılı olarak akma ve kopma gerilmelerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni yüksek sıcaklıklarda malzemedeki dislokasyon yoğunluğunun artan sıcaklığa bağlı olarak artmasıdır.
- Oda sıcaklığında (24°C) ve farklı gerinim hızlarında gerçekleştirilen yarı-statik çekme testleri ve simülasyonlar incelendiğinde bütün numuneler için artan gerinim hızına bağlı olarak test ve simülasyonlar arasındaki sapma miktarının da arttığı gözlenmiştir.
- Yarı-statik etki altında gerçekleştirilen deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), 0 ve 90 derece üretim yönünde sırasıyla, akma gerilmesi için %6,45 ve 7,02, maksimum gerilme için %6,62 ve 5,48, uzama değeri için %5,07 ve 8,09 olarak hesaplanmıştır.
- Yüksek sıcaklık çekme testi ve simülasyon sonuçları kıyaslandığında 0 ve 90 derece üretim yönünde sırasıyla, ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), akma gerilmesi için %6,96 ve %8,51, maksimum gerilme için %6,62 ve %7,05, uzama değeri için %5,71 ve %5,95 olarak hesaplanmıştır.
- Buradan yola çıkarak, 0 ve 90 derece üretim yönlü AlSi10Mg alaşımının yarı-statik ve yüksek sıcaklık etkilerine karşı gösterdiği davranışlar ölçülerek bu alaşıma dair belirlenen Johnson-Cook parametrelerinin doğruluğu ispatlanmıştır. Bu alaşım ile ilgili gelecekte yapılacak yarı-statik çalışmalarda ve yüksek sıcaklık uygulamalarında 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda gerçekleştirilecek plastik deformasyon uygulamalarında elde edilen malzeme parametrelerinin kullanılabilmesi kanıtlanmıştır.

7.2. ÖNERİLER

- SLM teknolojisiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımına ait malzeme yapısal parametreleri diğer malzeme modelleriyle (Zerilli-Armstrong, modified JC, vb.) hesaplanarak Johnson-Cook parametreleri ile karşılaştırma yapılabilir.
- AlSi10Mg alaşım tozu kullanılarak farklı eklemeli imalat teknolojileriyle üretilecek malzemelerin Johnson-Cook parametreleri bulunarak bu çalışma sonuçları ile uygunluğu tespit edilebilir.
- Testlerden elde edilen Johnson-Cook parametreleri farklı bir analiz programında yeniden incelenerek sonuçların uygunluğu araştırılabilir.
- AlSi10Mg alaşım malzemelerin termal etkilere olan tepkisi çok yüksek olmayan sıcaklıklarda test edilmelidir. Aksi halde hata oranı artmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Williams, J. C. and Starke, E. A., "Progress in structural materials for aerospace systems", *Acta Materialia*, 51 (19): 5775–5799 (2003).
2. Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., and Miller, W. S., "Recent development in aluminium alloys for aerospace applications", *Materials Science And Engineering A*, 280 (1): 102–107 (2000).
3. Kammer, C., "C. Kammer, Aluminium Handbook, Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, Germany, 1999, Pp. 61–73", 61–73 (1999).
4. Zhang, J., Song, B., Wei, Q., Bourell, D., and Shi, Y., "A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends", *Journal Of Materials Science And Technology*, 35 (2): 270–284 (2019).
5. Cui, C., Shen, Y. T., Meng, F. B., and Kang, S. B., "Review on fabrication methods of in situ metal matrix composites", *Journal Of Materials Science And Technology*, 16: 619–626 (2000).
6. Ranganath, S., "A Review on Particulate-Reinforced Titanium Matrix Composites", *Journal Of Materials Science*, 32 (1): 1–16 (1997).
7. Tjong, S. C. and Ma, Z. Y., "Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites", *Materials Science And Engineering: R: Reports*, 29 (3): 49–113 (2000).
8. Kasprzak, W., Chen, D. L., and Shaha, S. K., "Heat Treatment Development for a Rapidly Solidified Heat Resistant Cast Al-Si Alloy", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 22 (7): 1839–1847 (2013).
9. Li, W., Yang, K., Yin, S., Yang, X., Xu, Y., and Lupoi, R., "Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review", *Journal Of Materials Science And Technology*, 34 (3): 440–457 (2018).
10. Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science And Engineering R: Reports*, 50 (1–2): 1–78 (2005).
11. Nie, F., Dong, H., Chen, S., Li, P., Wang, L., Zhao, Z., Li, X., and Zhang, H., "Microstructure and Mechanical Properties of Pulse MIG Welded 6061/A356 Aluminum Alloy Dissimilar Butt Joints", *Journal Of Materials Science And Technology*, 34 (3): 551–560 (2018).

12. Qiu, X., Tariq, N. ul H., Qi, L., Wang, J. Q., and Xiong, T. Y., "A hybrid approach to improve microstructure and mechanical properties of cold spray additively manufactured A380 aluminum composites", *Materials Science And Engineering A*, 772 (December 2019): (2020).
13. Montero Sistiaga, M. L., Mertens, R., Vrancken, B., Wang, X., Van Hooreweder, B., Kruth, J. P., and Van Humbeeck, J., "Changing the alloy composition of Al7075 for better processability by selective laser melting", *Journal Of Materials Processing Technology*, 238: 437–445 (2016).
14. Foehring, D., Chew, H. B., and Lambros, J., "Characterizing the tensile behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V using multiscale digital image correlation", *Materials Science And Engineering A*, 724 (December 2017): 536–546 (2018).
15. Atzeni, E., Barletta, M., Calignano, F., Iuliano, L., Rubino, G., and Tagliaferri, V., "Abrasive Fluidized Bed (AFB) finishing of AlSi10Mg substrates manufactured by Direct Metal Laser Sintering (DMLS)", *Additive Manufacturing*, 10: 15–23 (2016).
16. Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., and Buchbinder, D., "Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior", *Materials And Design*, 34: 159–169 (2012).
17. Gül, F., "AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18 (1): 30–37 (2014).
18. Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., Li, J., and Mohammadi, M., "Columnar to equiaxed transition during direct metal laser sintering of AlSi10Mg alloy: Effect of building direction", *Additive Manufacturing*, 23 (June): 121–131 (2018).
19. Zaretsky, E., Stern, A., and Frage, N., "Dynamic response of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting", *Materials Science And Engineering A*, 688 (February): 364–370 (2017).
20. Nurel, B., Nahmany, M., Frage, N., Stern, A., and Sadot, O., "Split Hopkinson pressure bar tests for investigating dynamic properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy by selective laser melting", *Additive Manufacturing*, 22 (April): 823–833 (2018).
21. Brandão, A. D., Gumpinger, J., Gschweidl, M., Seyfert, C., Hofbauer, P., and Ghidini, T., "Fatigue Properties of Additively Manufactured AlSi10Mg-Surface Treatment Effect", *Procedia Structural Integrity*, 7: 58–66 (2017).
22. Hitzler, L., Janousch, C., Schanz, J., Merkel, M., Heine, B., Mack, F., Hall, W., and Öchsner, A., "Direction and location dependency of selective laser melted AlSi10Mg specimens", *Journal Of Materials Processing Technology*, 243:

- 48–61 (2017).
23. Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., Odeshi, A., and Mohammadi, M., "Dynamic loading of direct metal laser sintered AlSi10Mg alloy: Strengthening behavior in different building directions", *Materials And Design*, 159: 201–211 (2018).
 24. Cabrini, M., Lorenzi, S., Pastore, T., Pellegrini, S., Ambrosio, E. P., Calignano, F., Manfredi, D., Pavese, M., and Fino, P., "Effect of heat treatment on corrosion resistance of DMLS AlSi10Mg alloy", *Electrochimica Acta*, 206: 346–355 (2016).
 25. Zhang, C., Zhu, H., Liao, H., Cheng, Y., Hu, Z., and Zeng, X., "Effect of heat treatments on fatigue property of selective laser melting AlSi10Mg", *International Journal Of Fatigue*, 116 (April): 513–522 (2018).
 26. Beevers, E., Brandão, A. D., Gumpinger, J., Gschweidl, M., Seyfert, C., Hofbauer, P., Rohr, T., and Ghidini, T., "Fatigue properties and material characteristics of additively manufactured AlSi10Mg – Effect of the contour parameter on the microstructure, density, residual stress, roughness and mechanical properties", *International Journal Of Fatigue*, 117 (April): 148–162 (2018).
 27. Maconachie, T., Leary, M., Zhang, J., Medvedev, A., Sarker, A., Ruan, D., Lu, G., Faruque, O., and Brandt, M., "Effect of build orientation on the quasi-static and dynamic response of SLM AlSi10Mg", *Materials Science And Engineering A*, 788 (March): 139445 (2020).
 28. Zhao, Y., Sun, J., Li, J., Yan, Y., and Wang, P., "A comparative study on Johnson-Cook and modified Johnson-Cook constitutive material model to predict the dynamic behavior laser additive manufacturing FeCr alloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 723: 179–187 (2017).
 29. Xing, X., Duan, X., Sun, X., Gong, H., Wang, L., and Jiang, F., "Modification of residual stresses in laser additive manufactured AlSi10Mg specimens using an ultrasonic peening technique", *Materials*, 12 (3): (2019).
 30. Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A. C., Anaraki, A. P., Ahmadi, S. M., Zadpoor, A. A., and Schmauder, S., "Failure mechanisms of additively manufactured porous biomaterials: Effects of porosity and type of unit cell.", *Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials*, 50: 180–191 (2015).
 31. Segebade, E., Gerstenmeyer, M., Dietrich, S., Zanger, F., and Schulze, V., "Influence of anisotropy of additively manufactured AlSi10Mg parts on chip formation during orthogonal cutting", *Procedia CIRP*, 82: 113–118 (2019).
 32. Qian, X., Peng, X., Song, Y., Huang, J., Wei, Y., Liu, P., Mao, X., Zhang, J., and Wang, L., "Dynamic constitutive relationship of CuCrZr alloy based on Johnson-Cook model", *Nuclear Materials And Energy*, 24: 100768 (2020).

33. Li, Z. hua, Nie, Y. fei, Liu, B., Kuai, Z. zhou, Zhao, M., and Liu, F., "Mechanical properties of AlSi10Mg lattice structures fabricated by selective laser melting", *Materials And Design*, 192: 108709 (2020).
34. Samantaray, M., Nath Thatoi, D., and Sahoo, S., "Finite Element Simulation of Heat Transfer in Laser Additive Manufacturing of AlSi10Mg Powders", *Materials Today: Proceedings*, 22: 3001–3008 (2019).
35. Liu, S., Zhu, H., Peng, G., Yin, J., and Zeng, X., "Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis", *Materials And Design*, 142: 319–328 (2018).
36. Wang, P., Lei, H., Zhu, X., Chen, H., and Fang, D., "Influence of manufacturing geometric defects on the mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting", *Journal Of Alloys And Compounds*, 789: 852–859 (2019).
37. Costas, M., Morin, D., de Lucio, M., and Langseth, M., "Testing and simulation of additively manufactured AlSi10Mg components under quasi-static loading", *European Journal Of Mechanics, A/Solids*, 81: 103966 (2020).
38. "ASTM International, "ASTM F2792-12a," Rapid Manuf. Assoc., pp. 1– 3, 2013.", 1–3 (2013).
39. Efe, S., "Fdm tipi 3 boyutlu yazıcılardaki örgü parametrelerinin ürün dayanımına etkisi", *Sakarya Üniversitesi*, (2020).
40. Yen, B. and Yao, Y., "Three Dimensional (3D) Printing - Jolts on Supply Chain Management and the Chinese Manufacturing Industry", (November): 1–20 (2015).
41. Rošker, P. and Shellabear, M., "E-manufacturing with laser-sintering - to series production and beyond", (2004).
42. Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., Hinkson, S., Steelman, T., Silverman, E., Valdovino, P., Gigerenzer, H., Foyos, J., Ogren, J., Dorey, J., Karg, K., McDonald, T., and Es-Said, O. S., "Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 20 (2): 203–212 (2011).
43. ÖZER, G., "Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme", *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1): 606–621 (2020).
44. Özyeşildağ, M., "Eklemeli Üretim Teknolojileri İçin Çok İşlevli Grafen Katkılı Nanokompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Geliştirilmesi", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi*, (2019).
45. Koç, E. and Gökçöl, C., "3D Printing Technology Methods and Materials", *Electronic Journal Of Vocational Colleges*, 89–90 (2018).

46. Ruffo, M., Tuck, C., and Hague, R., "Make or buy analysis for rapid manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, 13: 23–29 (2007).
47. Nugent, P., "15 Rotational Molding", Applied Plastics Engineering Handbook, Second Edi. Ed., *Elsevier Inc.*, 321–344 (2017).
48. Baş, H., "Eriyik Yığıma Tekniği ile Çalışan Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, İmalatı ve Elde Edilen Numunelerin Bazı Özelliklerinin Belirlenmesi", *Ondokuz Mayıs Üniversitesi*, (2017).
49. Özgen, İ., "Endüstri 4.0’da Robotik ve Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Farklı Rekabet ve Üretim Senaryoları Altında Stratejik Analizi", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2019).
50. Kellens, K., Baumer, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., and Duflou, J. R., "Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications", *Journal Of Industrial Ecology*, 21 (S1): S49–S68 (2017).
51. Edgar, J. and Tint, S., "“Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing”, 2nd Edition", *Johnson Matthey Technology Review*, 59 (3): 193–198 (2015).
52. Aydın, N., "Yeşil Üretim Uygulamaları", 356–360 (2017).
53. "Kleviet, A. v. (2015, Mayıs / Haziran). Is your Supply Chain Additive. Supply Chain Management Review, s. 34-39.", *Is Your Supply Chain Additive*, 34–39 (2015).
54. SÜRME, H. K., "EKLEMELİ İmalat (3B Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar", *Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering*, 24 (2): 373–392 (2019).
55. Saraçyakupoğlu, T., "Saraçyakupoğlu T., “3d Manufacturing Applications In Aviation Industry In Accordance With The Airworthiness Rules And Regulations: A Review”, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 4(1): 53-65, (2020).", 4 (1): 53–65 (2020).
56. Balletti, C., Ballarin, M., and Guerra, F., "3D printing: State of the art and future perspectives", *Journal Of Cultural Heritage*, 26: 172–182 (2017).
57. "Autodesk & Paralympian Showcase Future of Manufacturing to POTUS & Chancellor Merkel", .
58. "3D Printed Heart Replica Helps Save the Life of a Nine-Month-Old Baby", .
59. "Three-Dimensional Printing of Complex Biological Structures by Freeform Reversible Embedding of Suspended Hydrogels", .

60. Billiet, T., Vandenhaute, M., Schelfhout, J., Van Vlierberghe, S., and Dubruel, P., "A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering", *Biomaterials*, 33 (26): 6020–6041 (2012).
61. Arabacı, H. and Can, Ö., "Sanat ve Tasarım Anasanat Dalı Giyim Aksesuarları Tasarımında 3 Boyutlu Yazıcılarla Yeni Yaklaşımlar", *Süleyman Demirel Üniversitesi*, (2020).
62. Turhan, S. and Özsoy, A., "DMLS Yöntemiyle İmal Edilen Ti6Al4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8 (2): 15–27 (2016).
63. Li, V. C. F., Kuang, X., Hamel, C. M., Roach, D., Deng, Y., and Qi, H. J., "Cellulose nanocrystals support material for 3D printing complexly shaped structures via multi-materials-multi-methods printing", *Additive Manufacturing*, 28 (November 2018): 14–22 (2019).
64. Atonal-Sánchez, J., Beltrán-Fernández, J. A., Hernández-Gómez, L. H., Yazmin-Villagran, L., Flores-Campos, J. A., López-Lievano, A., and Moreno-Garibaldi, P., "Termomechanical analysis of 3D printing specimens (acrylonitrile butadiene styrene)", *Advanced Structured Materials*, 92 (January): 237–253 (2019).
65. Swetham, T., Madhana, K., Reddy, M., Huggi, A., and Kumar, M. N., "A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM", 2 (3): 353–361 (2017).
66. Dursun, A. M., "Değişken Gözenekli Hücresel Yapıların Metal Eklemeli İmalat İçin Tasarımı ve Üretilen Yapıların Tasarım ile Uyumluluğunun Araştırılması", *Gazi Üniversitesi*, (2019).
67. Trtica, M., Gakovic, B., Batani, D., Desai, T., Panjan, P., and Radak, B., "Surface modifications of a titanium implant by a picosecond Nd:YAG laser operating at 1064 and 532 nm", *Applied Surface Science*, 253 (5): 2551–2556 (2006).
68. Başer, T. A., "Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı", *Mühendis Ve Makina*, 53 (635): 51–58 (2012).
69. Güler, F., "Eklemeli İmalat Destekli Dereceli Hassas Döküm Yöntemi İle Bal Peteği Yapıların Üretimi ve Karakterizasyonu", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2019).
70. Güner, A. T., "Yarı Katı Halde Şekil Verilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Su verme Sıcaklığının Etkisi", (2013).
71. "Hull, C. W. (1986). U.S. Patent No. 4,575,330. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office", .

72. Chaput, C. and Chartier, T., "Fabrication of ceramics by stereolithography", *RTEjournal - Forum Für Rapid Technologie*, 4 (1): (2007).
73. Erkol, B. B., "Dijital Işık İşleme ile Kürleşme Özellikli Üç Boyutlu Yazıcı", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2019).
74. Matte, C. D., Pearson, M., Trottier-Cournoyer, F., Dafoe, A., and Kwok, T. H., "Automated storage and active cleaning for multi-material digital-light-processing printer", *Rapid Prototyping Journal*, 25 (5): 864–874 (2019).
75. ÇALIŞKAN, C. İ. and ARPACIOĞLU, Ü., "Yapı Üretiminde Eklemeli İmal Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi", *Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering*, 1117–1136 (2020).
76. Dean, D., Mott, E., Luo, X., Busso, M., Wang, M. O., Vorwald, C., Siblani, A., and Fisher, J. P., "Multiple initiators and dyes for continuous Digital Light Processing (cDLP) additive manufacture of resorbable bone tissue engineering scaffolds: A new method and new material to fabricate resorbable scaffold for bone tissue engineering via continuous Dig", *Virtual And Physical Prototyping*, 9 (1): 3–9 (2014).
77. Ronca, A., Ambrosio, L., and Grijpma, D. W., "Preparation of designed poly(d,l-lactide)/nanosized hydroxyapatite composite structures by stereolithography", *Acta Biomaterialia*, 9 (4): 5989–5996 (2013).
78. Mele, M., Campana, G., and Monti, G. L., "Modelling of the capillarity effect in Multi Jet Fusion technology", *Additive Manufacturing*, 30 (September): 100879 (2019).
79. Riedelbauch, J., Rietzel, D., and Witt, G., "Analysis of material aging and the influence on the mechanical properties of polyamide 12 in the Multi Jet Fusion process", *Additive Manufacturing*, 27 (December 2018): 259–266 (2019).
80. SAĞBAŞ, B., "Effect of Orientation Angle on Surface Quality and Dimensional Accuracy of Functional Parts Manufactured by Multi Jet Fusion Technology", *European Mechanical Science*, 4 (2): 47–52 (2020).
81. Sillani, F., Kleijnen, R. G., Vetterli, M., Schmid, M., and Wegener, K., "Selective laser sintering and multi jet fusion: Process-induced modification of the raw materials and analyses of parts performance", *Additive Manufacturing*, 27 (November 2018): 32–41 (2019).
82. Morales-Planas, S., Minguella-Canela, J., Lluma-Fuentes, J., Travieso-Rodriguez, J. A., and García-Granada, A. A., "Multi Jet Fusion PA12 manufacturing parameters for watertightness, strength and tolerances", *Materials*, 11 (8): 1–11 (2018).
83. Gay, P., Blanco, D., Pelayo, F., Noriega, A., and Fernández, P., "Analysis of

- Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts", *Procedia Engineering*, 132: 70–77 (2015).
84. Udroi, R. and Braga, I. C., "Polyjet technology applications for rapid tooling", *MATEC Web Of Conferences*, 112: 1–6 (2017).
85. Vaezi, M., Seitz, H., and Yang, S., "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 67 (5–8): 1721–1754 (2013).
86. Kayacan, M. Y. and Yılmaz, N., "DMLS Eklemeli İmalatta Süreç Ve Maliyet Modeli Geliştirilmesi", *Journal Of Polytechnic*, 0900 (3): 763–770 (2018).
87. "Metal Eklemeli İmalat(M.E.İ) Teknolojileri, Destek Yapılar ve Hücrel Yapılar,Açık Ders Notları,Dumlupınar Üniversitesi,<http://adn.dpu.edu.tr/pluginfile.php/10219/course/overviewfiles/MEI%20GENEL.pdf?forcedownload=1>", .
88. Tuttle, R. B., "Feasibility study of 316L stainless steel for the ultrasonic consolidation process", *Journal Of Manufacturing Processes*, 9 (2): 87–93 (2007).
89. KORKMAZ, M. E., "Nikel Esaslı Süper Alaşımın (Nimonic 80A) Malzeme Yapısal Denklem Parametrelerinin Belirlenmesi ve Uygulanabilirliğinin Araştırılması", *Karabük Üniversitesi Doktora Tezi*, (2018).
90. Korkmaz, M. E., Günay, M., and Verleysen, P., "Investigation of tensile Johnson-Cook model parameters for Nimonic 80A superalloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 801: 542–549 (2019).
91. Zhao, W., Yang, Q., Mashood, A., Ning, K., and Anshun, H., "An inverse - identification - based finite element simulation of orthogonal cutting tungsten carbide", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 41 (2): 1–12 (2019).
92. LIU, W., HE, Z., CHEN, Y., and TANG, S., "Dynamic mechanical properties and constitutive equations of 2519A aluminum alloy", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 24 (7): 2179–2186 (2014).
93. Wang, Y., Zhao, G., Xu, X., Chen, X., and Zhang, C., "Constitutive modeling, processing map establishment and microstructure analysis of spray deposited Al-Cu-Li alloy 2195", *Journal Of Alloys And Compounds*, 779: 735–751 (2019).
94. Korkmaz, M. E., "Determination and Verification of Johnson–Cook Parameters for 430 Ferritic Steels via Different Gage Lengths", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, (2019).

ÖZGEÇMİŞ

Murat AKTÜRK, 1994 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2013-2014 eğitim yılında Karabük Üniversitesi Yabancı Diller Yüksek Okulu’nda İngilizce hazırlık eğitimi aldı. 2014 yılında başladığı Raylı Sistemler Mühendisliğinden 2018 yılında iyi bir ortalama ile mezun oldu. 2018 yılında başladığı Anadolu Üniversitesi’nde Uluslararası Ticaret ve Lojistik Yönetimi bölümünde öğrenimine devam etmektedir.

İletişim Bilgileri:

Adres : Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK
Tel : (536) 845 87 51
E-posta : murat.akturk.1994@gmail.com