

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**MAKİNA VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN**  
**ALSİ10MG ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN**  
**ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SAVAŞ KAŞIKCIOĞLU**

**DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024**

T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNA VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI



METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN  
ALSİ10MG ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAVAŞ KAŞIKCIOĞLU

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**SAVAŞ KAŞIKCIOĞLU**

## ÖZET

**METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ALSİ10MG  
ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
SAVAŞ KAŞIKCIOĞLU  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. GÖKMEN ATLIHAN)  
(EŞ DANIŞMAN: DOÇ. DR. BERKAY ERGENE)  
DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi, hafif olmasına rağmen yüksek özgül dayanım sunan karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesini sağlayan devrim niteliğinde bir teknolojidir. Bu çalışmada, ASTM E8M standardına uygun olarak toz yataklı füzyon yöntemiyle üretilen parçaların farklı inşa yönlerinde (yatay, açılı ve dikey) mekanik özellikleri, çekme testleri ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Deformasyon mekanizmasını anlamak için makroskobik ve mikroskobik gözlemler gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak; DMLS yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemeden elde edilen numunelerde, DMLS süreci için katman kalınlığı (mm), lazer gücü (W), lazer ışınlama süresi (m) ve enerji yoğunluğu ( $J/mm^3$ ) gibi çeşitli üretim parametreleri incelenerek yapılmıştır. Numuneler Eklemeli İmalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. DMLS yöntemiyle farklı parametrelerde üretilen AlSi10Mg numunelerinin mikro yapısı, sertliği ve FESEM (alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri incelendiğinde, yatay numunede yüksek mukavemet ve sünek bir yapı gözlemlenirken, açılı numunede daha sert bir yapı tespit edilmiştir. Dikey numunede ise diğerlerine kıyasla benzer özellikler analiz edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Eklemeli imalat, Mekanik özellikler, AlSi10Mg

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ALSI10MG ALLOY PRODUCED BY METAL ADDITIVE MANUFACTURING METHOD**

**MSC THESIS**

**SAVAŞ KAŞIKCIOĞLU**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF.DR. GÖKMEN ATLIHAN)**

**(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF.DR. BERKAY ERGENE**

**DENİZLİ, AUGUST 2024**

Additive Manufacturing (AM) technology is a revolutionary technology that enables the production of parts with complex geometries that are lightweight yet offer high specific strength. In this study, mechanical properties, tensile tests and hardness measurements of parts produced by powder bed fusion method in accordance with ASTM E8M standard in different construction directions (horizontal, angular and vertical) were investigated. Macroscopic and microscopic observations were carried out to understand the deformation mechanism. As a result; in the samples obtained from AlSi10Mg material produced by DMLS method, three parameters such as layer thickness (mm), laser power (W), laser irradiation time (m) and energy density ( $J/mm^3$ ) for the DMLS process were obtained.

The samples were produced using the Additive Manufacturing method. When the microstructure, hardness and FESEM (field emission scanning electron microscope) images of AlSi10Mg samples produced with different parameters by the DMLS method were examined, a high strength and ductile structure was observed in the horizontal sample, while a harder structure was detected in the angled sample. In the vertical sample, similar features were analyzed compared to others.

**KEYWORDS:** Additive manufacturing, Mechanical properties, AlSi10Mg

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ .....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
3. GENEL BİLGİLER .....	8
3.1 METALLER .....	8
3.1.1 Alüminyum .....	8
3.1.2 Silisyum .....	13
3.1.3 Magnezyum .....	15
3.2 ALAŞIMLAR.....	16
3.2.1 Alüminyum Alaşımları .....	16
3.2.2 Alüminyum Döküm Alaşımlar .....	18
3.3 EKLEMELİ İMALAT .....	19
3.3.1 Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler .....	20
3.3.1.1 Metaller ve Alaşımlar .....	20
3.3.1.2 Polimerler ve Kompozitler .....	21
3.3.1.3 Seramikler .....	22
3.3.1.4 Eklemeli İmalatta Kullanılan Toz Malzemeler .....	23
3.3.1.5 Alüminyum Alaşımları .....	24
3.3.2 Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları .....	24
3.3.2.1 Avantajları.....	24
3.3.2.2 Dezavantajları .....	25
3.3.3 Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	25
3.3.3.1 Fotopolomorizasyon Yöntemi.....	26
3.3.3.1.1 Stereolitografi (SLA) .....	26
3.3.3.1.2 Dijital Işık İşleme (DLP) .....	27
3.3.3.1.3 Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP) .....	28
3.3.3.2 Malzeme Ekstrüzyonu.....	30
3.3.3.2.1 Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) .....	30
3.3.3.3 Malzeme Püskürtme .....	31
3.3.4 Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat .....	32
3.3.5 Toz Yatak Füzyonu .....	32
3.3.5.1 Seçici Lazer Sinterleme (SLS) .....	32
3.3.5.2 Multi Jet Eritme Yöntemi (MJF) .....	33
3.3.5.3 Elektron Işınli Ergitme (EBM).....	34
3.3.5.4 Seçici Lazer Eritme (SLM) .....	34
3.3.5.5 Lazer Toz Şekillendirme (LENS) .....	36
3.3.5.6 Elektron Işını Eklemeli İmalat Yöntemi (EBAM) .....	37
3.3.6 Levha/Sac Laminasyon Metodu .....	38
3.4 EOSM290' IN TEKNİK ÖZELLİKLERİ .....	39

3.4.1	Ana Özellikleri.....	39
<b>4.</b>	<b>YÖNTEM.....</b>	<b>41</b>
4.1	ALÜMİNYUM (ALSİ10MG) ÖZELLİKLERİ.....	41
4.1.1	AlSi10Mg' un Üretim Parametreleri .....	44
4.1.2	Deneyin Amacı .....	45
4.1.3	Malzemelerin Hazırlanması Süreci.....	45
4.2	ÇEKME TESTİ .....	46
4.3	SERTLİK TESTİ.....	48
<b>5.</b>	<b>BULGULAR .....</b>	<b>49</b>
5.1	Çekme Testinin Analizi .....	49
5.2	Sertlik Testinin İncelenmesi .....	52
5.3	FESEM Analizleri .....	53
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>55</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>56</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>66</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: Bazı Metallerin Görselleri (Durumetal kaplama 2019).....	8
Şekil 3.2: Alüminyum Folyonun Kullanımından Bir Örnek (Eskier 2017). ....	9
Şekil 3.3: Boksit Minerali (Eskier 2017).....	11
Şekil 3.4: Alüminyum Alaşımları (Arslan 2016) .....	17
Şekil 3.5: Eklemeli İmalatın ASTM F42 Standardına Göre Sınıflandırılması (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies 2012).....	25
Şekil 3.6: Stereolitografi Çalışma Prensipleri (Gibson ve diğ. 2010). ....	27
Şekil 3.7: Sürekli Dijital Işık İşleme Teknolojisi (Tumbleston ve diğ. 2015)..	28
Şekil 3.8: Eklemeli İmalatta Tabakaların Oluşturulması (Epma raporu 2018).29	
Şekil 3.9: Eriyik Yığılma Teknolojisi.(Tumbleston ve diğ. 2015). ....	30
Şekil 3.10: Çoklu Püskürtme (Tumbleston ve diğ. 2015). ....	31
Şekil 3.11: Yapıştırıcı İle Katmanlı İmalat Süreci. (Xometry 2017).....	32
Şekil 3.12: SLS Teknolojisi (Tumbleston ve diğ. 2015). ....	33
Şekil 3.13: DMLS Şeması (Simchi ve diğ. 2003). ....	35
Şekil 3.14: DMLS' De Proses Parametrelerinin Şematik Diyagramı (Townsend ve diğ. 2016). ....	36
Şekil 3.15: Levha/Sac Laminasyon Gösterimi (Additive Manufacturing Research Group 2017) .....	38
Şekil 3.16: EOS M290 Görseli (eos.info/Equipment/Metal-Platforms 2023)...	39
Şekil 4.1: Malzemeye Ait Boyutsal Parametreler.....	45
Şekil 4.2: Malzemelerin EOS M290 Platformunda Konumlandırılması.....	45
Şekil 4.3: Çekme Testi İçin Kullanılan Cihaz ve Numune Görüntüsü .....	46
Şekil 4.4: AlSi10MG' un 0°, 45° Ve 90° Üretim Sonu Görüntüleri a) Yatay b) Açılı c) Dikey .....	47
Şekil 4.5: Çekme Testi Sonucu Oluşan Uzama, Kopma Görüntüleri a) Yatay b) Açılı c) Dikey. ....	47
Şekil 4.6: Hardway Marka Sertlik Test Cihazı.....	48
Şekil 5.1: Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Grafiği a) Yatay b) Açılı c) Dikey	50
Şekil 5.2: Karşılaştırmalı Çekme Mukavemet Grafikleri.....	51
Şekil 5.3: Karşılaştırmalı Gerinim (%) Grafikleri. ....	51
Şekil 5.4: Sertlik Testi Grafiği.....	52
Şekil 5.5: FESEM Görüntüsü a) Yatay b) Açılı c) Dikey. ....	54

# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b> % 99.995 Saflıktaki Alüminyumun Özellikleri (Eroğlu ve Şahiner 2018).....	13
<b>Tablo 3.2:</b> İşlem Çeşidine Göre Eklemeli İmalat Teknolojileri(Özsolak 2019)19	
<b>Tablo 3.3:</b> Eklemeli İmalatta En Çok Kullanılan Metaller (Ngo ve diğ. 2018)21	
<b>Tablo 3.4:</b> Teknik Veri Tablosu (na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms)....	40
<b>Tablo 4.1:</b> Teknik Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019). ....	41
<b>Tablo 4.2:</b> Mekanik Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019).. ...	42
<b>Tablo 4.3:</b> Fiziksel Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019).....	43
<b>Tablo 4.4:</b> Kimyasal Özellikler Tablosu (F.S.M.Vakıf Üniversitesi 2019). ...	43
<b>Tablo 4.5:</b> Termal Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019).....	44
<b>Tablo 4.6:</b> AlSi10Mg Üretim Parametreleri (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019)44	
<b>Tablo 5.1:</b> AlSi10Mg Malzemenin Çekme Testi Sonuçları.....	49
<b>Tablo 5.2:</b> Sertlik Değerleri.....	53

## SEMBOL LİSTESİ

<b>Al</b>	:	Alüminyum
<b>Si</b>	:	Silisyum
<b>Mg</b>	:	Magnezyum
<b>Cu</b>	:	Bakır
<b>Zn</b>	:	Çinko
<b>Au</b>	:	Altın
<b>Pt</b>	:	Platin
<b>Ag</b>	:	Gümüş
<b>Fe</b>	:	Demir
<b>Mn</b>	:	Mangan
<b>Ni</b>	:	Nikel
<b>C</b>	:	Karbon
<b>Ti</b>	:	Titanyum
<b>Eİ</b>	:	Eklemeli İmalat
<b>SKİ</b>	:	Sürtünme Karıştırma İşlemi
<b>SLM</b>	:	Seçici Lazer Ergitme
<b>DMLS</b>	:	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
<b>HCF</b>	:	Yüksek Döngü Yorgunluğu
<b>UTS</b>	:	Çekme Mukavemeti
<b>DED</b>	:	Doğrudan Enerji Biriktirme
<b>PBF</b>	:	Toz Yatağı Füzyonu
<b>LBM</b>	:	Lazer Işını ile Eritme
<b>LMD</b>	:	Lazer ile Metal Biriktirme
<b>SLS</b>	:	Seçici Lazer Sinterleme
<b>FDM</b>	:	Eriyik Yığılma Modelleme
<b>EBM</b>	:	Elektron Işınılı Ergitme
<b>SDM</b>	:	Şekil Biriktirme İmalatı
<b>SLA</b>	:	Stereolitografi
<b>CAD</b>	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
<b>MATLAB:</b>		Çoklu Paradigmalı Sayısal Hesaplama Yazılımı ve Dördüncü Nesil Programlama Dili
<b>L-TYF</b>	:	Lazer Toz Yataklı Füzyon
<b>HIP</b>	:	Hidrostatikpres
<b>DLP</b>	:	Dijital Işık İşleme
<b>CDLP</b>	:	Sürekli Dijital Işık İşleme
<b>MJF</b>	:	Multi Jet Eritme Yöntemi
<b>CPA</b>	:	Elektron Işını Eritme
<b>LENS</b>	:	Lazer Toz Şekillendirme
<b>EBAM</b>	:	Elektron Işını Eklemeli İmalat

## ÖNSÖZ

Lisans eğitimim itibariyle öğrencisi olmaktan şeref duyduğum, aynı zamanda danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Gökmen ATLIHAN ve eş danışman kıymetli hocam Doç. Dr. Berkay ERGENE' ye sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamda mevcut bulunan numunenin imalatında yardımlarından dolayı F.S.M. Vakıf Üniversitesi Alüminyum Test ve Araştırma Merkezi İş Geliştirme Uzmanı Sayın Rabia YEŞİLTAS' a, numunelerin test aşamasında gerekli katkıyı sağlayan S.D.Ü. Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezine ve Sayın Öğr. Gör. Hasan ISPARTALI' ya, Samsun Üniversitesinden Sayın Dr.Öğr. Üyesi Çağın BOLAT hocama teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Birincil endüstriyel uygulamalarda çevresel kaygıların ve enerji verimliliği hedeflerinin artmasıyla birlikte, geleneksel üretim yöntemleri olan döküm, dövme, toz metalurjisi ve talaşlı imalat, geleneksel olmayan üretim metodolojilerindeki yeni gelişmeler nedeniyle daha az tercih edilmeye başlanmıştır. Bu aşamada, özellikle son on yıl içinde, eklemeli imalat (Eİ) polimer, metal ve kompozit bileşenlerin üretiminde en yaygın tekniklerden biri haline gelmiştir. Katman katman malzeme birikimi sayesinde, Eİ tabanlı stratejilerle küçük boyutlu biyomedikal parçalardan büyük ölçekli yapı sistemlerine kadar birçok uygulama gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, Eİ teknolojileri kullanıcılara hızlı prototipleme imkanı sunarak, otomotiv, havacılık, savunma ve biyomedikal gibi tasarım odaklı alanlar için kritik bir öneme sahiptir.

Hızlı uygulama yeteneği, minimum kimyasal reaksiyon riski, farklı malzeme gruplarına uyum sağlama ve yazılım sistemleriyle entegrasyon kapasitesi sayesinde, Eİ yöntemlerinin toplam kullanım miktarının yakın gelecekte artması beklenmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Eİ uygulamalarına yönelik birçok alt yöntem ve özel tanımın bulunduğu görülmektedir. Araştırmacılar, sistematik bir yaklaşım benimsemek amacıyla genellikle uluslararası ISO 52900 standardını referans almaktadır. Bu standart, Eİ ailesini süreç değişkenleri ve baskı malzemesi türlerine göre yedi farklı alt stratejiye ayırmaktadır. Polimerler ve polimer kompozitler için kaynaşık filaman üretimi, tekne fotopolimerizasyonu ve malzeme püskürtme teknikleri tercih edilirken, metalik ve seramik nesnelere için bağlayıcı püskürtme, toz yatağı füzyonu, doğrudan enerji biriktirme ve tabaka laminasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Özellikle metal parça üretiminde seçilen teknik, nihai parçaların mekanik (gerilme, basma, bükülme ve yorulma) özellikleri üzerindeki etkisi nedeniyle büyük bir öneme sahiptir. Örneğin, bağlayıcı/toz oranı, bağlayıcı püskürtme ile üretilen parçaların hassasiyetini belirleyen kritik bir faktördür. Ayrıca, büyük boyutlu parça imalatı veya onarım işlemleri doğrudan enerji biriktirme yöntemiyle kolaylıkla gerçekleştirilebilirken, toz boyutu aralığı ve ek kurulumlara bağlı olarak toz yatağı füzyon tekniği ile yüksek yüzey kalitesi elde edilebilmektedir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri, polimerler, seramikler, metaller ve alaşımlar gibi farklı malzemelerin yanı sıra bu malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilen kompozit malzemelerin üretilmesine olanak tanımaktadır.

Gül (2014), AlSi10Mg alaşımının ikincil yaşlanma sürecinin sertlik ve aşınma direnci üstündeki etkisini araştırmıştır. Al10SiMg alaşım numuneleri, T6 ısıl işlemiyle yaşlandırıldı. İkincil yaşlanma süreciyle yaşlanan numuneler yeniden yaşlandırıldı. Aşındırıcı aşınma testi sonuçları, yeniden eskitme işlemine tabi tutulan numunelerin en yüksek aşındırıcı dayanıklılığa sahip olduğunu göstermiştir.

Kahramanzade ve diğ. (2021), Eİ tekniğiyle üretilen AlSi10Mg' un yüzeyine Sürtünme Karıştırma İşlemi (SKİ) uygulamıştır. Uygulanan SKİ' in eklemeli imalatla üretilen AlSi10Mg alaşımının yapısı, sertliği ve aşınma özellikleri üzerine etkisi belirlenmiş, SKİ sonucunda eklemeli imalatla üretilen AlSi10Mg alaşımının karakteristik tabakalı yapısının karıştırma sonucu düz yapı olduğu gözlemlenmiştir. SKİ yardımıyla AlSi10Mg' un aşınma verimi, hem atmosferik hem de vakumlu ortamlarda önemli ölçüde iyileştirildi. Bununla birlikte, numunenin atmosferik ortamdaki aşınma performansının vakum ortamındakinden daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Ngnekou ve diğ. (2021) gerçekleştirdiği araştırmada, AlSi10Mg alaşımlarının hazır yüzeyleri ile zemin yüzeylerinin yorulma dayanımının karakterizasyonu ve analizi üzerine odaklanmıştır. T6 işlemi, işlenmiş yüzeylerde elde edilen sonuçlarla benzer şekilde, hazır yüzeylerin yorulma özelliklerini de iyileştirmektedir. Numunelerin oryantasyonu, hem bitmiş hem de işlenmiş malzemelerin yorulma mukavemetini etkilemiştir. Mevcut veriler ışığında, hazır malzemelerin yorulma sınırlarını, hazır yüzeylerin pürüzlülüğü ile ilişkilendirmek mümkün olmamıştır. AlSi10Mg bileşenlerinin yorulma kırılmasının kapsamlı bir şekilde tanımlanabilmesi için mikro yapı, artık gerilme ve çoklu başlangıç bölgeleri gibi unsurların daha detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerektiği ortaya konmuştur.

Varmus ve diğ. (2021), çalışmalarında AlSi10Mg alaşımları için yorulma sonuçları sunmuş ve inşaat sırasında mikro yapı ile yüzey özellikleri ve yorulma performansı arasındaki ilişkiyi bulmaya odaklanmıştır. Yorulma davranışı büyük ölçüde numunenin üretim yönüne bağlıdır. Yüzeye yakın malzeme yapısının metalografik incelemesi, önemli bağımlılıklarını ortaya çıkarmıştır.

Romano ve diğ. (2018), Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemesi için gerçekleştirilen yorulma testlerinin sonuçlarını, farklı üç süreci dikkate alarak özetlemiştir. Üretim hatalarının etkilerini göz önünde bulundurarak yorulma ömrü ve mukavemet tahmini için bir model önerilmiştir. Son iki yılda SLM sürecindeki gelişmeler, kalite ve yorulma direncinde önemli ilerlemelere yol açmıştır. Yüksek döngü yorgunluğu (HCF) bölgesindeki yorulma ömrünün tahmini için, numunenin yüzey ölçüm hacmindeki ilk kusur boyutunun dağılımını değerlendirerek deneysel değişkenliği tanımlayabilen bir model önerilmektedir. Plastisitenin etkilerinin göz ardı edilemeyeceği dikkate alındığında, kırılma mekaniğinin uygulanmasının olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Zhang ve diğ. (2018), düzenlenen bir faaliyette, SLM' de üretilen ve farklı ısıl işlemlere tabi tutulan AlSi10Mg numunelerinin yorulma özellikleri araştırılmıştır. Numuneler, gerginlik giderme, çözelti işleme ve çözelti + yapay yaşlanma gibi çeşitli işlemlerden sonra hazırlandı ve test edildi. Yapılan test sonucunda işlem görmemiş numunelerin yorulma özelliklerinin en yüksek, çözelti ile işlem görmüş numunelerin yorulma özelliklerinin en düşük olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlem numunenin yorgunluğunu azaltmıştır. Yorulma ve statik mekanik özelliklerdeki değişiklikler esas olarak mikro yapının deformasyonundan kaynaklanır. Isıl işlemle Si' un boyutu ve morfolojisi değiştirilmiş, yorulma özellikleri düşürülmüştür.

Brandão ve diğ. (2017), bu çalışmada AlSi10Mg eklemeli imalat örneklerinde yaygın olarak gözlenen yorulma özelliklerinin yüzey koşullarına ve kusur popülasyonlarına bağımlılığı gösterilmiştir. Eklemeli imalat parametresinin numunenin mikro bünyesi ve mekanik nitelikleri üstündeki tesirini anlamak için daha ileri çalışmaların yapılması gerektiği bulunmuştur. Ek olarak, yapılan testler, metal tozu yatağı bazlı Eklemeli İmalat (Eİ) endüstrisinde yaygın olarak uygulanan kontur parametrelerinin sonunda yer altı kusurlarına neden olabileceğini ve bu tür parçaların yorulma performansını azaltabileceğini güçlü bir şekilde göstermiştir.

Busisiwe ve diğ. (2019)' da gerçekleştirdikleri bir çalışmada, gerilme gevşemesinin ardından SLM ile üretilen gerilme numunelerinde farklı eksenlerde farklı mekanik özelliklerin bir göstergesi olan anizotropinin doğrulandığı belirlenmiştir. AlSi10Mg malzemesinden üretilen SLM'nin, yüklerden kaynaklanan basınca dayanabilen süneklik özelliği sayesinde stres giderildikten sonra yorulma direncine sahip olduğu gösterilmiştir. Isıl işlem sonrası AlSi10Mg SLM'nin daha fazla incelenmesi önerilmektedir, zira diğer araştırmacılar tarafından yapılan ısıl işlemlerin çoğu olumsuz sonuçlar vermiştir.

Vatansever ve diğ. (2018)' e göre T6 ısıl işleminin mikro yapı muayenesi ve mekanik testler sonucunda AlSi10Mg alaşımının mikro yapısını değiştirdiği ve buna istinaden mekanik niteliklerde iyileşmelere neden olduğu bulunmuştur. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenerek mikro yapının modifikasyonunun nedeninin  $\alpha$ -Al dendritin sınırını oluşturan asiküler ötektik silikon fazının T6 ısıl işleminin etkisiyle küresel ve poligonal hale gelmesi ve dendrit yapısının buna göre değişmesi olduğu tespit edilmiştir.

Silvestri ve diğ. (2020), AlSi10Mg malzemelerinin tanımlanması sırasında, aynı üretim teknolojisi ve koşulları altında, imalatçının önerdiği en uygun farklı ekipmanların kullanılması durumunda iş parçasının mekanik özelliklerinde farklılıklar gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Çeşitli tesisatlar da, kopma uzaması gibi değerlerin yanı sıra, son gerilme gerilmesi, akma dayanımı ve elastikiyet modülü gibi özelliklerin de kullanılan matbaaya bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, belirli bir makine kullanılarak diğerlerinden daha üstün mekanik özelliklere sahip bir ürün elde etmenin mümkün olduğu ifade edilmiştir.

Zaretsky ve diğ. (2017), AlSi10Mg alaşımından farklı yönlerde SLM yöntemiyle üretilen numuneleri ve aynı bileşimle kum döküm yöntemiyle elde edilen örnekleri, bakır darbe tertibatı kullanarak bir dizi düzlemsel darbe yüküne maruz bırakarak dinamik tepkilerini incelemişlerdir. Test sonuçları, SLM ile işlenen alaşımın dinamik tepkisinin işlem yönünden neredeyse bağımsız olduğunu göstermiştir. SLM ile üretilen alaşımın dinamik akma dayanımı, döküm alaşımının iki katı, kırılma dayanımı ise dört katı olarak bulunmuştur. Bu durum, SLM ile üretilen numunelerin daha homojen bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Kempna ve diğ. (2012), SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numuneleri ile dökme AlSi10Mg numunelerinin mekanik özelliklerini (sertlik, nihai çekme mukavemeti (UTS), uzama ve darbe enerjisi) karşılaştırmıştır. SLM örneklerinin ince mikro yapısı ve homojen dağılımı nedeniyle kopma uzamasında belirli bir anizotropi gözlemlenmiştir.

Siyambaş ve diğ. (2022), yaptıkları ortak çalışmada, SLM yöntemi ile AlSi10Mg alaşımlı malzemelerin üretiminde enerji yoğunluğunun ürün kalitesi için etkili olduğu belirlenmiştir. Katkı maddesi üretimi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların, döküm yöntemiyle üretilenlere kıyasla iyi mukavemet özellikleri gösterdiği bulunmuştur. Isıl işleme yüzey pürüzlülüğünün daha da azaltılabileceği gözlemlenmiştir.

Noriko ve diğ. (2014), proses parametrelerinin AlSi10Mg alaşımının gözenekliliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla SLM üretim örneklerinde gözeneklilik eğilimlerini analiz eden istatistiksel bir yöntem kullanmışlardır. Bu alaşım için minimum gözenek oranını belirleyen kritik bir enerji yoğunluğu noktası bulunmaktadır. Yapının yönü, AlSi10Mg'nın gerilme veya sürünme dayanımını önemli ölçüde etkilememektedir. Temadi A360'a göre daha düşük bir dayanım sergilemesine rağmen, her iki taraf da döküm A360'tan daha yüksek mukavemet göstermektedir. Kırılma yüzeyi, lokal çatlaklara yol açan önemli miktarda tozsuz tozun varlığını ortaya koymaktadır. Bu alanların iyileştirilmesinin mümkün olup olmadığını belirlemek için daha fazla incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Akbulut ve diğ. (2019), farklı yönlerden SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numunelerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çekme mukavemetinde belirgin bir eğilim gözlemlenmiş ve SLM numuneleri kopma sırasında uzama ile ilişkili bir bağımlılık sergilemiştir. Tarama stratejisi, numunenin yapısında duyarlılığı etkileyen bir boşluk tespit etmiştir. Ayrıca, gözenek boyutunun çekme özelliklerini etkilediği de kanıtlanmıştır. Malzemenin sünekliği üzerinde, gözeneklerin yoğunluğu gibi faktörlerin olumsuz etkileri olduğu ortaya konmuştur. Sonuç olarak, malzemenin özelliklerini değerlendirmek için modellenen yapının gözeneklerinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Deney sonuçları, kırılma tahmininin malzeme özelliklerine göre doğru olduğunu göstermiştir.

Aqil Azri ve diğ. (2018), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemeleri üzerinde çeşitli deneyler ve gözlemler gerçekleştirmiştir. İçyapı analizi, hem üretim sürecinde hem de T6 ısıl işlem aşamasında yapılmıştır. Alüminyum alaşımı ve silikon parçacıklarının mikro yapısının, üretim aşamasında homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak, T6 ısıl işlem uygulandığında silikon parçacıkları daha iri hale gelmekte, büyük parçacıklar küreselleşmekte ve malzeme daha sünek bir yapı kazanmaktadır. Malzeme özellikleri, her iki durumda da çekme testleri ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Isıl işlem görmüş numunelerin sünekliği, mikro yapının iyileştirilmesi sayesinde başlangıç durumuna göre neredeyse iki kat artış göstermiştir. Ayrıca, yorgunluk davranışı da incelenmiştir. Sonuç olarak, ısıl işlem uygulanmış numunelerin yorulma ömrünün önceki koşullara göre belirgin bir şekilde iyileştiği tespit edilmiştir.

Zygula ve diğ. (2018), AlSi10Mg alaşımlı döküm ve seçici lazer eritme (SLM) üzerine yaptıkları araştırma ve gözlemler sonucunda, mukavemet testlerinin AlSi10Mg sentetik dekolonizasyon ile SLM teknolojisi arasında belirgin bir fark ortaya koyduğunu ifade etmektedir. SLM malzemesi, ince mikro yapısı sayesinde döküm malzemesine göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmaktadır. Ancak, çekme testleri, belirli koşullar altında sinterlenen malzemelerin geleneksel enjekte edilen malzemelere göre önemli ölçüde daha düşük özellikler gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Güngör ve diğ. (2016)' da, gerçekleştirdikleri bir çalışmada, ısıl işlem görmemiş ve uygulanmamış numunelerin çekme testi sonuçları incelendiğinde, Mg<sub>2</sub>Si çökeltilerinin oluşumuyla birlikte Mg katkılı AlSi10Mg alaşımının maksimum çekme direnci, akma direnci ve uzama değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Tüm alaşım gruplarının çekme testi sonuçlarına dayanarak, Mg katkılı AlSi10Mg alaşımının, ilgili alaşım grubu içinde en yüksek maksimum çekme ve akma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Isıl işleme tabi tutulan AlSi10Mg alaşımının sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Mg eklenmiş AlSi10Mg alaşımında en yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

Segebade ve diğ. (2019), ortak araştırmaları sonucunda çökeltme yöntemlerine bağlı olarak anizotropik malzemelerin formasyon davranışını

belirlemek amacıyla eklemeli imalatla üretilen AlSi10Mg malzeme örneklerine çekme testleri uygulamış ve farklı anizotropi modellerini incelemişlerdir. Bir malzemenin mikro yapısının imalat sürecinden kaynaklanan gerilmelerle birlikte modellenmesi, gelecekteki çalışmalar için önemli bir adım olabilir. Uygulanan Hill 1948 anizotropi modeli, en basit örneklerden biri olarak öne çıkmakta, ancak simülasyonlar sayesinde talaş geometrisi ve talaş bölme davranışının eğilimleri de doğru bir şekilde gözlemlenebilmiştir.

Aktürk (2021), AlSi10Mg alaşımlı örnekleri, öncelikle SLM teknolojisi ile uygun geometrik parametreler kullanarak üretmiştir. Ardından, malzemenin Johnson-Cook malzeme modelini belirlemek amacıyla numunelere yarı statik ve yüksek sıcaklıkta çekme testleri uygulanmıştır.

Bu çalışmada, yatay olarak üretilen numunelerde belirgin bir açısız kayma deformasyonu gözlemlenmektedir. Diğer numunelerle kıyaslandığında, bu örneklerin kırılma yüzeyleri, tipik sünek metallerde olduğu gibi donuk ve içbükey bir yapıya sahiptir. Bu durum, sünek deformasyonla sonuçlanan serbest boşluk birleşimlerinin etkisiyle, kopmuş yüzeylerdeki küçük iç boşlukların varlığıyla da desteklenmektedir. Eğimli baskılı numunelerin yüzeyleri, büyük boyutlu gözenekler ve parlak düz alanlardan oluşan karmaşık deformasyon bölgeleri göstermektedir. Bu, sünek-baskın hibrit deformasyon tarzının bir göstergesidir ve kırılma bölgeleri, numunelerin toplam uzama kapasitesini kısıtlamaktadır. Ayrıca, bu ikili arıza mekanizmasında üretim odaklı bir boşluk eğiminin etkili olabileceği düşünülmektedir. Dikey baskılı numunelerde ise, mikro boşlukların hızlı bir şekilde kümelenmesi ve baskı boşluklarının yerel çentik etkisinin birleşimi sonucu, ana yükleme eksenine dik bir kırılma yüzeyi oluşmaktadır. Çekme eğrileri ve hasar modu analizleri birlikte incelendiğinde, yatay baskılı numunelerin süneklik, daha fazla uzama kapasitesi ve tokluk gerektiren uygulamalar için avantajlı bir konumda olduğu anlaşılmaktadır. İlginç bir şekilde, eğik ve dikey baskılı numunelerin temel çekme özellikleri büyük ölçüde benzerlik gösterse de, deformasyon davranışları farklı kırılma dinamikleri tarafından etkilenmektedir. Eğimli numunelerdeki nispeten büyük iç gözenekler, dikey numunelere kıyasla daha iyi uzama yeteneği sağlamak ve bu da üstün enerji emilimi ve tokluk özelliklerine yol açmaktadır.

## 3. GENEL BİLGİLER

### 3.1 METALLER

Yüksek elektriksel ve ısıl iletkenliğe, benzersiz bir parlaklığa sahip, kolay şekillendirilebilen, katyon oluşturma eğilimi yüksek ve genellikle bazik oksitler oluşturmak üzere oksijenle bağlanan elementlere genel olarak metal denir. Şekil 3.1’ de bazı metallerin örnekleri yer almaktadır. Metaller, değerli metaller (örneğin, altın, platin, gümüş) ve değerli olmayan metaller (örneğin, demir, alüminyum, çinko vb.) olarak iki gruba ayrılabilir. Bu durumu form açısından kategorize edebiliriz. (Durumetal kaplama 2019).



Şekil 3.1: Bazı Metallerin Görselleri (Durumetal kaplama 2019).

#### 3.1.1 Alüminyum

Alüminyum, demir ve çelikten sonra mekanik özelliklerinin üstünlüğü nedeniyle zamanımızda en çok tercih edilen 2. metaldir. Alüminyumun metal olarak

özellikleri onu genellikle kusursuz ve hesaplı bir malzeme halini kazandırmıştır. Alüminyumdan;

1. Yüksek korozyon dayanımı,
2. Geri döndürülebilirlik,
3. Parlama ve alev almazlık,
4. Uygulanan enerjiyi barındırma yeteneği,
5. Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği,
6. Çok farklı yöntemlerle yüzey işlemleri,
7. Koku ve kimyevi maddelere karşı dirençli ve sağlıklı durumlar,
8. Elverişli mekanik niteliklerle beraber düşük ağırlık,
9. Karışımlarının dirençli ve yumuşaklık açısından son derece türlü olması,
10. Magnetik nötralite,
11. Kolay işlenebilir ve biçimlendirilebilir olması,

Nedeni ile kullanımı çok hızlı yayıldı. Alüminyum 21. yüzyıla izlerini bırakmış bir metal olma özelliğine sahiptir (Matsuda 1991).

1980'li yıllardan günümüze savunma, otomotiv, inşaat, nanoteknoloji, enerji, ulaşım, uzay, ambalaj ve kaplama alanlarında milyonlarca tonda %100 geri dönüştürülebilir alüminyum kullanılmaktadır. Şekil 3.2' de Alüminyum kullanımına örnek verilmiştir (Eskier 2017).



Şekil 3.2: Alüminyum Folyonun Kullanımından Bir Örnek (Eskier 2017).

**Kimyasal ve Fiziksel özellikleri;** Alüminyum, dünyanın en bol bulunan metallere biridir. Alüminyum, yerkabuğunun yaklaşık % 8' ini oluşturur. Oksijen

ve silikondan sonra en fazla bulunan 3. kimyasal elementtir. Kimyasal sembolü "Al", atom numarası 13 ve atom ağırlığı 26.97'dir. Periyodik tablonun 3-A grubundadır. Gümüş beyazı, gri renkli ve parlaktır. Yüzey merkezli ve kübik bir örneğe haizdir. Öteki metallerle rahatça 300' ü aşkın bileşim ve karışım oluşturabilir. Tabiatta en çok bileşiğe sahip metaldir. Demirden ortalama 3 kez daha hafiftir ve neredeyse çelik kadar dayanıklıdır. Saf formu çok daha yumuşaktır. Manyetik değildir ancak şiddetli elektriksel ve termik geçirgenliğe sahiptir. Sıcak ve soğuk olarak kolayca işlenebilir, iyi çizilebilir ve inşa edilebilir. Toksik değildir, yanmaz, boyaya ihtiyaç duymadan kullanılabilir. Hava koşullarına, çeşitli kimyasal sıvılara ve gazlara, yiyeceklere karşı dayanıklıdır. Hidroklorik asit ve alkali ile çok daha aktiftir. Toz halindeki alüminyum oksijenle kaynaştığında şiddetli ısı açığa çıkar ve patlayıcı hale gelir (Eskier 2017).

**Oksit Tabakası ve Eloksal Kaplama;** Alüminyum, rutubetli havanın yüzeyinde bir pas katmanı ile kaplanır ve rengi donuktur. Bu tabaka metale çok sıkı yapışarak koruyucu bir tabaka oluşturur. Bu nedenle, atmosferik reaksiyonlara karşı büyük bir dayanıma haizdir. Bu tabaka sayesinde çok ince formdaki alüminyum bile hidrojen alevinde bile yanmaz. Hava ile uzun süreli temas halinde bozulur ve metal grileşir. Daha yüksek koruma, "elokal" ismi bahşedilen bir epilasyon tarzıyla yoğunlaştırılabilen bir katman sağlayabilir. Bu kaplama işlemine "elokal" denir. Anodize tabakanın kalınlığı, artıuç olarak uygulanan alüminyuma verilen akım değeri ile belirlenir. Tabakanın kalınlığı, alüminyumun kullanıldığı ortama ve ürüne bağlı olarak belirlenebilir. Anodikoksit kaplamalar "daldırma" ve "elektroliz" ismi bahşedilen metotlarla renklendirilebilir. Bu nedenle alüminyum numuneye istenilen estetik ve dekoratif görünüm verilebilir. Oksit tabakası alkali ortamda çözünür (Eskier 2017).



Şekil 3.3: Boksit Minerali (Eskier 2017).

**Boksit ve Alüminyum mineralleri;** Alüminyum doğada serbestçe veya temel olarak bulunmaz. Boksit, mesleki anlamda alüminyum kapsayan en önemli tomurcuktur. Dünyadaki alüminyum üretiminin neredeyse tamamı boksit cevherinden sağlanmaktadır. Zengin içerikli boksit, alüminyumun elde edildiği cevher, % 30-50 alüminyum içerir. Madeni alüminyuma ulaşmak için boksit cevherinin yaklaşık % 45 alüminyum oksit kapsaması gerekir. Boksit, kayaların dış etkilerle aşınması sonucu oluşan artık bir topraktır. Bu topraktaki bileşenlerin bazıları yüzey suyunun etkisiyle aşınır ve artan alüminyum ve demir oksit boksit tomurcukları oluşturur. Boksit cevheri, yeryüzünün üstünde veya üste yakın katmanlarında bulunur. Volkanik kayalar %50-60 glikat alüminyum içerir. Şekil 3.3' te boksit mineraline bir örnek verilmiştir.

Alüminyum metaller esas olarak gibbsit ve boehmitin boksit cevherlerinden üretilir. Alüminyum üretebilen mineral grupları alüminyum oksit ve hidroksit mineralleridir. İşlem değeri en hesaplı alüminyum bileşikler olan gibsit ve boehmit, yaklaşık %50-60 oranında alümina içerir. Diğer alüminyum içeren mineraller alümina kili, dabsonit, alnit, kiltası, kalkayaks, saprolit ve silimattır. Alüminyum bileşikler içeren mineraller turkuaz, kriyolit (buz taşı), kumtaşı, korendon ve kaolindir. Korendon bileşiği elmasın sonra en katı cisimdir. Korendon'un krom bileşiği yakuttur; kobalt, demir veya titanyum oksit karışımı safir ve akuamarin gibi değerli taşlar oluşturur. Bu taşlar, rengin tonuna ve şeffaflığına bağlı olarak değer kazanır. Zımpara taşları da korendyumdan oluşur (Eskier 2017).

## Nerelerde kullanılır?

Alüminyum metallerin, bileşiklerin ve alaşımların kullanım alanları sayılamayacak kadar çoktur. Pencerelelerden mutfaklara, uçaklardan araba egzozuna, korkuluklardan dekoratif eşyalara karşın enli bir kullanım yelpazesine haizdir. Esneklik, yumuşaklık ve dayanıklılık karakter olarak birleştirildiğinde, birçok ürün için "var olmayan Hint kumaşı" gibi bir metal haline gelmiştir. Doğrudan boksit cevherinden elde edilen ve endüstrideki geri dönüşüm uygulamalarında kullanılan alüminyum kullanılmaktadır. Hurdaları yüzde 100 geri dönüştürülebilir. Alüminyumdan çok daha ince levhalar ve teller imal edilebilir. İnsan saçından 3 kez daha cılız alüminyum folyo üretebilir. Benzer metallere kıyasla çok daha düşük maliyetlidir. Elektro kaplama ile imal edildiğinden maliyetinin % 20-40' ını elektrik oluşturmaktadır. Demirden sonra en fazla yararlanılan metaldir. En fazla yararlanılan ürün ve alanlardan bazılarını şu şekilde sayabiliriz; motor gövdeleri, jantlar, şasi, tabletler, bilgisayarlar, cep telefonları, elektronik ürünler (TV gibi), beyaz eşya, gıda ambalaj ürünleri, raflar, kablolar, yelkenler, gemiler ve pencereler (Eskier 2017).

Alüminyum, yeryüzünde en fazla karşılaşılan 3. elementtir. Metalik özelliklere sahip olan alüminyum, "doğada en bol bulunan metal" unvanını almıştır. Öte yandan, son yıllarda çelikten sonra sanayi alanlarında en fazla yararlanılan metal olduğu görülmektedir. II. Dünya savaşları ve sanayi devrimlerinden sonra imal olanağı ve geri dönüştürme ihtiyacı gibi nedenlerle artan enerji, daha hafif ve daha yüksek dirençli unsurlara ihtiyaç duyulmuştur (Eroğlu ve Şahiner 2018).

Bu nedenle alüminyum alaşımları, yüksek özgül mukavemetleri (mukavemet/yoğunluk), aşınma direnci ve korozyon direnci, ısı iletkenliği ve yüksek elektrik, rahat işlenebilirlik, dökülebilirlik ve ortam dostu olmaları nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde tercih edilmektedir. Üretilen parçaların ağırlık düşmesi ve bunun neticesinde doğan enerji bolluğu gibi faktörler nedeniyle alüminyum alaşımları diğer rakiplere göre avantaj kazanmıştır. Alüminyum 1889 yılında mutfak sektörüne adım atmış; denizcilik ve havacılık alanlarında konserve kutuları, büyük borular ve köprü inşaatında kullanılmaya başlanmıştır. 2000'li yıllarda ise motor blokları, otomotiv jantları, doğalgaz sıvılaştırma üniteleri, savunma sanayi ve zırh üretiminde tercih edilen bir malzeme haline gelerek macerasına devam etmektedir (Campbell 2003). Alüminyumun gösterdiği geri

dönüşüm avantajları, ortam dostu bir numune olması ve haiz olduğu diğer nitelikler onu geleceğin en ışıltılı malzemeleri durumuna getireceğini göstermektedir (Tarsad 2021). Alüminyum, hafif olmasına rağmen, diğer elementlerin katkılarından fiziksel olarak etkilenir. Tablo 3.1’ de % 99,995 saflıktaki Alüminyumun nitelikleri verilmiştir. Alüminyum korozyona karşı dayanıklıdır. Yüzeyinde oluşan  $Al_2O_3$  tabakası korozyona karşı direnç gösterir. Alüminyumun saflığı arttıkça korozyon dayanımı ve iletkenliği çoğalır. Soğuk yöntemle gücü büyük ölçüde artar (Eroğlu ve Şahiner 2018).

**Tablo 3.1:** % 99.995 Saflıktaki Alüminyumun Özellikleri (Eroğlu ve Şahiner 2018).

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,97 g/mol
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik (YMK)
Yoğunluğu	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Ergime noktası	660 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150 °C - 300 °C
Buharlaşma noktası	2450 °C
Özgül ısısı	0,224 cal/g (100 °C)
Elastisite modülü	72x10 <sup>3</sup> MPa
Poisson oranı	0,33
Kayma modülü	27x10 <sup>3</sup> MPa
Çekme mukavemeti	40-90 MPa
Akma mukavemeti	10-30 MPa
Kopma uzaması	% 30-40

### 3.1.2 Silisyum

Silikon, dünyada en bol bulunan 2. elementtir. Metal ve metal olmayan bozunma arasında yarı metalik bir elementtir. Kimyasal bir davranış olarak metallere benzer. Kırılgan, yarı iletken ve pozitifdir. Sıcaklık açısından metallere zıt özelliklere sahiptir. Sıcaklık yükseldiğinde iletkenlik artar, metallere ise sıcaklık yükseldiğinde iletkenlik azalır. Silikon çeşitli alaşımlarda kullanılır. Örneğin çelik, bronz ve pirinç gibi metallere sahip alaşımlar birçok ürünün hammaddesidir (Eskier 2017).

**Özellikleri;** Silikon, 'Si' kısaltmasıyla sembolize edilen kimyasal bir elementtir ve atom numarası 14'tür. Mavi-gri madeni ışıltıya haiz sert, nazik ve kristalimsi bir katıdır. 4 Değerlik elektronuna sahiptir ve yarı iletken özellikler sergiler. Tepki vermeye pek meyilli değil. Jöns Jakob Berzelius, 1823'te ilk kez silikону saf halde hazırlayıp karakterize edebildi. Silikonun oksijenlere aksiyonu neticesinde oluşan oksitler, silikatlar olarak tanınan bir anyon familyası oluşturdu.

Sırasıyla 1414 °C ve 3265 °C' nin erime ve kaynama noktaları, bordan sonra bütün metaloidler ve ametaller arasında en fazla sıcaklıklar olarak tanınmaktadır.

Silikon, evrende kütlece en yaygın 8. elementtir ancak Dünya'da nadiren saf haliyle bulunur. Bununla birlikte, yeryüzünün %90' ını aşkın silikat bileşiklerinden oluşur ve bu da silikonu oksijeni takiben Dünya'da en fazla elde edilen ikinci element halini alır. (kütlece %28) Silikon saf bir elementtir, her sene yaklaşık %3'ü biriken yüzey suyuna 240 teramol biyogenik silikon eklenir (Treguer ve diğ. 2006).

**Bulunma sıklığı ve üretimi;** Hidrojen, karbon, azot, oksijen, neon ve helyumdan sonra kâinata en bol bulunan 7. elementtir. Kütle bakımından yer kabuğunun %27,2'sini oluşturur. Bu özelliğinden dolayı yer kabuğunun kütlelerinin yaklaşık %45,5'ini oluşturan oksijeni takiben ikinci sırayı alır. Dünya kitlesinin %31,5' ini kapsayan çekirdek,  $FE_{25}Ni_{2}CO_{0}$ ,  $1S_{3}$  bileşiği ile temsil edilir (Treguer ve diğ. 2006).

### **Uygulama ve Kullanım Alanları**

**Bileşiklerde;** Birçok silikon, saflaştırılmadan veya işlenmeden endüstriyel olarak çok küçük miktarlarda kullanılır. Silikat, inşaat harcı, modern sıva, silis kumu ve çakıl yapımında kullanılır (Greenwood 1997).

**Alaşımelerde;** İnce malzemelerin döküm performansını iyileştirmek ve havaya rastladığında sementit doğuşunu engellemek için erimiş dökme demire ferrosilikon veya silikokalsiyum alaşımlı doğal silikon ilave edilir. Erimiş demirde doğal silikonun varoluşu bir oksijen havuzu görevi görür. Bu nedenle hemen hemen tüm çelik türleri için denetim altında olması zorunlu karbon payı istenildiği ölçüde sınırlandırılabilir. Ferrosilikon imali ve kullanımı çelik sanayisinin en dikkate değer örneklerindedir. Bu şekilde faydalanılan silikon esas olarak saf değildir ancak dünyada genellikle silikon kullanımının %80' ini teşkil eder. Silikon, çeliğin direncini ve ferroman yetik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği için iletken çeliğin ciddi bir elemanı olarak da bilinir.

### 3.1.3 Magnezyum

Magnezyum dünyada en çok bulunan elementlerdendir ve bu niteliğinden dolayı yer kabuğunda en bol bulunan 8. element ve 6. metaldir. Beyaz renk gümüş, yapısal amaçlı kullanılabilir en hafif metaldir. Düşük yoğunluğu nedeniyle hafif ve sağlam yapıda ciddi üstünlük gösterebilir. Saf magnezyum korozyona karşı yüksek dirence sahiptir. Demir, bakır, nikel vb. içeriğinde bulunabilir. Metal korozyon direncini zayıflatır. Genellikle alüminyum, manganez, çinko vb. metal ile yüksek mukavemet-ağırlık oranı alaşımı olarak kullanılır. Magnezyumun sıcaklık değişimlerinde boyutsal kararlılık, iyi sönümleme titreşimi vb. gibi birçok avantajı vardır, işlemden sonra çok temiz ve pürüzsüz bir yüzey bırakır. Magnezyum, alüminyum ve bakır içeren alaşımlar açısından gemi deniz mühendisliği alanında uzun yıllardır büyük önem taşımaktadır (Kawamura 2013).

**Kimyasal özellikleri;** Kimyasal sembolü "Mg" olan magnezyumun atom numarası 12 ve atom ağırlığı 24.305'tir. Erime noktası 650<sup>0</sup> iken kaynama noktası 1090<sup>0</sup> dir. Alkali metal grubunda katı ve gümüş-beyaz renktedir. Alüminyumun 3 katı yoğunluğa sahiptir. En hafif metaller arasında iyidir. Kristal yapı altıgendir. Toz magnezyum havada rahatça ve parlak ışıkta yanabilir. Doğadaki en zengin 8. elementtir. Doğası gereği saf değildir. Yeryüzündeki bileşiklerin aşağı yukarı %3' ünü magnezyum kapsar. Magnezit ve dolomit benzeri bileşikler magnezyumun ana kaynaklarıdır. En iri magnezyum kökeni deniz suyudur. Bileşik kayalar ile asbest (magnezyum hidro-silikat) da magnezyum kaynaklarıdır. Manyezit, doğada yaygın olarak bulunan bir magnezyum karbonat bileşiğidir. Karnelit, keyserit, kainit ve polihalit, magnezyum dâhil diğer minerallerdir (Eskier 2017).

**Kullanım alanları;** Magnezyum, tıptan sanayiye çok yaygın bir alanda faydalanılan kayda değer elementtir. Hafifliği nedeniyle sektördeki birçok ürün tarafından tercih edilmektedir. Genellikle alaşım ajanı olarak diğer metallerle birlikte kullanılır. Magnezyum-alüminyum alaşımı, uçak, füze ve roket gövdelerinin hafiflik için güçlü ve hafif malzemeler gerektirdiği bölümlerde kullanılır. Magnezyum, kükürt' ü erimiş demir ve çelikten arındırmak için kullanılır. İlk uranyum olmak üzere türlü metallerin tuzdan arındırma işleminde ve dökme demir üretiminde kayda değer maddedir. Titanyum, uranyum, berilyum ve zirkonyum benzeri metallerin

imalatında indirgeyici bir role sahiptir. Bu, otomotiv sektörünün de vazgeçemediği ana metallere biridir. Magnezyum, sanayide çeşitli karışımlar halinde kullanılan birçok sektörde ve üründe yer almaktadır. Bu ürünler arasında otomotiv koltukları, havai fişekler, elektrikli ev aletleri, laptoplar, kameralar, boya, plastik, tuğla, hayvan yemi, gübre, fotoğraf flaşı, at nalı, beysbol sopası, kar ayakkabısı, mürekkep, ilaç, yüksek fırın, kâğıt, kibrit, uçak inişi dişli ve motor parçaları gibi örnekler bulunmaktadır (Eskier 2017).

## **3.2 ALAŞIMLAR**

En az iki metalin, kimileyin karbon ve metaller gibi metal olmayanların birleştirilmesiyle elde edilen metal özelliklerine sahip maddeye metal özelliklerine sahip madde denir. Bir alaşımı saf bir malzemeden ayrıştıran en dikkate değer özelliklerden biri, saf bir metal gibi tek bir sıcaklıkta katılaşmaması veya erimemesidir. Tüm metaller tek bir sıcaklıkta katılaşır veya erir. Alaşımın katılaşması ve yavaşlaması 2 sıcaklık değeri arasında bir yerde meydana gelir. Alaşım, malzemelerin fiziksel ve mekanik niteliklerini değiştirerek daha elverişli malzemeler imal etmek ve malzemelerin maliyetini düşürmek gibi nedenlerle esastır (İsgor 2019).

### **3.2.1 Alüminyum Alaşımları**

Asıl metali alüminyumdan ibaret karışımlara alüminyum karışımları veya hafif alaşımlar da denir. Silikon, bakır, manganez, çinko, magnezyum, titanyum, nikel ve demir gibi elementlerin eklenmesiyle oluşurlar. Özellikleri hafif olmaları, ısı ve elektriksel iletkenlikleri, ısı işlem için elverişli olmaları, birtakım kimyasal etkilere karşı dirençli olmaları, alüminyum alaşımlarının döküm için uygun olmalarıdır. Alaşımın avantajları arasında; Alaşımın özellikleri katkı maddesine göre sınırsız hız da değiştirilebilmekte ve düşük hacimli çekim, düşük erime sıcaklığı, yüksek akışkanlık gibi özellikler numaralandırılmaktadır. Şekil 3.4' de alüminyum alaşımlarına dair bir örnek verilmiştir (Arslan 2016).



Şekil 3.4: Alüminyum Alaşımları (Arslan 2016).

### **Alüminyum alaşımlarının genel özellikleri;**

1. Alüminyum hafif olmakla beraber yoğunluğu çeliğin üçte biridir.
2. Alüminyum karışımları, standart yapı çeliklerinin dayanımına eşit veya daha fazla dirence haiz olabilirler.
3. Alüminyum havaya, gıdalara ve gündelik hayatta faydalanılan sayısız sıvı ve gazı karşı dayanıklıdır.
4. Aşırı yansıtma niteliğine haizdir. Gümüşümsü üstüyle birlikte bu nitelik alüminyuma, iç ve dış mimari çalışmalara elverişli dekoratif nitelikler kazandırır.
5. Alüminyum, darbe yüküne sunulan birtakım yapısal elemanlarda ölçümlenen, yüksek elastik niteliğe haizdir. Sağlamlığı sayısız ticari çeliklerde görüldüğü üzere, düşük sıcaklıklarda apaçık azalmaz.
6. Alüminyum kolay işlenir ve şekillendirilebilir. Örnek olarak gösterilecek olursa, 0,01 mm kalınlığından daha ince folyo hali kazandırılabilir.
7. Alüminyumun, bakır kadar elektrik ve ısı iletkenliği vardır.

### **Dezavantajlı Kötü özellikleri:**

1. Zayıf direnç ve akma sınırı,
2. Bazı tabiatlı cisimlere karşı zayıflık,
3. Kaynak ve lehimleme yeteneği sadece dekapan ve ayrıcalıklı yöntemlerle mümkün olabilir.

Alüminyum, yüzeyinde havanın teması ile birlikte kendiliğinden oluşan lakın yoğun bir oksit tabakası ( $Al_2O_3$ ) teşkil eder. Bu katman alüminyumu öteki etkilerden

muhafaza eder. Demek ki alüminyumun bu maddelere karşı mukavemeti düşüktür (Şendeniz 2006).

### **3.2.2 Alüminyum Döküm Alaşımlar**

Alüminyum gümüş rengindedir ve sünek bir malzemedir. İşlenebilirliği ve yüzey kalitesi iyidir, özgül ağırlığı, gaz çözünürlüğü düşüktür ve çok mükemmel dökülebilirliğe sahiptir. Alüminyum döküm karışımlarının mekanik niteliklerinin dövme karışımlardan ileride olduğu ve gruptaki bazı alaşımların ısıtılma işlemiyle kusursuz mekanik niteliklere haiz olduğu anlaşılmaktadır. AlSi10Mg, esas olarak basınçlı dökümde kullanılan bir alaşımdır. DMLS de kullanılan AlSi10Mg tozu, dökümde kullanılan A360 alaşımına benzer bir kimyasal bileşime sahiptir. Kimyasal olarak ötektik bileşime yakınlığı nedeniyle yüksek akışkanlığa ve düşük katılaşma direncine sahiptir. Yüksek geri dönüşüm değerine haizdir. Bu nedenle AlSi10Mg, DMLS yöntemi için uygundur (Polmear 1981).

### **Alüminyum Döküm Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları**

Döküm, sıvı metalin yer çekimi ile veya basınç altında şekillenen bir kalıp boşluğuna doldurulduğu ve katılaştığı bir üretim yöntemidir (Yurdakul ve Tansel 2016).

Döküm yönteminin başlıca avantajları şunlardır: yaygın bir alana hitap eder. Çok küçük parçalar ve ton ağırlığındaki parçalar üretilebilir. Karmaşık şekillerin, özellikle farklı malzemelerin iç yapısının imalatı kolayca gerçekleştirilebilir. Tüm alaşımlar dökülebilir. Dökme demir bu şekilde üretilir. Seri üretimde avantajlıdır.

Döküm yönteminin dezavantajı, çok ince kesitler üretmenin zor ve bazen imkansız olmasıdır. Az sayıda değil, çok sayıda parçanın üretimi için ekonomiktir. Başka bir şekilde üretilmeyen ürünler için gerekli olabilir. Direnci artar ancak diğer yöntemlerden dezavantajlıdır (Aran 2007).

### 3.3 EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat yöntemleri; tasarımda esneklik ve birden fazla malzemeden parça üretmenizi sağlayan bir üretim tarzıdır. Havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma ve enerji sektörüne benzer dalların önemli sanayi alanlarında kullanılmaktadır. Ek üretim yöntemleri, malzeme biriktirerek tabaka ve parça oluşturma prensibi bakımından farklı bir yaklaşımı temsil etmektedir. Eİ, geleneksel metotlarla imal edilemeyen karmaşık geometrilere sahip fonksiyonel, hafif ve daha ekonomik bileşenlerin üretilmesini sağlar. Tablo 3.2' de işlem çeşidine göre eklemeli imalat teknolojileri verilmiştir (Özsolak 2019).

**Tablo 3.2:** İşlem Çeşidine Göre Eklemeli İmalat Teknolojileri (Özsolak 2019).

Eİ'ta işlem sınıflandırması	Açıklama	Teknolojiler	Materyaller
Toz yatağı füzyonu	Toz yatağında seçili bölgelerin ısı ile birleştirilmesi	SLS, EBM, DMLS, SHS	Metaller ve polimerler
Doğrudan enerji biriktirme	Eriyik malzemenin ısı enerjisi ile birleştirilmesi	LMD, DMD	Metaller
Malzeme yığma	Eriyik malzemenin nozül aracılığıyla 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

### 3.3.1 Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler

Eİ teknolojisinde, üretim sistemini belirleyen temel ölçü, üretilecek malzemedir. Belirli bir eklemeli imalat prosesine uygun bir formda hammadde üretme kabiliyeti, malzemelerin Eİ ile uygun şekilde işlenmesi, malzemenin istenilen şekli, formun işleme kapasitesi ve malzemenin performans özellikleri, Eİ teknolojisinde kullanılmak üzere düşünülen önlemlerdir. Katkı üretimi için başta metal, polimer ve seramik olmak üzere üç tip malzeme kullanılabilir. Malzeme toz, kâğıt, sıvı reçine, levha ve tel şeklindedir (Bourell ve diğ. 2017).

#### 3.3.1.1 Metaller ve Alaşımlar

Metallerin katkı maddesi üretimi son yıllarda mükemmel bir gelişme süreci göstermiştir. Bu teknoloji esas olarak havacılık endüstrisindeki araştırma, modelleme veya ileri uygulamalar için kullanılır. Otomotiv, biyomedikal ve savunma sanayilerinde de kullanılmaktadır (Wohlers 2019).

Metallerin ilave üretimi, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla özel bağlantılara sahip karmaşık şekillerin imalatı için büyük muafiyet kazanır. Özellikle koruma mühendisliği, yalıtım ve inşaat sorunlarına aynı anda çözüm üretmek için çok işlevli bileşenler geliştirilebilir. Tipik olarak, 3D baskı metalleri işleme, elektronlar ve lazer ışınları gibi enerji kaynaklarını kullanarak metal hammaddelerinin eritilmesinden oluşur. Erimiş numune, katı bir parça yaratmak için bir tabakaya dönüştürülür. Metal baskıda en fazla tercih edilen teknikler doğrudan enerji biriktirme (DED) ve toz yatağı füzyonudur (PBF). Bu işlemler daha fazla doğruluk veya hız kazandırabilir. Paslanmaz çelik ve takım çeliği, bazı alüminyum karışımları, titanyum karışımları ve nikel bazlı karışımlara benzer birçok metal malzeme, PBF' ye dayalı Eİ işleme kullanılarak üretilebilir. PBF teknolojisi, iyi mekanik niteliklere ve kompleks şekillere haiz bileşenleri yüksek titizlikle üretme yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, bu teknolojiler çok yavaştır ve bu nedenle esas olarak küçük parçalar için kullanılır. Titanyum karışımları, çelik karışımları, bazı alüminyum karışımları, nikel karışımları ve bazı kobalt bazlı ve magnezyum karışımları Eİ için optimize edilmiştir (Herzog ve diğ. 2016).

Özellikle titanyum ve alaşımları, değişik sanayi alanlarında geniş olarak kullanılan yüksek kazançlı malzemelerdir. Geleneksel üretim yöntemlerinin yüksek işleme maliyeti ve uzun teslim süresi ile nitelendirilirler. Bu nedenle, Eİ daha düşük maliyetle oldukça karmaşık yapılar üreterek önemli ekonomik faydalar sağlayabilir. Ti ve Ti6Al4V şu anda özellikle biyomedikal ve havacılık alanlarında ticari uygulamalar için kullanılmaktadır. Başlıca avantajları çok işlevli optimizasyon, azaltılmış malzeme israfı, ağırlık özelleştirmesi, daha az montaj parçası ve hasarlı veya aşınmış metal parçaları onarma yeteneğidir. Bunun dışında sınırlı alaşım seçenekleri, boyutsal hatalar ve düşük yüzey kalitesi ve tel erozyon, ısıl işlem vb. vardır. En büyük dezavantaj, bitirme işlemine duyulan ihtiyaçtır. Tablo 3.3’ de Eİ yöntemlerinde en sık kullanılan metaller gösterilmiştir.

**Tablo 3.3:** Eklemeli İmalatta En Çok Kullanılan Metaller (Ngo ve diğ. 2018).

<b>Metaller</b>	<b>Malzemeler</b>
Alüminyum Alaşımlar	AlSi10Mg, AlSi12, AlSi7Mg
Kobalt Bazlı Alaşımlar	CoCrWC, ASTM F75
Titanyum Alaşımlar	Titanium Grade 2, TiAl6Nb7, Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI
Nikel Bazlı Alaşımlar	Inconel 625, Hastelloy X, Inconel 738, Inconel 713, Inconel 718
Paslanmaz Çelikler	SS 304, SS 316 L, SS 410, SS 440, 15-5 PH, 17-4 PH
Takım Çelikleri	H13, AISI 420, AISI D2, Marage 300, AISI A2 / AISI S7
Değerli Metal Alaşımları	Altın, Gümüş
Bakır Alaşımları	CC 480 K

### 3.3.1.2 Polimerler ve Kompozitler

Polimerler, geniş yelpazeye sahip ve farklı 3D baskı yöntemlerine kolay uyarlanabilirliği sebebiyle 3D baskı sanayiinde en yaygın malzeme olarak onaylanır. Eİ üretimi için polimerler, reaktif monomerler ve termoplastik filamentler toz veya reçine formunda mevcuttur. Polimer ve kompozitlerin 3D baskısını kullanabilme özelliği ile sanat, mimarlık, tekstil, havacılık, ilaç ve oyuncak imalatı gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılabilir. 3D baskı kullanılarak kompozit malzemelerin

üretimi, geometrik doğruluk, kompleks yapıların imal edilebilirliği ve kişiselleştirme gibi üstünlüklere haizdir. Ek olarak, bu işlem özelleştirilmiş malzemeler için ekstrüzyon ve kalıplama gibi diğer geleneksel şekillendirme yöntemlerinden daha uygun maliyetlidir. Öte yandan, 3D yazıcılarla üretilen saf polimer ürünler, sıcaklığa ve yüke dayanım eksikliği nedeniyle yalnızca kavramsal modeller için kullanılmaktadır. 3D baskılı polimerlerin düşük mekanik özelliklerini çözmeyi amaçlayan araştırmalar daha iyi verime haiz gelişmiş polimer kompozitlerin imalatı için türlü aşamaların ve malzemelerin geliştirilmesine yol açmaktadır.

Hızlı modelleme, düşük maliyet, ağırlık optimizasyonu, üretim kolaylığı ve karmaşık yapının başlıca avantajlarıdır. Ayrıca sınırlı polimerler, donatı seçimi, anizotropi gibi zayıf mekanik özellikler dezavantajlarıdır (Takezawa ve Kobashi 2017).

### **3.3.1.3 Seramikler**

Seramikler; Metaller ve polimerler ile karşılaştırıldığında, seramik numunelerin mekanik sertlikleri ve özelliklerinden dolayı kırılabilirlikleri nedeniyle geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi çok zordur. Geometrik özgürlük, esnek üretim ve düşük maliyet gibi Eİ teknolojisinin kalitesi nedeniyle seramikler için çok uygun hale geliyor. Seramik katkılı üretim, seramik malzemelerin 3B nesnelere üretmek için sürekli bir tabakada bırakıldığı bir üretim sürecidir. 3D baskı aynı zamanda hızlı modelleme için harika bir araçtır çünkü belirli geometrilerin tasarımını hızlı bir şekilde değiştirmenize imkân sunar. Ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel imalat teknolojileri, süreçleri yeni tasarımlara taşımak için daha uzun teslim süreleri gerektirir ve genellikle yeni araçlara yatırım gerektirir. Toz bazlı katkı maddesi üretim yönteminde, yazdırılan nesne toz yatağı tarafından kendi kendine desteklenir ve destekleyici yapının 3B modele eklenmesi gerekmez. Baskı işlemi tamamlandığında, bağlanmamış toz çıkarılır, böylelikle işlemden defalarca kullanılabilir. Kullanılmayan tozun fazlasıyla düşük kayıplarla geri dönüştürülebilmesi önemlidir (Travitzky ve diğ. 2014).

Biyomedikal, otomotiv, kimya ve havacılık endüstrileri seramik malzemelerin ana kullanım alanlarıdır. Düşük üretim süresi, insan vücudu organları

için kompleks yapı ve iskele baskısı, kafes yapısının gözenekliliğinin kontrolü, bileşimin ve mikro yapının daha iyi kontrolü bu malzemelerin başlıca avantajlarıdır. Ayrıca uygun seramik türlerinin sınırlı bulunması, düşük yüzey kalitesi, sinterleme gibi işleme ihtiyacı ve imalat sonrası boyutsal hata dikkate alınması gereken dezavantajlarıdır.

#### **3.3.1.4 Eklemeli İmalatta Kullanılan Toz Malzemeler**

Geleneksel üretim yöntemlerinin tersine, eklemeli imalat, bir ürünün ana malzemesinin katmanlar halinde bir araya getirilmesine dayanır. (Emmelman ve diğ. 2013).

Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan malzemeler toz veya tel biçimindedir ve odaklanmış ısı kaynakları yoluyla seçici olarak eritilmiş malzemelerin senkron yapıştırma ve katılma işlemleri için hammadde olarak kullanılır (Carroll ve diğ. 2015).

Alüminyum, titanyum ve çelik benzeri birtakım malzemeler için güvenilir ve yoğun bileşenler, eklemeli imalat geliştirme teknolojisi yöntemiyle üretilebilir (Murr ve diğ. 2012).

Katkı maddesi üretim süreçlerinde kullanılan metal tozlarının çoğu, genellikle metal tozlarının üretimi için iyi bilinen tekniklerden faydalanılarak imal edilir. Bu metotlar su, gaz veya plazma atomizasyonudur. Ekseriyetle, Eİ işleminde, tozun homojen bir şekilde yayılmasını sağlamak için iyi akışkanlık gerekir ve yüksek bağl yoğunlukta bir toz tabakası oluşturmak için iyi paketleme özellikleri kullanılır. Tozun kalitesi, üretilen parçaların yoğunluğu ve gözenekliliği gibi kalitesini etkiler. En kolay ve en uygun maliyetli atomizasyon işlemi su atomizasyonudur. Eİ yönteminde kullanılan malzemelerin kalitesi, son parçanın özelliklerini etkiler (Nandan ve diğ. 2008).

### **3.3.1.5 Alüminyum Alaşımaları**

Bir Eİ için mevcut olan farklı Alaşımalarının sayısının oldukça sınırlı olmasının sebebi, titanyuma benzer olmayan alüminyumun işlenebilirliğinin kolay olması ve Al malzemelerinin maliyetinin belirgin oranla düşük olmasından kaynaklıdır.

Çok farklı buhar basınçlarına sahip alaşım elementlerinin vakum koşullarında yüksek oranda buharlaştığı bilinmektedir. Ek olarak; AL, Eİ üretilen Al bileşenlerine bir başka engel olarak görülebilen Lazer Işını ile Eritme (LBM) ve Lazer ile Metal Biriktirmeye (LMD) uygulanan lazer dalga boylarına yüksek bir yansımaya sahiptir. Erimiş Al' un düşük viskozitesi, alüminyumun katkı maddesi üretimini küçük bir eriyik havuzu boyutuyla sınırlayan ve LBM' nin LMD' den ileride olduğunu kanıtlayan farklı bir sorundur. Eİ kullanarak bileşenin üretilmesi için daha avantajlı bir açıdan, Al' un yüksek ısı iletkenliği, termal olarak indüklenen gerilimi azaltır, böylece bir destek yapısına olan ihtiyacı azaltır. Ek olarak, yüksek ısı iletkenliği, 10 aylık daha yüksek bir işlem hızına izin verir (Brice ve diğ. 2015).

### **3.3.2 Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları**

#### **3.3.2.1 Avantajları**

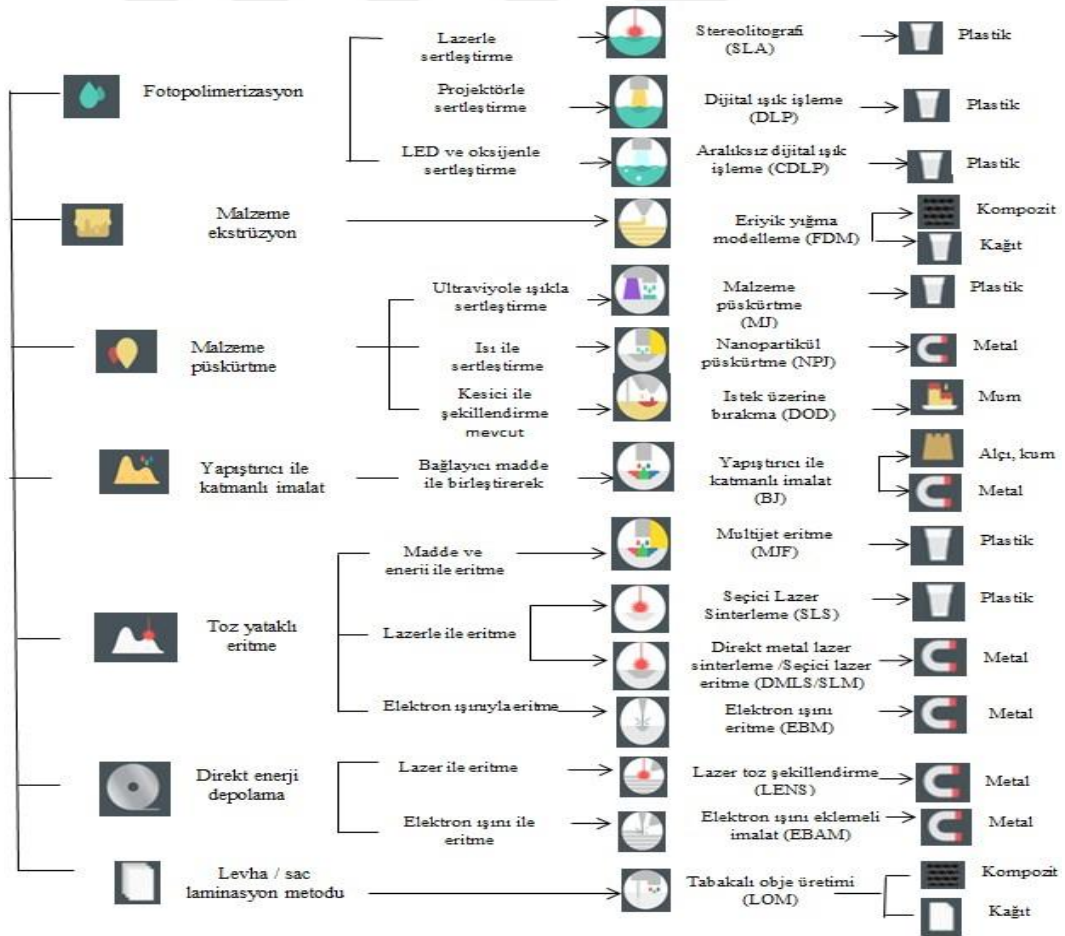
Değişen ürün yelpazesine sahip üreticiler için imalat yatırım maliyetlerini hızla azaltmak mümkün ve kalıp maliyeti de bulunmamaktadır. Bu durum, kişiye özel üretimin önünü açmaktadır. Çok karmaşık şekiller üretilmekte ve geleneksel yöntemlere göre montaj işlemlerinin sayısı azaltılmaktadır. Prototiplerin üretim süresini önemli ölçüde kısaltarak ürün geliştirme süreçlerini hızlandırıyoruz. İşleme için kalifiye personel gereksinimi bulursa da, tabakalı üretim için genellikle nitelikli üretim personeline ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca, bu yöntem, işleme yöntemine kıyasla daha az malzeme israfı yaratmaktadır. Renkli malzemelerin üretimine olanak tanıyarak, parçaların yeniden boyanması sorununu ortadan kaldırmaktadır (Ngo ve diğ. 2018).

### 3.3.2.2 Dezavantajları

Birçok teknolojinin üretim hızı hala düşüktür. Kullanılan güç kaynağına bağlı olarak maliyet oldukça yüksek olabilir. Üretim aşamasının dışında, mekanik tasarım, uzman eksikliğine yol açabilecek malzeme ve süreçler hakkında bilgi gerektirir. Üretimden sonra yüzey pürüzlülüğü, iç gerilme ve iç boşluklar benzeri problemler oluşabileceğinden ilave yöntemler gerekebilir. Aşırı çalışmadan sonra bile mekanik özellikler ihtiyaçları karşılamayabilir (Ngo ve diğ. 2018).

### 3.3.3 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması Şekil 3.5’ te verilmiştir.



Şekil 3.5: Eklemeli İmalatın ASTM F42 Standardına Göre Sınıflandırılması (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies 2012).

Eklemeli imalat yönteminin uygulanmasında kullanılan en yaygın tekniğin fotolitografi yöntemi olduğu görülmektedir. Bu yöntem yüksek hassasiyetli ve renkli parçalar üretebilir. Bununla birlikte, üretilen parçalar bozulma ve büzölmeye sahip olabilir. Seçici lazer sinterleme (SLS), elektron ışınli ergitme (EBM), eriyik yığıma modelleme (FDM) ve şekil biriktirme imalatı (SDM) teknolojileri, yüksek mukavemetli parçalar üretilirken tercih edilir, özellikle SDM, SLS ve EBM teknolojileri metal parçaların imalatına izin verir. SDM, Stereolitografi (SLA), EBM, FDM ve SLS sistemleri fonksiyonel komponent üretiminde avantaj sağlamaktadır (Çelik ve diğ. 2013).

DMLS yönteminin işlem süresi ve proses analizi üzerine yapılan çalışmada, tüm üretim aşamaları ve her türlü maliyetin hesaplamaya dahil edilmesiyle hasar oluşumunun sıcaklık dağılım etkisi, mevcut denklem, genel maliyet ve proses formülü türetilmiştir. Geliştirilen numuneler ve elde edilen sonuçlar, DMLS de üretilecek parça üreticileri tarafından üretim süresi, verimlilik ve hataların giderilmesi için yapılması gerekenler açısından sanayileşme olasılığını ve bulunabilirliğini artırmaktadır (Kayacan ve diğ. 2019).

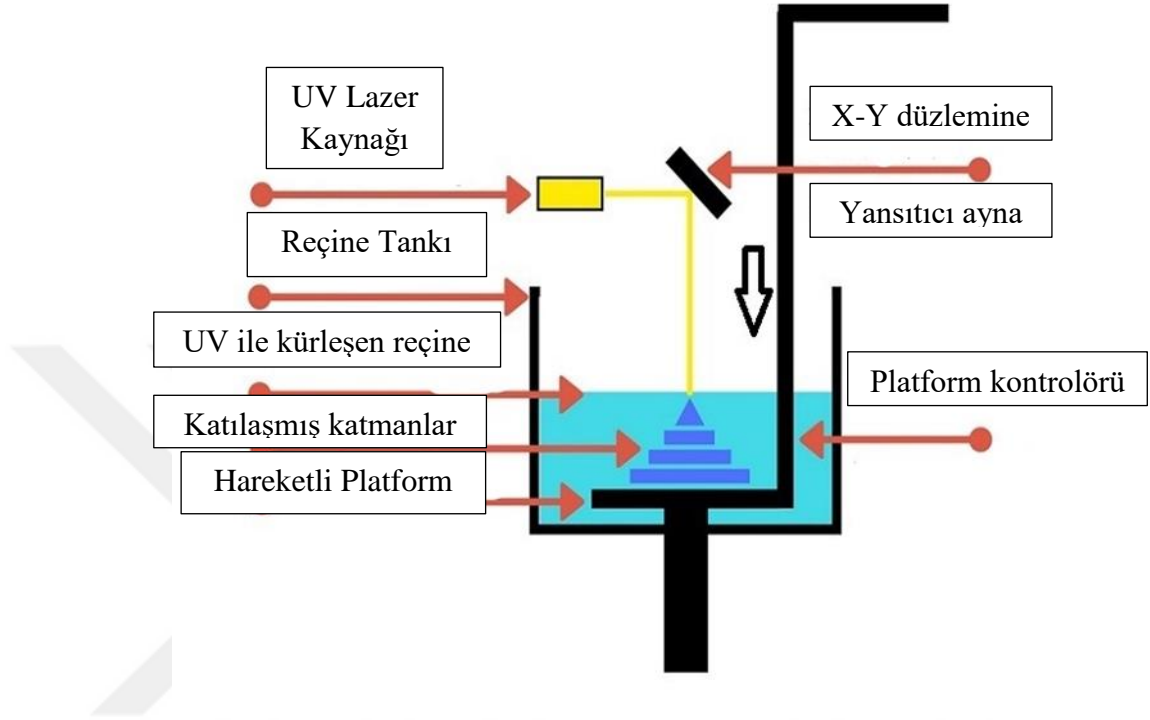
### **3.3.3.1 Fotopolomorizasyon Yöntemi**

Doğrusal veya çapraz bağlı yapıda bir polimer elde etmek üzere bir polimerizasyon reaksiyonunu başlatmak ve ilerletmek için ışık (görünür veya ultraviyole; UV) kullanan polimerizasyon tekniğine fotopolimerizasyon denir. Farklı bir bakışla monomerin ışık altında polimerleşerek polimer oluşturmasını sağlayan bir polimerizasyon metodudur. Fotopolimerizasyon metodu ekonomik olarak uygun olduğu için tercih sebebidir (Berkel 2023). Kirişte, esas olarak ultraviyole ışıkta katılaşılabilen polimer malzemelerin kullanımına dayanır (Duman ve Kayacan 2016).

#### **3.3.3.1.1 Stereolitografi (SLA)**

Stereolitografi teknolojisinde, ultraviyole (Ultraviyole-UV) radyasyonla katılaşılan reçineler tarafından 3B nesnel oluşturulur. Şekil 3.6' da görüldüğü gibi, lazer kaynağından yayılan ultraviyole radyasyon, üretilecek tabakanın kesit

görüntüsüne göre aynadan yansıtılarak reçine tabakasını katılaştırmak için reçine yüzeyi taranır. İlk tabaka katılaştıktan sonra, hareketli platform tabakanın derinliğine iner ve bir sonraki tabakanın sertleşme süreci başlar (Gibson ve diğ. 2010).



Şekil 3.6: Stereolitografi Çalışma Prensibi (Gibson ve diğ. 2010).

### 3.3.3.1.2 Dijital Işık İşleme (DLP)

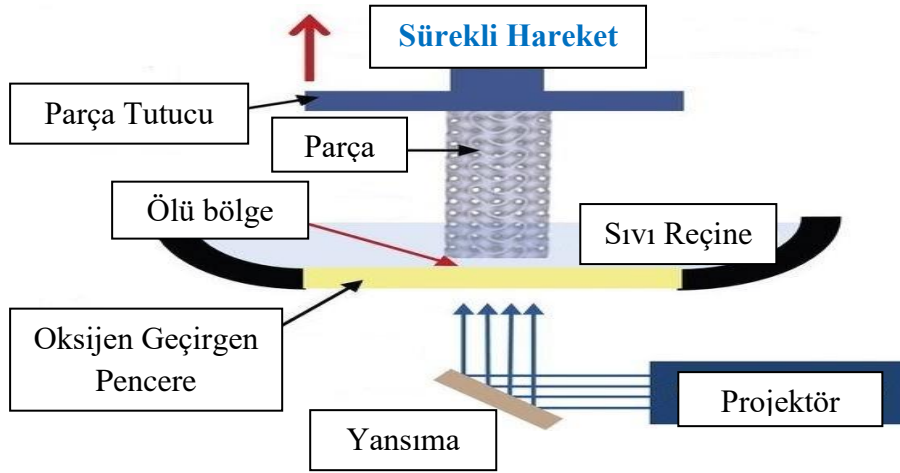
Dijital optik işleme teknolojisi ile fotolitografi birbirine benzer. Üç boyutlu modellemede, lazer ışını sıkıca katılaştır ve dijital ışık işlemede, 2B düzlem katılaşmak için bir projektör ile UV ile taranır.

DLP, stereolitografi teknolojisinden daha seri hale getirilmiştir. Bununla birlikte, stereo litografi teknolojisi derece cinsinden katılaşma gerçekleştirdiğinden, dijital optik işlemden daha yüksek çözünürlükte katılaşma gerçekleştirir. Dijital ışık işleme daha hızlı ancak daha düşük çözünürlük için kullanılırken, stereolitografi daha hızlı ve daha keskin şekiller için kullanılır.

Fotolitografi teknolojisinde kullanılan UV lazer ışık kaynakları, UV projektörlerden daha pahalıdır. Dijital optik işlemede, projektörler tipik olarak aşağıdan yukarıya katılaşma gerçekleştirir (Tumbleston ve diğ. 2015).

### 3.3.3.1.3 Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP)

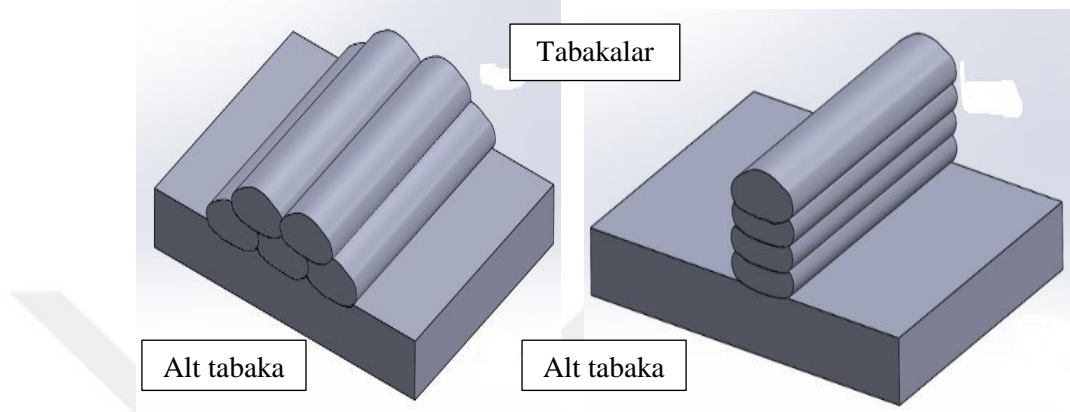
Seri üretim için sürekli dijital ışık işleme teknolojisi geliştirilmiştir. Bu teknik aynı zamanda sürekli sıvı ara yüz üretimi olarak da bilinir. Tıpkı dijital işleme gibi, UV ışığının projeksiyondan çıktığı tüm tabakanın taranmasına dayanır. Ancak sürekli dijital optik işleme teknolojisi ile hareketli platform sürekli hareket ediyor başka bir deyişle, katılaşma sürekli ve dijital ışık işlemede olduğu gibi tabaka tabaka değildir. Bu nedenle algoritma, optimum katılaşma süresine dikkat ederek yazıcıya neredeyse sürekli bir gerçek zamanlı 2B kesit sel görüntü gönderir. Sürekli dijital optik işleme teknolojisi, oksijen kullanarak bu baskı hızına ulaşır. Şekil 3.7' de gösterildiği gibi, dijital optik işleme ile olan fark, oksijen yardımı ile oluşturulan "ölü bölge" de mikrometre seviyesinde bir sıvı reçine tabakasının oluşmasıdır (Tumbleston ve diğ. 2015).



Şekil 3.7: Sürekli Dijital Işık İşleme Teknolojisi (Tumbleston ve diğ. 2015).

Amerikan Test ve Malzemeler Derneği, Eİ yıkıcı üretim metotlarının aksine, 3B model datalarından objeler oluşturmak için tipik olarak tabaka tabaka malzemeleri birleştirme süreci olarak tanımlar (ASTM-Uluslararası 2012).

Eİ teknolojisi kullanılarak metal parçaların üretimi üç boyutlu modelleme ile başlar. Ardından, parçanın yönünün, destek yapısının konumunun ve modelin dilimlerinin bir tanımını içeren verilerin hazırlanmasını düzenlemek gerekir. Parçaların imalatından sonra bitirme işi gereklidir. Şekil 3.8 tabakanın oluşumunu şematik olarak göstermektedir (Epma Raporu 2018).



Şekil 3.8: Eklemeli İmalatta Tabakaların Oluşturulması (Epma raporu 2018).

Günümüzde çok sayıda eklemeli imalat süreci mevcuttur. Bu yöntemler, çalışma prensibi ile malzeme birikimi, parça oluşumu ve katman oluşumu açısından farklılık gösterir. Bazı yöntemler, örneğin SLM, SLS ve FDM gibi malzemeleri tabaka üretmek için eritir veya yumuşatırken, ötekileri SLA gibi sıvı numuneleri birleştirir. Her metodun kendine has avantajları ve dezavantajları mevcuttur, bunun sonucunda bazı üreticiler parçanın ayrıştığı numunee için toz ve polimer arasında tercih yapabilir (Brandl ve diğ. 2011).

Eklemeli imalat, geleneksel olarak üretilen parçaların entegre parçalarının imalatına da izin verir. Genel olarak, ağırlığı ve bağlantı / bağlantı elemanlarının sayısını azaltmak için bir fırsat sağlar (Brandl ve diğ. 2011).

Bugüne kadar eklemeli imalat uygulamalarında insansız hava araçları (İHA), yakıt nozul odaları, aletler ve biyomedikal implantlar yapılmıştır. Herzog ve arkadaşlarına göre. Mevcut birçok teknoloji olmasına rağmen, metal parçaların sanayi kullanımların ihtiyaçlarını karşılayan yalnız birkaç yöntemle üretilbileceğini göstermişlerdir (Herzog ve diğ. 2016).

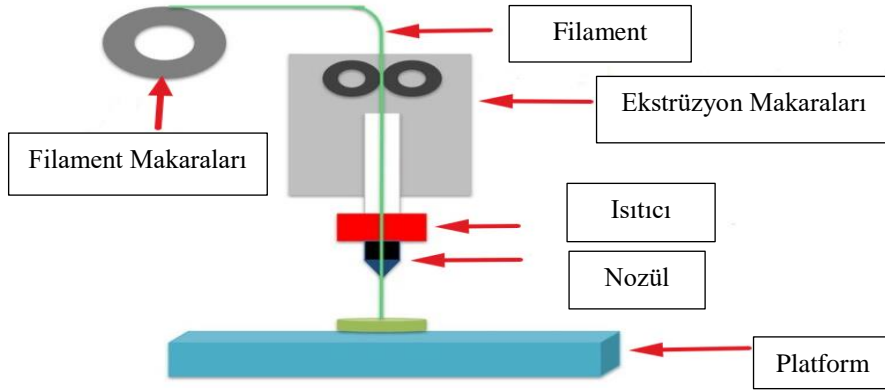
Bu nedenle, üretim yönteminin mikro yapısı ile içyapısı arasındaki ilişkinin etkisini ayrıntılı olarak analiz etmek daha yararlıdır. Eİ yöntemi, bir LBM, bir EBM ve bir LMD' dir (Debroy ve diğ. 2018).

### 3.3.3.2 Malzeme Ekstrüzyonu

Esas olarak polimer bazlı malzemelerin merdaneler yardımıyla sıkıştırılıp eritilerek dişe diş bir tabaka oluşturmasına dayanır (Tumbleston ve diğ. 2015).

#### 3.3.3.2.1 Eriyik Yığılma Modelleme (FDM)

Şekil 3.9' da gösterildiği gibi, eriyik biriktirme teknolojisi, bir makaraya sarılmış filament (iplik) makaradan nozüle sürüklenir. Nozül çıkışından hemen önce, ısıtıcının içinden eritilerek XY düzleminde iplik katılma yöntemi gerçekleştirilir. Genel olarak BS, karbon fibere PLA bazlı filamentler kullanılır. Destek parçaları, farklı renkler vb. oluşturur. Nozül miktarı artırılarak, katılma işlemi aynı anda farklı malzeme bazlı filamentlerle gerçekleştirilebilir (Tumbleston ve diğ. 2015).

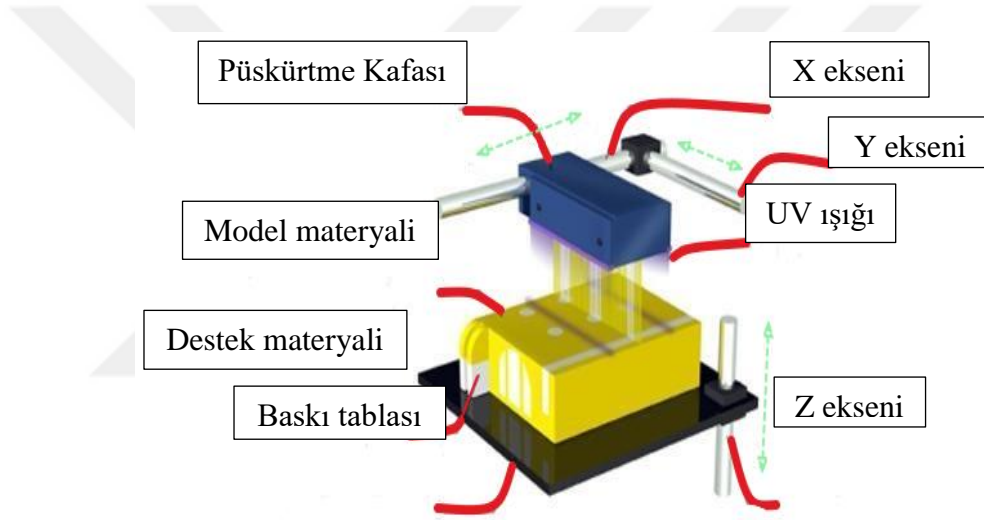


Şekil 3.9: Eriyik Yığılma Teknolojisi.(Tumbleston ve diğ. 2015).

Eriyik yığılma teknolojisinde parçanın baskı hızı düşüktür. Bununla birlikte, baskı malzemesinin mekanik, termal ve kimyasal nitelikleri sayısız uygulama için kâfidir. Düşük maliyeti nedeniyle endüstriyel olmayan kullanımın ön safların da yer almaktadır. Mukavemetlerini arttırmak için polimer filamentler, kullanım alanına bağlı olarak metal veya seramik tozu ile karıştırılabilir (Tumbleston ve diğ. 2015).

### 3.3.3.3 Malzeme Püskürtme

**Çoklu püskürtme** ; Çoklu püskürtme teknolojisinde, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi düzinelerce nozulu olan püskürtme kafaları vardır. Bu püskürtme kafasının nozulu, 40-50 mikron büyüklüğünde foto polimer sıvı damlacıkları püskürtebilir. Ek olarak, püskürtme kafası ayrıca bir UV ışığı kaynağı taşır. Püskürtme başlığı, foto polimer damlacıklarını üretilecek parçanın enine kesitine göre püskürtür, ardından polimer damlacıklarını ısıtmak ve katılaşmalarını önlemek için bir UV ışık kaynağı püskürtür. Bu şekilde, yeni tabaka için püskürtülen foto polimer damlacıkları, katılaşmamış tabakaya temas ettiklerinden daha iyi kaynaşır (Tumbleston ve diğ. 2015).

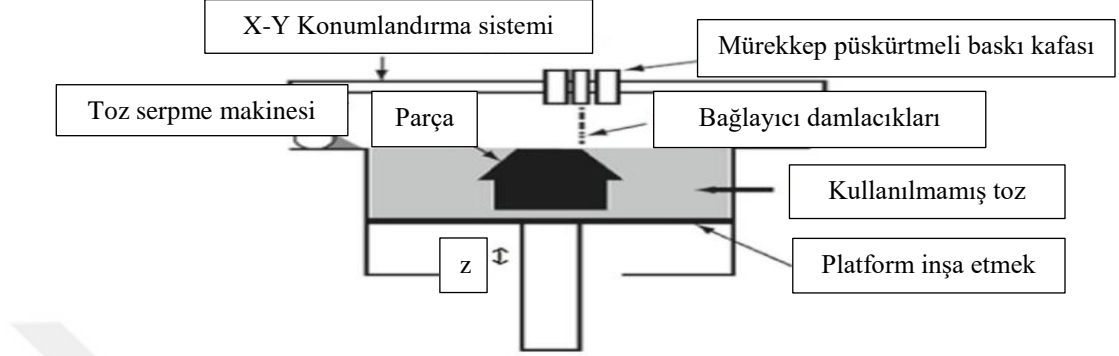


Şekil 3.10: Çoklu Püskürtme (Tumbleston ve diğ. 2015).

Üretilen ürünler polimer bazlı olduğu için yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılamazlar. Sadece UV ışık kaynakları sayesinde katmanlar daha güzel şekilde birlikte erir ve yüksek çözünürlükte üretim yapılabilir. Bu nedenle, işlem sonunda yumuşatma gibi ek işlemler gerekli değildir (Tumbleston ve diğ. 2015).

### 3.3.4 Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat

Bu metotta, Şekil 3.11’ de görüldüğü gibi toz bazlı ana malzeme ve toz tabakalar arasında yapıştırıcı görevi gören, genellikle sıvı formda iki tür yapıştırıcı kullanılır (Xometry 2017).



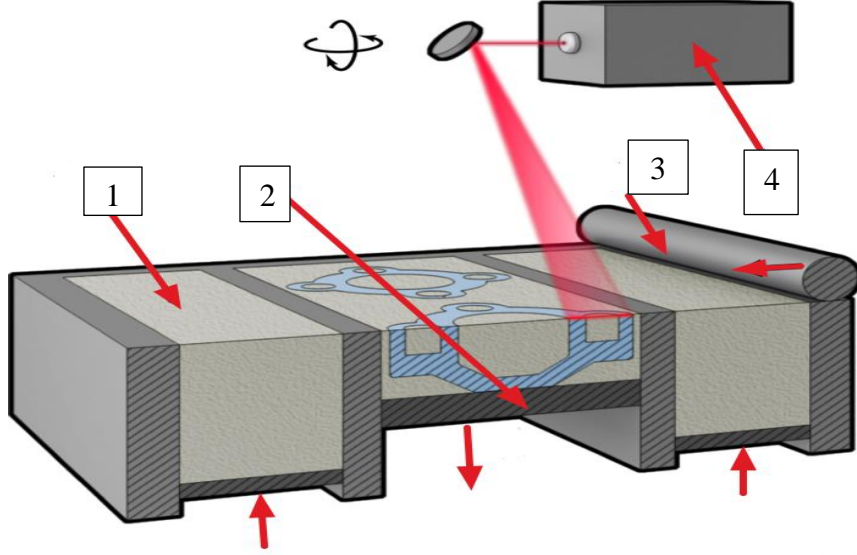
Şekil 3.11: Yapıştırıcı İle Katmanlı İmalat Süreci (Xometry 2017).

### 3.3.5 Toz Yatak Füzyonu

Toz yatağı füzyon teknolojisi, kızıl ötesi lambalar, elektron ışınları, lazerler, ısıtma veya eritme gibi güç kaynakları kullanılarak toz malzemelerin füzyonuna dayanır. Bu yöntem bir vakum gerektirir. Bu sayede toz tanelerini birlikte eritmek kolaylaşır, güç tüketimini azaltır ve mukavemeti artırır (Tumbleston ve diğ. 2015).

#### 3.3.5.1 Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

SLS teknolojisi ile toz haline getirilen polimerler, seramikler ve bazı metaller, lazer ışık kaynağının ürettiği ısı sayesinde erime noktasının altındaki sıcaklıklarda birlikte eritilerek bir tabaka oluşturur (Tumbleston ve diğ. 2015).



Şekil 3.12: SLS Teknolojisi (Tumbleston ve diğ. 2015).

Şekil 3.12' de görüldüğü gibi, 1 numaralı Oda toz halindeki bir malzemeye sahiptir. 3 Numaralı silindir, tozu 1 numaralı odadan eleme işleminin gerçekleştirildiği 2 numaralı platforma sürüklemek için tezgâh üzerinde hareket eder. Burada lazer ışık kaynağı, toz parçacıklarının 3D modelin enine kesitine göre ısıtılarak bir birleriyle kaynaşmasını sağlar. Bundan sonra, platform 2 katmanın uzunluğu boyunca aşağı iner. Bu süreç üretimin sonuna kadar bu şekilde sürer. Toz, silindir tarafından toz tanesinden aktarıldıktan sonra bu platformun 1 katının üstüne çıkar. Bu üretim sürecinde çok az malzeme israfı olur ancak kalan toz işlemden sonra tekrar kullanılır (Tumbleston ve diğ. 2015).

### 3.3.5.2 Multi Jet Eritme Yöntemi (MJF)

MJF yöntemi başka bir toz yatağı üretim yöntemidir ve ek bir işlem olan detaylandırma işlemi dışında diğer toz yatağı eritme teknolojisiyle aynı üretim prensibine sahiptir. MJF yönteminde, üretim platformuna bir poliamid tozu tabakası yerleştirilir ve eritme maddesi, parçacıkların eritilmesi gereken yüzeye seçici olarak uygulanır. Sonra parçacıklar eritilir. Daha sonra, eritme işleminin istenildiği gibi azaltılması veya iyileştirilmesi gereken alanlara yerel bir detaylandırma maddesi uygulanır. Detaylandırma işlemi erime seviyelerini düşürür ve parçaların ince kenarlarının ve keskin köşelerinin daha doğru üretilmesini sağlar. Ayrıca, MJF

yönteminin SLS yöntemi ile karşılaştırıldığında, MJF yöntemi imalat hızı, boyutsal doğruluk ve çekme mukavemeti açısından bir basamak öndedir (Sekoya 2017).

### **3.3.5.3 Elektron Işınli Ergitme (EBM)**

EBM teknolojisi, odaklanmış elektron ısısı ile toz malzemelerin eritilmesi ve eritilmesi prensibine dayanır. SLS teknolojisine benzer ancak tek fark sinterleme yerine erimesidir. Yüksek mukavemetli bileşenlerin üretiminde tercih edilir. Bu malzemelerin tozlarının eritilmesi yüksek güç gerektirir, bu nedenle işlemi kısa sürede çalıştırmak için elektron ışını kaynağı gibi güçlü bir kaynağa ihtiyaç vardır (Tumbleston ve diğ. 2015).

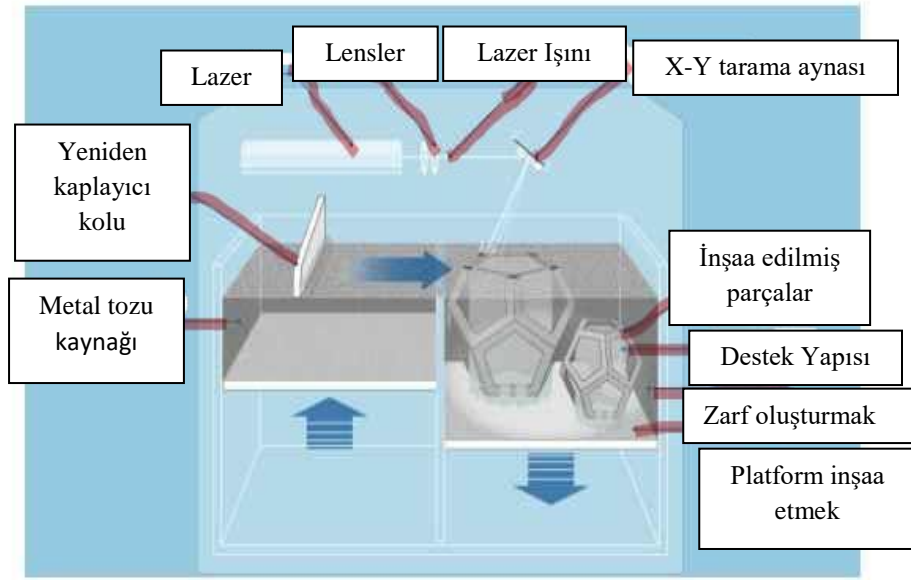
### **3.3.5.4 Seçici Lazer Eritme (SLM)**

Çalışma prensibi, SLS teknolojisi ile aynıdır. Farklarının anlamı, SLS teknolojisinin genellikle polimer seramik tozları için kullanılması ve DMLS teknolojisinin genellikle metal tozları için uygun şekilde kullanılmasıdır. Gerekirse, imalattan sonra tavlama uygulanarak iç stres ortadan kaldırılabilir (Tumbleston ve diğ. 2015).

DMLS, karmaşık üretime göre kullanılan bir imalat metodudur. Bu metotta metalin şekli, yüksek güçlü bir fiber lazer kullanılarak kaynaştırılır. Tek tek parçacıklar, tabakaları birbirine bağlamak ve ardından mikro kaynak yapmak için kullanılır. DMLS işlemi teorik olarak plastik işlemeye çok benzer (eriyik biriktirme yöntemi). Bununla birlikte, pratikte DMLS süreci tamamen farklı ve zordur. Eriyik biriktirme ve modellemede sadece 40-90 mikron kalınlığında plastik tozlar ısıtılır ve dekontamine edilir. Erime sıcaklığının altında, bir kızılötesi lazer, CAD modeli tarafından belirtilen alanda tozu eritmek için yüzeyi tarar. Bununla birlikte, metal işleminde DMLS' ler, metal tozu erime noktasına kadar ısıtılmaz ve çok yüksek bir güçte ısıtılır. Lazerler, CAD modellerinin fonksiyonel tasarımında tozları eritmek için kullanılır. Temel farkları, plastik işlemdeki 3 katlı yazıcı tabakasıdır. Öte yandan, boyutsal olarak uzaydalar ve daha fazla desteğe ihtiyaçları yok (Simchi ve diğ. 2003).

DMLS işlemi, her metal parçanın döküldüğü ve taban plakasında kendi gölgesinin bulunduğu bir stereo litografi işlemine benzer. Bununla birlikte, erimiş metalin düşük viskozitesi nedeniyle, dikkate alınması gereken iki önemli husus vardır. Birincisi, herhangi bir çıkıntı desteklenmeli ve ikincisi, destek malzemesi emilecek şekilde seçilmelidir. Malzemenin kristal noktasını azaltmak için büyük ısı gereklidir (Simchi ve diğ. 2003).

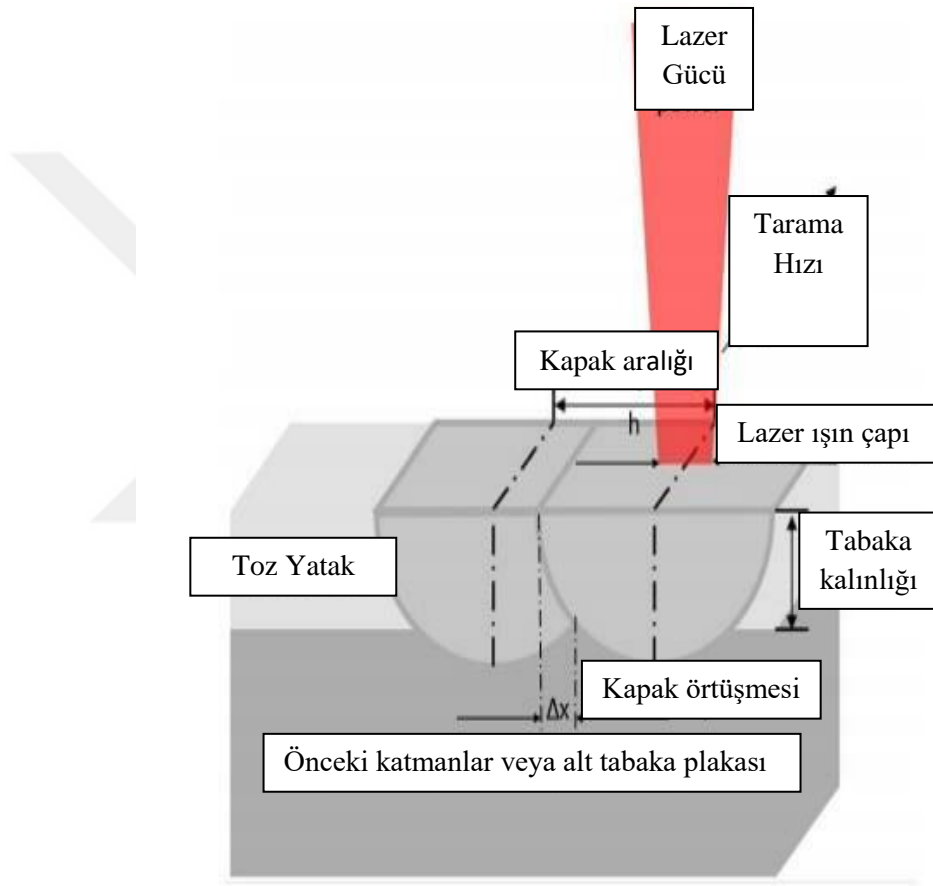
DMLS işlemi, kobalt gibi yüksek mukavemetli metaller üretme kapasitesine sahiptir. DMLS ile krom ve paslanmaz çeliği dayanıklı ve güçlü prototiplere dönüştürüyoruz. DMLS yazıcılar, prototip oluşturma özgürlüğüne sahip tamamen işlevsel 3D parçalar geliştirebilir ve bu şekilde tasarım neredeyse sınırsızdır. Bu teknoloji için son işlemler arasında kumlama, kimyasal frezeleme ve mikro işleme gibi aşındırıcılar bulunur. Elektron ışını eritmeden (CPA) farklı olarak, DMLS' ler tarafından üretilen parçacıkların bitmiş özellikleri de dâhil olmak üzere işlem, yüzey kaplama ve destek yapısı çok daha etkili ve ayrıntılıdır. Şekil 3.13' te DMLS işleminin bir diyagramını göstermektedir (Simchi ve diğ. 2003).



Şekil 3.13: DMLS Şeması (Simchi ve diğ. 2003).

Lazer sinterleme işleminde, taban plakası boyunca belirli miktarda metal tozu yayılır ve lazer, metal parçacıklarını seçici olarak uzaklaştırarak eritmek için taban plakasını taramak üzere yansıtılır. Bu eritme işleminin genişliği, lazer gücünden,

tarama hızından ve nokta çapından doğrudan etkilenir. Etkili bir karmaşık parça şekli elde etmek için bunların en az %20'sine ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir. Bu sadece sürekliliği sağlamakla kalmamalı, aynı zamanda tabakalar oluşturmanın yanı sıra malzemeyi güçlendirmeli, aynı zamanda birbiriyle örtüşmelidir. Kapak mesafesini artırarak üretim hızını arttırırsanız artık gerilme meydana gelecektir. DMLS' de yer alan proses parametrelerinin şematik diyagramı Şekil 3.14' te belirtilmektedir (Townsend ve diğ. 2016).



Şekil 3.14: DMLS' de Proses Parametrenin Şematik Diyagramı (Townsend ve diğ. 2016).

### 3.3.5.5 Lazer Toz Şekillendirme (LENS)

Eİ, toz ağızdan (nozül) püskürtülerek ergitme prensibine dayanır. Bu yöntemde, toz püskürtme memesi tozu eritmek için lazer başı ve tabakanın oksidasyonunu önlemek için gaz da borulu makara başlıkları kullanılır. Nozullardan

ve gaz borularından gelen toz parçacıklarından da koruyucu inert gaz ve tozlar lazerle püskürtülür ve püskürtülen tozlar ergitilerek yerel erime havuzları oluştururlar. Erime havuz pıhtılaşmasından sonra aynı üretim döngüsüyle tabaka tabaka imalat devam edecektir. Bu sebeple yönteme, “üfleli toz” ilaveli üretimde söylenilmektedir (Strano 2013).

Diğer eklemeli üretim yöntemlerinde yaşanan artık stres, LENS metodu ile yüzey çatlakları ve gözenek oluşumu gibi mukavemet azaltma sorunlarının en aza indireceği de anlaşılmaktadır (Hiemenz 2007).

Bu yöntem çok hassastır ve 0,1 mm ile birkaç mm kalınlık arasında değişen malzeme tabakasının otomatik olarak biriktirilmesi, kaplama malzemesinin ana malzemesine iyi kayması ile alt tabakaya dirençli yapışması ve düşük ısı girişi ile diğer kaynak teknelerine nüfuz etmesi nedeniyle benzer olmadığı öne sürülmüştür (Karakılınç ve diğ. 2019).

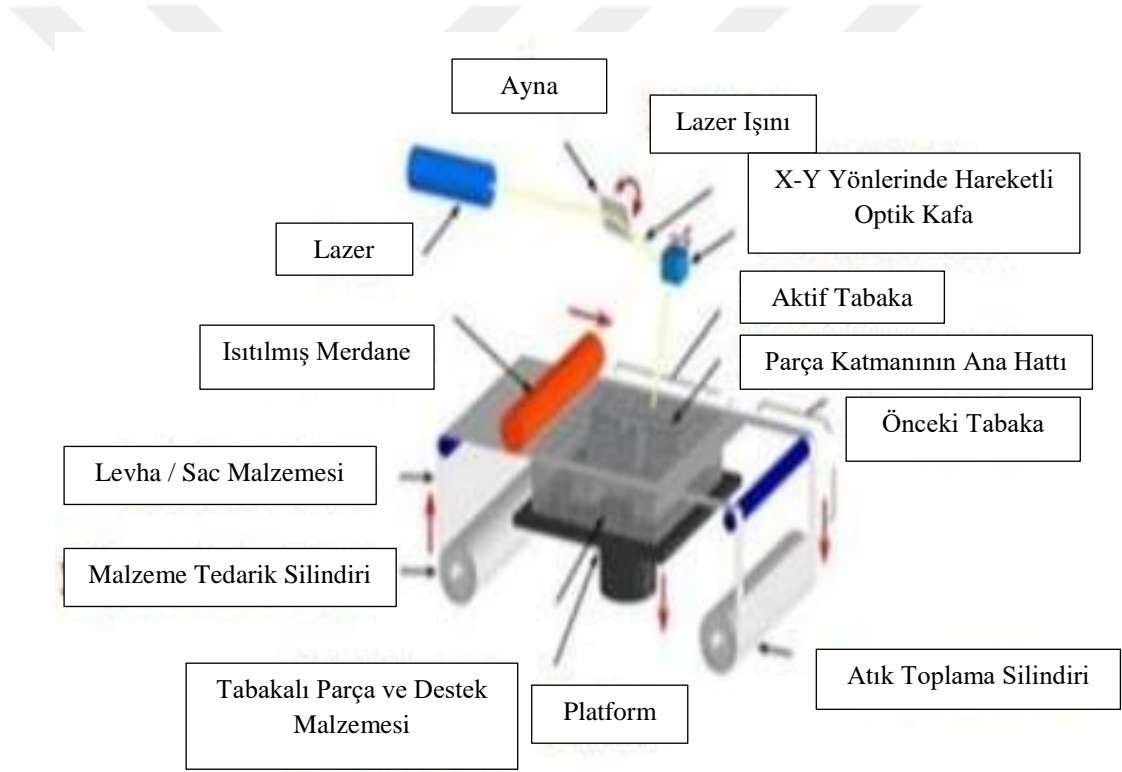
Ayrıca LENS’ te, hammaddelerin imalatla bekletilmeden ikincil işlenmesi bu özellikle uygun bir şekilde yapılabilir. Titanyum, Alüminyum, inconel alaşımlar ve paslanmaz çelikleri olan parçalar üretmek mümkün olduğu gösterilmiştir (Redwood 2017).

### **3.3.5.6 Elektron Işını Eklemeli İmalat Yöntemi (EBAM)**

Bu yöntemde istenilen üç boyutlu metal parçalar, teller veya toz halindeki malzeme elektron ışını ile eritilip, yapıştırma ile üretilir. Bu EBAM, LENS’ e benzer ve kullanılan elektron ışını LENS’ te kullanılan lazerden daha etkili olduğu belirtilmektedir (Redwood 2017).

### 3.3.6 Levha/Sac Laminasyon Metodu

Bu üretim yöntemi, tabakaların ölçeklendirilip birbirine yapıştırılmasına imkân tanır. Şekil 3.15' de görüldüğü üzere, parçanın dış hatlarını kesmek için bir lazer elemanı kullanılır. Bu parçalar, yapıştırıcılarla kaplanmış metal plakaların istiflenmesi, birleştirilmesi ve kesilmesiyle elde edilir. Her kesim işleminin ardından arka plan seviyesi, katman kalınlığına kadar azaltılır ve daha önce oluşturulan katmanın üzerine yeni bir katman eklenir. Sonrasında, platform hafifçe kaldırılarak laminatöre basınç uygulanır ve ısı silindiri yeni katmanla birleştirilir. Ürünün istenen şekli elde edilene kadar bu işlem tekrarlanır. İstenmeyen lazer kesim plakaları, özel bir atık toplama silindiri ile toplanır (Additive Manufacturing Research Group 2017).



Şekil 3. 15: Levha./Sac Laminasyon Gösterimi (Additive Manufacturing Research Group 2017).

### 3.4 EOSM290' IN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

#### 3.4.1 Ana Özellikleri

Lazer yoğunluğu; 400 watt fiber lazerin olağanüstü ışın kalitesi, oldukça karmaşık metal bileşenlerin üretimi için idealdir.

Şeffaf esneklik; EOSM290'ın geniş uygulama yelpazesi ve kapsamlı malzeme desteği, onu çok çevik bir orta platform haline getiriyor.

Uygun maliyetli üretim; 250x250x325 mm ölçülerinde yapısal alana sahip EOSM290, metal parçaların uygun maliyetli üretimini sağlar. Şekil 3.16' da EOSM290 görülmektedir ([na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms](http://na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms) 2023).



Şekil 3.16: EOSM290 Görseli ([eos.info/Equipment/Metal-Platforms](http://eos.info/Equipment/Metal-Platforms) 2023).

EOSM290, doğrudan metal lazer sinterleme yönteminin uygulanabileceği bir lazer eritme makinesidir. Özellikle EOSM290, metal eritme işleminde mükemmel performans özellikleri sunar. EOSM290'ın teknik veri tablosu Tablo 3.4' de detaylandırılmıştır (na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms 2023).

**Tablo 3.4:** Teknik Veri Tablosu (na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms 2023).

İnşaat Hacmi	250x250x325 mm (9,85x9.85x12,8 inç) (baskı plakası dahil yükseklik)
Lazer Tipi	Yb-Fiber lazer; 400 W
Hassas Optikler	F-teta merceği; yüksek hızlı tarayıcı
Tarama Hızı	7,0 m/s' ye (23 ft/sn) kadar
Odak Çapı	100 µm (0,004 inç)
Güç Kaynağı	32A / 400V
Güç Tüketimi	Maks. 8,5 kW ortalama 2,4 kW/3,2 kW' a kadar platform ısıtmalı
Basınçlı Hava Kaynağı	7000 hPa; 20 m <sup>3</sup> /Sa (102 psi; 706 ft <sup>3</sup> /Sa)
Makine Boyutları (GxDxY)	2500x1300x2190 mm (98,4x51,2x86,2 inç)
Önerilen Kurulum Alanı	dk. 4800x3600x2900 mm (189x142x114 inç)
Ağırlık	yaklaşık 1250 kg (2756 lb)
Yazılım	EOSPRINT dahil. EOS ParameterEditor, EOSTATE Ewerywhere, EOSCONNECT Core, EOSCONNECT MachinePark, Materialise Magics Metal Paketi ve modülleri

## 4. YÖNTEM

### 4.1 ALÜMİNYUM (ALSİ10MG) ÖZELLİKLERİ

#### Genel Tanımı

AlSi10Mg, iyi döküm özelliklerine sahip bir döküm alaşımıdır, ince duvarlı ve karmaşık geometriye sahip parçaların dökümünde kullanılır. AlSi10Mg'de bulunan alaşım elementleri; Mg ve Si, alüminyumun sertliğinin daha yüksek bir seviyeye getirilmesini sağlar (aluteam.fsm.edu.tr 2019).

#### Kullanım alanları

Pnömatik sistemlerde, fonksiyonel uygulamalarda, mühendislik uygulamalarında, otomotiv, havacılık, mühendislik, küçük seri üretim veya alüminyum yedek parçalarında kullanılır (aluteam.fsm.edu.tr 2019).

#### Teknik özellikleri

F.S.M. Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi'nde üretilen AlSi10Mg malzemelerinin teknik özellikleri Tablo 4.1' de gösterilmiştir.

**Tablo 4.1:** Teknik Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019).

Özellikler		
Tolerans	$\pm 100 \mu\text{m}$	
Duvar Kalınlığı	0,3-0,4 mm	
<b>Yüzey Pürüzlülüğü</b>		
Üretimden Sonra Temizlenmiş	Ra = 6-10 $\mu\text{m}$	Rz = 30-40 $\mu\text{m}$
Shot-Peening Sonrası	Ra = 7-10 $\mu\text{m}$	Rz = 50-60 $\mu\text{m}$

## Mekanik Özellikler

F.S.M. Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezinde üretilen AlSi10Mg malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Mekanik Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019).

Özellikler	Üretilen	Isıl İşlem Sırası
<b>Çekme Mukavemeti</b>		
Yatay (XY)	460 ± 20 MPa	345 ± 15 MPa
Dikey (Z)	460 ± 20 MPa	345 ± 15 MPa
<b>Akma Mukavemeti</b>		
Yatay (XY)	270 ± 10 MPa	230 ± 15 MPa
Dikey (Z)	240 ± 10 MPa	230 ± 15 MPa
<b>Elastik Modülü</b>		
Yatay (XY)	75 ± 10 GPa	70 ± 10 GPa
Dikey (Z)	70 ± 10 GPa	60 ± 10 GPa
<b>Kopma Uzaması</b>		
Yatay (XY)	% ( 9 ± 2 )	% ( 12 ± 2 )
Dikey (Z)	% ( 6 ± 2 )	% ( 11 ± 2 )
<b>Yorulma Dayanımı</b>		
Dikey	97 ± 7 MPa	
Sertlik	119 ± 5 HBW	

## Fiziksel Özellikler

F.S.M. Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezinde üretilen AlSi10Mg malzemenin fiziksel özellikleri Tablo 4.3' te verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Fiziksel Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019).

<b>Yoğunluk</b>	2,67 g/cm <sup>3</sup>
<b>Göreceli Yoğunluk</b>	% 99,85

## Kimyasal Özellikler

Çalışmada, EOS tozu kullanılarak lazer katkı kalıplama yöntemi ile DMLS teknolojisi kullanılarak hazırlanan örnek kullanılmıştır. EOS. Üretimde "EOS art.-no. 9011-0024" kodlu AlSi10Mg toz karışımı kullanılmıştır.

Karışımındaki elementler oranlarıyla birlikte Tablo 4.4' te verilmiştir. Numuneler; F.S.M. Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezindeki, EOSM290 model cihazda üretilmiştir.

**Tablo 4.4:** Kimyasal Özellikler Tablosu (F. S. M. Vakıf Üniversitesi 2019)

<b>Element</b>	<b>Ağırlık İçerik</b>
Silisyum	% 9 – 11
Demir	≤ % 0,55
Bakır	≤ % 0,05
Manganez	≤ % 0,45
Magnezyum	% 0,2 - 0,45
Nikel	≤ % 0,05
Çinko	≤ % 0,01
Kurşun	≤ % 0,05
Kalay	≤ % 0,05
Titanyum	≤ % 0,15

## Termal Özellikler

F.S.M. Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezinde üretilen AlSi10Mg malzemenin termal özellikleri Tablo 4.5' de sunulmuştur.

**Tablo 4.5:** Termal Özellikler Tablosu (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019)

Özellikler	Üretim	Isıl İşlem
<b>Isıl İletkenlik</b>		
Yatay (XY)	103 ± 5 W/m°C	173 ± 10 W/m°C
Dikey (Z)	119 ± 5 W/m°C	173 ± 10 W/m°C
<b>Özgül Isı</b>		
Yatay (XY)	920 ± 50 J/kg°C	890 ± 50 J/kg°C
Dikey (Z)	910 ± 50 J/kg°C	890 ± 50 J/kg°C

### 4.1.1 AlSi10Mg' un Üretim Parametreleri

F.S.M. Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezinde üretilen malzemenin üretim parametreleri Tablo 4.6' da verilmiştir.

**Tablo 4.6:** AlSi10Mg Üretim Parametreleri (F.S.M. Vakıf Üniversitesi 2019).

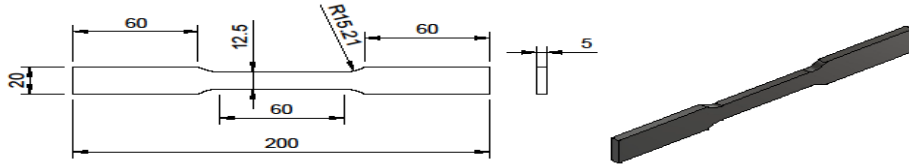
Lazer Gücü	370 W
Lazer Tarama Hızı	1300 mm / sn
Tarama Aralığı	0,19 mm
Katman Kalınlığı	30 µ
Işın Ofset	0,02 mm
Enerji Yoğunluğu	49,932 J / mm <sup>3</sup>
Tarama Stratejisi	X – Döndürülmüş
İmalat Tabla Sıcaklığı	35 °C ( bina platformu )

#### 4.1.2 Deneyin Amacı

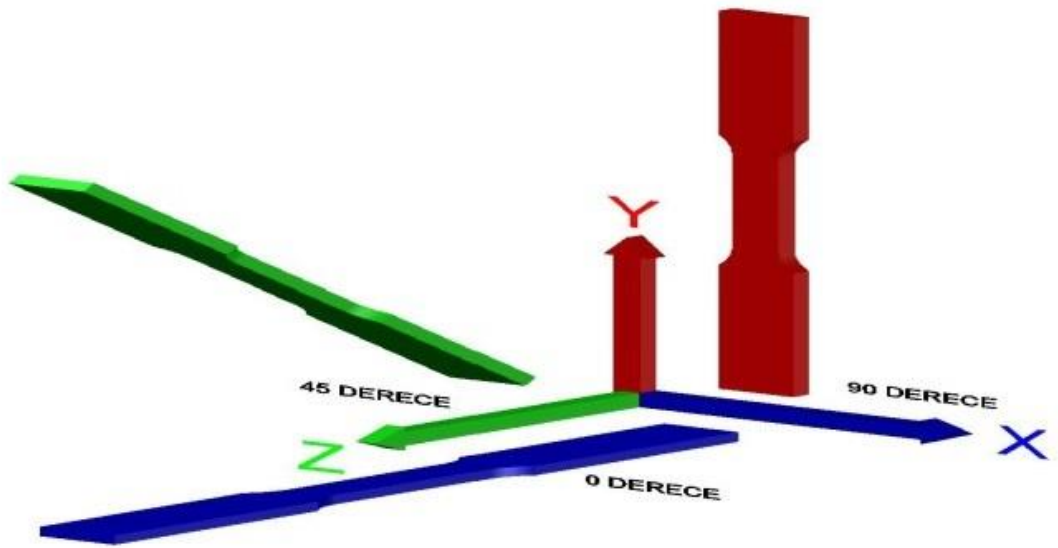
Bu çalışma, geleneksel işleme ve laminasyon tekniklerinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından biri olan AlSi10Mg alaşımının mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla yapılmıştır.

#### 4.1.3 Malzemelerin Hazırlanması Süreci

ASTM E8 standardına uygun bir malzeme modeli oluşturmak için, numuneler Şekil 4.1' de belirtilen boyutlarda hazırlanmıştır. Bu süreçte, EOSM290 cihazının platformunda, Şekil 4.2' deki  $45^{\circ}$  açılı,  $0^{\circ}$  yatay ve  $90^{\circ}$  dikey konumlarında üretimler gerçekleştirilmiş ve ardından S.D. Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde çekme testleri yapılmıştır.



Şekil 4.1: Malzemeye Ait Boyutsal Parametreler.



Şekil 4.2: Malzemelerin EOSM290 Platformunda Konumlandırılması.

## 4.2 ÇEKME TESTİ

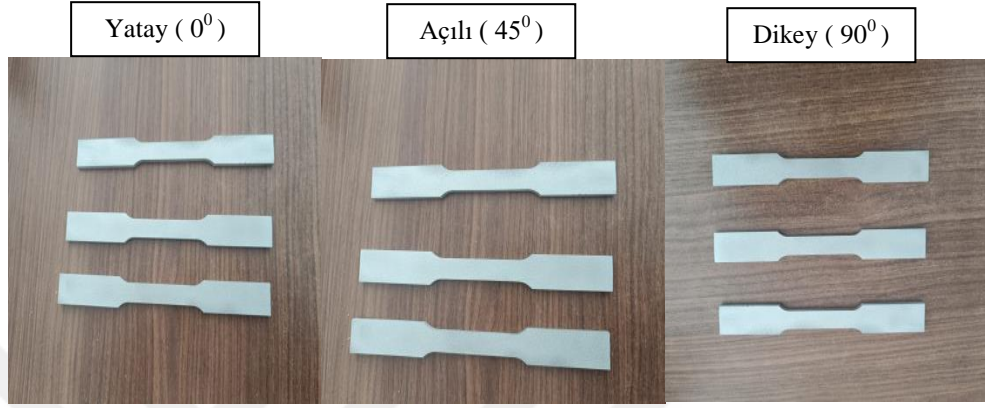
Çekme testi basit bir testtir ancak bir numunenin mekanik özellikleri hakkında önemli bilgiler üretir. Numuneler için geometri, boyutlar ve test prosedürleri ASTM (Amerikan Malzemesi) tarafından tanımlanır. Çekme testinde numune test makinesinin çenesinde tutulur. Parça sabit bir hızda gerilir. Test sırasında uygulanan yük ve numunenin uzaması aynı anda kaydedilir. Uzama ölçümleri videoya kaydedilebilir veya mekanik bir ekstansometre kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Bu çalışma kapsamında DMLS üretim teknolojisi kullanılarak üretilmiş AlSi10Mg alaşımının mekanik özelliklerini belirleyebilmek için öncelikle testleri 1 mm/dk. çekme hızında, S.D. Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan MTS 647 çekme test cihazı (Şekil 4.3) kullanılarak yapılmıştır.

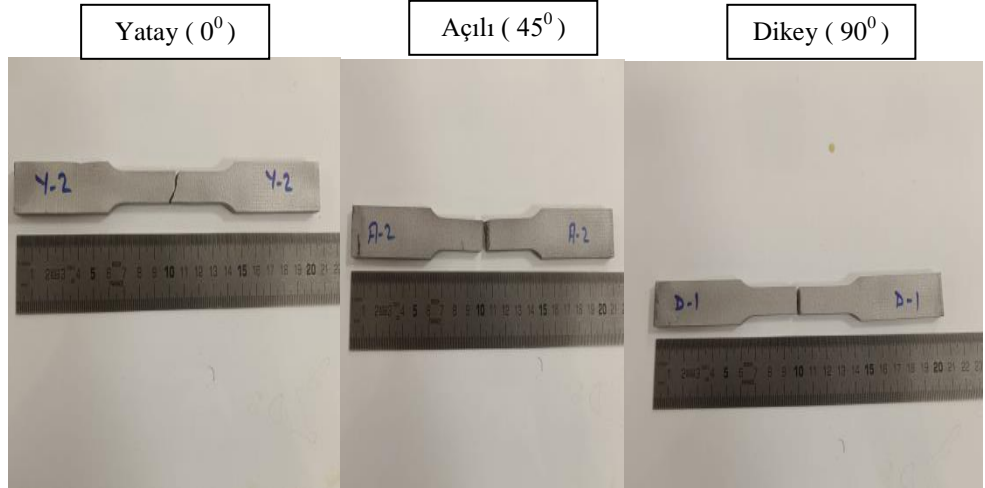


Şekil 4.3: Çekme Testi İçin Kullanılan Cihaz Ve Numune Görüntüsü.

Çekme testi yapılmadan önce üretilmiş olan AlSi10Mg' un sırasıyla  $0^0$  yatay  $45^0$  açılı ve  $90^0$  dikey görüntüleri Şekil 4.4' te, çekme testleri yapıldıktan sonra oluşan uzama ve kopmalar Şekil 4.5' de görüldüğü gibi oluşmuştur.



Şekil 4.4: AlSi10MG' un  $0^0$ ,  $45^0$  ve  $90^0$  Üretim Sonu Görüntüleri a) Yatay b) Açılı c) Dikey.



Şekil 4.5: Çekme Testi Sonucu Oluşan Uzama, Kopma Görüntüleri a) Yatay b) Açılı c) Dikey.

### 4.3 SERTLİK TESTİ

**Sertlik;** bir malzemenin aşınma, çizik, delinme ve kesik gibi plastik deformasyona karşı direnci olarak tanımlanır. Malzemenin sertliği süneklik, mukavemet ve tokluk gibi diğer mekanik özelliklerle ilgilidir.

PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan, Şekil 4.6' da sertlik ölçümlerinin yapıldığı Hardway marka sertlik test cihazı görülmektedir. Bu cihaz aracılığıyla parlatılmış yüzeylerden Vickers sertlik değerleri alınmıştır.



**Şekil 4.6:** Hardway Marka Sertlik Test Cihazı.

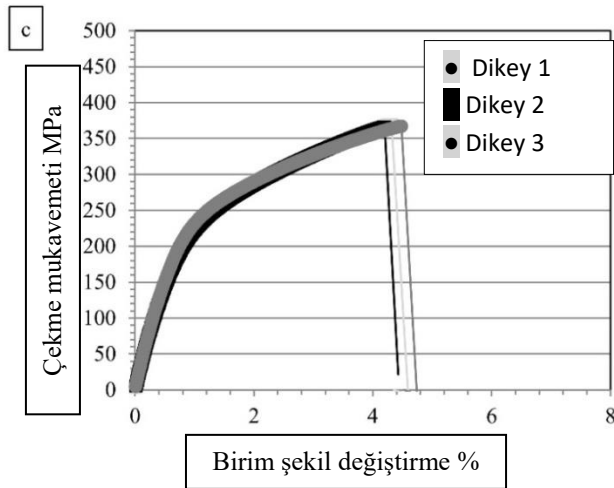
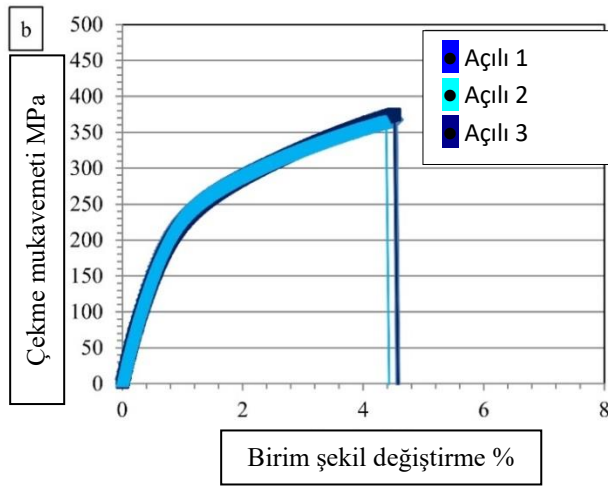
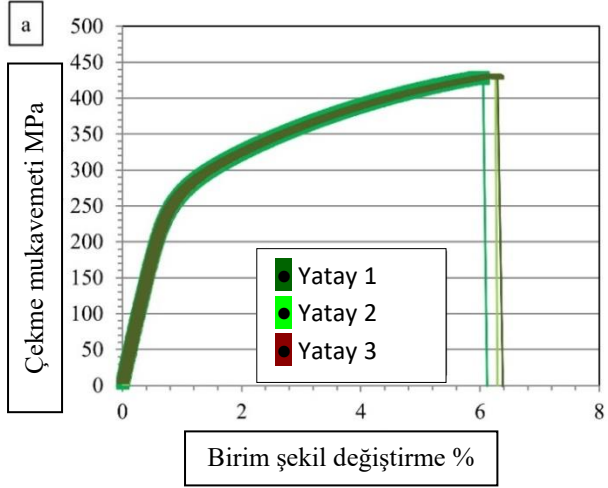
## 5. BULGULAR

### 5.1 Çekme Testinin Analizi

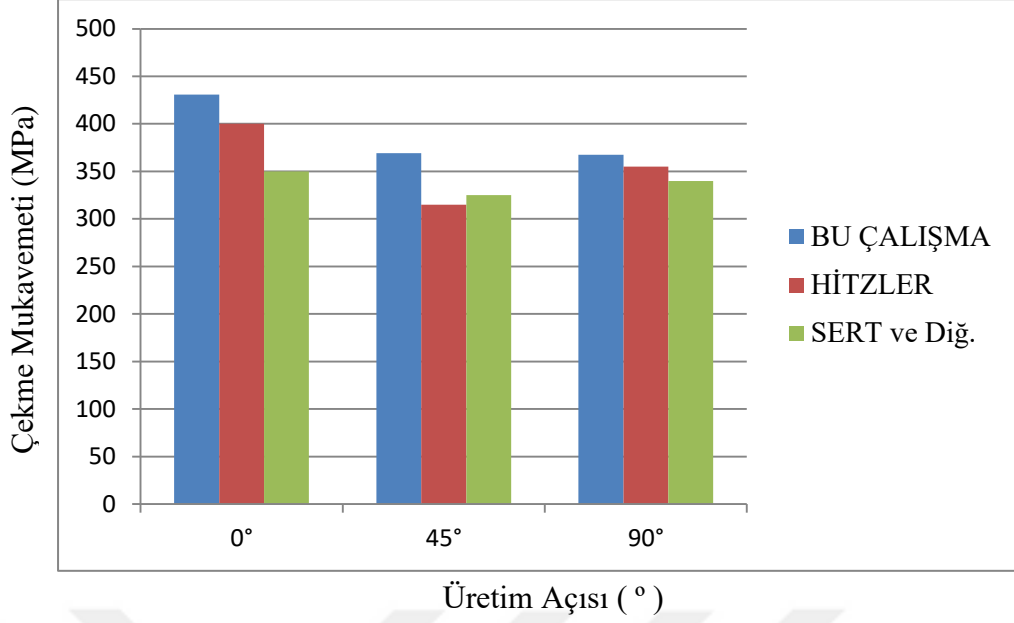
Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezinde  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  ve  $90^{\circ}$  açılarda üretilen üç farklı AlSi10Mg malzemenin, S.D. Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılan çekme test sonuçları Tablo 5.1’ de verilmiştir. Buna istinaden ortaya çıkan Gerilme-Birim şekil değiştirme Şekil 5.1’ deki grafikte verilmiştir. Ortaya çıkan değerlerde yatay ( $0^{\circ}$ ), de yüksek çekme mukavemeti görülmüştür. Hitzler, Sert ve diğ. tarafından üretilen malzemelere kıyasla, tarafımca üretilen numunelerin çekme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu ve belirgin bir üstünlük gösterdiği Şekil 5.2’de görülmektedir. Bunun en büyük sebebi üretim parametrelerinin farklı olmasıdır.

**Tablo 5.1:** AlSi10Mg Malzemenin Çekme Testi Sonuçları.

<b>Numune türü</b>	<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Kopma Uzama (%)</b>	<b>Tokluk (MJ/m<sup>3</sup>)</b>
Yatay	432±1,3	6,03±0,09	2108±47
Eğimli	374±3,7	4,5±0,05	1227±25
Dikey	369±1,7	4,4±0,07	1201±28

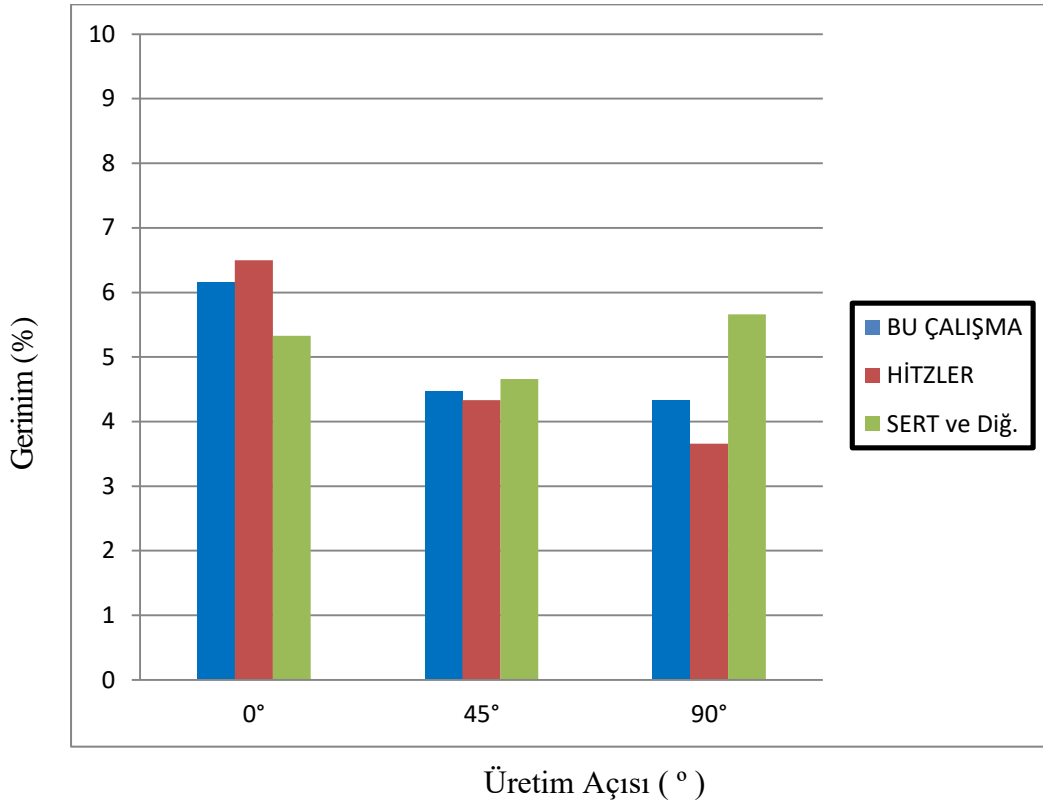


**Şekil 5.1:** Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Grafiği a) Yatay b) Açılı c) Dikey



Şekil 5.2: Karşılaştırmalı Çekme Mukavemet Grafikleri.

S.D. Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılan çekme testleri sonucunda Tablo 5.3’ de gerinim (%) değerleri verilmiştir. Oluşan bu gerilmeler Şekil 5.2’ de görüldüğü gibi farklı makalelerde bulunan değerlerle kıyaslanıp aynı grafikte sunulmuştur. Aynı malzemeden yapılmış ürünlerin farklılık göstermesi, üretim parametrelerinin farklılığındandır.

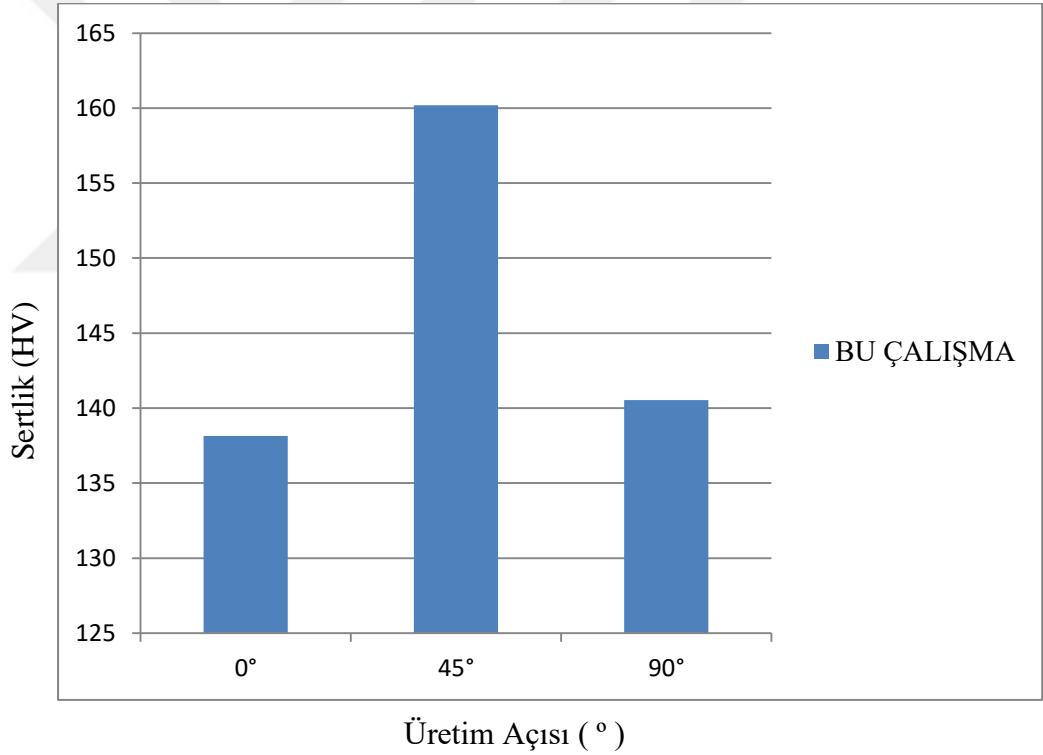


Şekil 5.3: Karşılaştırmalı Gerinim (%) Grafikleri

## 5.2 Sertlik Testinin İncelenmesi

PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında Hardway marka sertlik ölçüm cihazı kullanılarak  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  ve  $90^{\circ}$  parametrelerinde üretilen üç numunenin sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu değerler Tablo 5.2' de, grafiği ise Şekil 5.4' te sunulmuştur.

Bu çalışmada, eğimli ( $45^{\circ}$ ) olarak üretilen malzeme daha yüksek sertlik değerleri gösterirken, yatay ( $0^{\circ}$ ) olarak üretilen numune daha sünek ve tokluk özellikleri sergilemiştir. Dikey ( $90^{\circ}$ ) olarak üretilen numunenin ise diğerlerine göre nispeten daha düşük değerler sunduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4: Sertlik Testi Grafiği.

**Tablo 5.2:** Sertlik Değerleri.

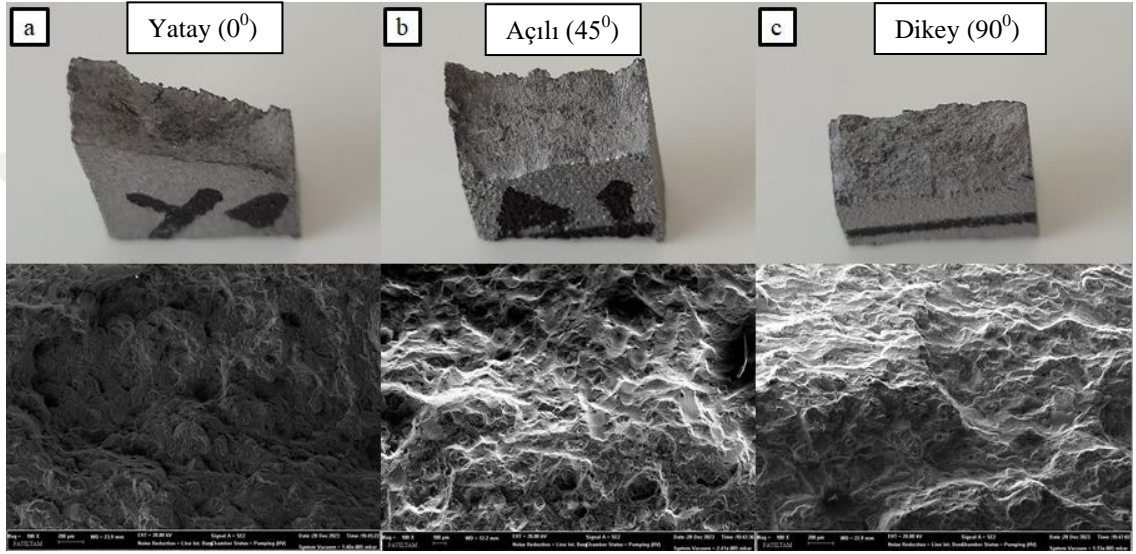
Deney No	Üretim metodu (Derece)	Sertlik (HV)
1	0	132,2
2	0	135,9
3	0	141,7
4	0	140,4
5	0	140,5
1	45	161,6
2	45	147,9
3	45	161,6
4	45	163,3
5	45	166,5
1	90	138,4
2	90	142,4
3	90	141,1
4	90	138,4
5	90	142,4

### 5.3 FESEM Analizleri

Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu, katı örneklerin yüksek enerjili odaklanmış elektron ışınları, yüzeylerde çeşitli sinyaller üretir. Elektron-örnek etkileşiminin sinyalleri, örneğin dış morfolojisi (yapısı), kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve örnek yönelimi elde edilebilir. Numunenin (yapısı), kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve yönelimi hakkında bilgi vermektedir.

EDX analizi, herhangi bir numune veya örneğin element bileşimini belirlemek amacıyla oluşturulmuş bir yöntemdir. Bu yöntem, aşağıdakileri belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Taramalı elektron mikroskobu uygulama yöntemidir. Analizde, örnek bir elektron ışını kullanılarak taranır. Yüksek enerjili elektronlar gönderir, bu yüksek enerjili elektronlar numunenin yüzeyine çarpar, örnekten elektronlar yayılır. Fırlatılan elektronlar iç orbitallerden ayrıldığında, dış orbitallerdeki elektronlar, atomun kararlılığını sağlamak amacıyla bu boş alanlara yerleştirilir. Daha yüksek enerjiye sahip olan dış orbitallerdeki elektronlar enerji

kaybeder. Kaybedilen bu enerji X-ışınları olarak dağılır. Yayılan X-ışınlarının özellikleri, elementi içeren atomların yapısına ve hangi enerji kabuğundan yayıldığına bağlıdır. Yayılan X-ışınları bir elektron alıcısı tarafından algılanır ve bir bilgisayar monitöründe görüntülenir. Alınan veriler bilgisayar monitöründe pikler olarak görüntülenir. Daha sonra element analizi tamamlanır. Elementlerin oluşturduğu pikler orantılı olarak analiz edilir (Ay 2017).



Şekil 5.5: FESEM Görüntüsü a) Yatay b) Açılı c) Dikey.

Bu çalışmada Şekil 5.5’ de görüldüğü üzere, a) yatay ( $0^0$ ), b) açılı ( $45^0$ ) ve c) dikey ( $90^0$ )’ de üretilmiş numunelerin çekme testi sonucu oluşan kopma noktalarından analiz edilen FESEM görüntüleri görülmektedir.

FESEM görüntülerinde, yatay üretilen numunelerin diğer parçalara oranla daha yüksek çekme mukavemetine haiz ve aynı vakitte daha sünek olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen üç numuneden en sert eğimli üretilen numunedir. Dikey üretilen numunenin ise diğerlerine oranla daha düşük değerlere haiz olduğu gözlemlenmiştir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Eİ üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda yoğunlaşmış ve ürünlerin seri üretimi için kullanılabilecek genel bir imalat yöntemi olarak hızla geliştiği görülmüştür. Araştırmalar sonucu, ürünlerin seri üretimi için kullanılabilecek genel bir üretim yöntemi olarak hızla gelişmekte olduğu görülmektedir. Geliştirilen; DMLS üretim yöntemleri mevcut bilimsel literatürün bilgisine katkıda bulunmak amacıyla bu çalışmada, farklı parametrelere sahip geleneksel bir yöntem ve bir eklemeli kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Eİ yöntemi ile üretilen parçaların işlevselliği, numunelerin sertlik, gerinim ve çekme mukavemet özellikleri karşılaştırılarak incelenmiştir. Eİ ile üretilen bileşenlerin endüstriyel kullanım potansiyeli doğrulanmıştır. Eİ üretim sürecinde katman kalınlığı (mm), lazer tarama hızı (mm/sn), lazer gücü (w), tarama aralığı (mm) ve enerji yoğunluğu ( $\text{j/mm}^3$ ) gibi parametrelerin AlSi10Mg alaşımlarının mikro yapısında önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Sertlik ve çekme testlerine tabi tutulan numunelerin incelemesinde FESEM kullanılmıştır.

Bu deneysel çalışmada, DMLS yöntemiyle üretilen AlSi10Mg parçalarının mekanik özellikleri üzerinde üretim yönünün (yatay, eğimli ve dikey) etkisi incelenmiştir. Ayrıca, bu değişkenlerin üretilen numunelerin mekanik performansı ve sertliği üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yatay olarak üretilen numunelerin çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk açısından en iyi performansı sergilediğini, eğimli olarak üretilen numunelerin ise sertlik bakımından en yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Dikey olarak üretilen numunelerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Ayrıca, tüm numune türlerinde test kuvveti seviyeleri arttıkça oluk benzeri yapılar ve ikincil enkaz parçacıkları hasar analizlerinde daha belirgin hale geldi. Ciddi plastik deformasyonun neden olduğu belirgin aşınma izleri ile birlikte, temas yüzeyleri arasında rastgele katmanlara ayrılma ve aşındırıcı kalıntıların oluşumu, özellikle yüksek yüklerde yatay olarak oluşturulmuş numunelerin zayıf performansının başlıca nedenleri olarak değerlendirilebilir.

## 7. KAYNAKLAR

Additive Manufacturing Research Group, “About Additive Manufacturing” <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive-manufacturing/> (Son erişim tarihi:30.09.2020), (2017).

Ahuja, B., Schaub, A., Junker, D., Karg, M., Tenner, F., Plettke, R., “A Round Robin Study for Laser Beam Melting in a Metal Powder Bed”, South African J Ind Eng 27:30–42 (2016).

Aktürk, M. “ Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş AlSi10Mg Malzemesinin Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması ”, KARABÜK Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek lisans tezi (2021).

Alkahari, M.R., Furumoto, T., Ueda, T., Hosokawa, A., Tanaka, R., Abdul Aziz, M.S., 2012. Thermal Conductivity of Metal Powder and Consolidated Material fabricated via Selective Laser Melting. Key. Eng. Mat. 523-524, 244-249, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.244>.

Aluteam.fsm.edu.tr “Alüminyum AlSi10Mg Malzemenin Özellikleri”, (Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, 2019).

Aqıl Azri, M., Mohd, S.S., Ariffin, A.K., Shahrum, A., “Microstructure, Mechanical Properties and Fatigue Behavior of AlSi10Mg: an Additive Manufacturing Material”, Center for Integrated Design for Advanced Mechanical System (PRISMA), Faculty of Engineering and Built Environment, University Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia Faculty of Engineering Technology, Universiti Malaysia Pahang, Tun Razak Highway, 26600 Gambang, Pahang, Malaysia. (2018).

Aran, A., “Döküm Teknolojisi İmal Usulleri Ders Notları”, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi (2007).

Arslan, Y.B., “Alüminyum Alaşımları”, <https://malzemebilimi.net> > Teknik Kütüphane (2016).

ASTM-International, ASTM Standard F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2012).

Ateş, F., “Grup ve Monoid Yapılarına Geometrik Yaklaşımlar”, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Matematik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2007).

Ay, O., “Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) – EDS Analizi ” KBT Metroloji ve Kalite Mühendisliği Çalışma Grubu, 2017

Bartkowiak, K., Ullrich, S., Frick, T. & Schmidt, M., “New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique”, Phys. Procedia, 12, pp.393-401 (2011).

Berkel, R., “Raft/Madix Polimerizasyonu için yeni bir Telekelik Fotoaktif Zincir Transfer Ajanı (Cta) Sentezi, Karakterizasyonu ve Kullanımı”, Harran Üniversitesi, 2023

Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., Clare, A., “Materials for additive manufacturing”, CIRP Annals – Manufacturing technology 66(2), 659-681 (2017).

Brandão, A.D., Gumpinger, J., Gschweitzl, M., Seyfert, C., Hofbauer, P., Ghidini, T., “Fatigue Properties Of Additively Manufactured AlSi10Mg – Surface Treatment Effect”, ESA/ESTEC, European Space Research and Technology Center, RUAG Schweiz AG, Space, Zurich, Switzerland, EOS GmbH Electro Optical Systems, Krailling / Munich, Germany (2017).

Brandl, E., Palm, F., Michailov, V., Viehweger, B. & Leyens, C., “Mechanical Properties of Additive Manufactured Titanium (Ti-6Al-4V) Blocks Deposited by a Solid-State Laser and Wire.”, Mater. Des. 32, pp.4665-4675.(2011).

Brice, C., Shenoy, R., Kral, M. & Buchannan, K., “Precipitation Behavior of Aluminum Alloy 2139 Fabricated Using Additive Manufacturing”, Mater. Sci. Eng. A, 648, pp.9-14 (2015).

Busisiwe, J. M., Ntombizodwa, R.M., Tshabalala, L.C., Popoola, P.A., “The Effect of Stress Relief on the Mechanical and Fatigue Properties of Additively Manufactured AlSi10Mg Parts”, Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Tshwane University of Technology, Staatsartillerie Rd, Pretoria West, Pretoria 0183, South Africa, National Laser Centre, Council for Scientific and Industrial Research, Meiring Naudé Road, Brummeria, Pretoria 0185, South Africa (2019).

Campbel, C. M., Robertson, E. F. and Williams, P. D., “On the Efficiency of some Direct Powers Groups”, (ed: L. G. Kovacs), Groups-Canberra 1989, Springer-Verlag, 106-113, (1990).

Campbell, J., “The New Metallurgy Of Cast Metals”, Butterworth Heinemann, United Kingdom (2003).

Carroll, B.E., Palmer, T.A., Besse, A.M., “Anisotropic Tensile Behavior of Ti-6Al-4V Components Fabricated With Directed Energy Deposition Additive Manufacturing”, *Acta Mater.*, 87, pp.309-320 (2015).

Cho, J. and Pride, S. J., “Embedding semigroups into groups, and asphericity of semigroups”, *Int. J. Algebra and Com.*, 3, 1-13, (1993).

Chsiwell, I. M., Collins, D.J. and Huebschmann, J., “Aspherical Group Presentations”, *Mathematische Zeitschrift*, 178 (1), 1-36, (1981).

Crow, T. J., “Did Homo Sapiens Speciate on they Chromosome? Psychology [online]”, (15 March 2001), [ftp://ftp.princeton.edu/harnad/ Psychology/ 2000. volume11/psyc. 00.11. 001. chromosomes.1.crow](ftp://ftp.princeton.edu/harnad/Psychology/2000.volume11/psyc.00.11.001.chromosomes.1.crow), (2000).

Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M.C., Duysak, A., “Rapid Prototyping Technologies and Application Areas”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31:53–70, (2013).

DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O. & Zhang, W., “Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure

and Properties”, Progress in Materials Science, 92, pp.112–224, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>. (2018).

Duman, B., Kayacan, M.C., “Doğrudan Metal Lazer Sinterleme / Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini”, Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 7:12-28, (2017).

Duman, B., Kayacan, M.C., “Seçmeli Lazer Sinterleme Tezgahı için İmalat Yazılımı Geliştirilmesi”, SDU international journal of technologies science (2016).

Durumetal kaplama, “Metal Nedir? Metatin Tarihi...”, [www.durumetalkaplama.com](http://www.durumetalkaplama.com). (2019).

E.F.Akbulut, I., Tröster, T., “Fracture Prediction of Additively Manufactured AlSi10Mg Materials”, Chair of Automotive Lightweight Design, Paderborn University, Paderborn 33098, Germany (2019).

Emmelman, C., Kranz, J., Herzog, Wycisk, D. & E., “Laser Additive Manufacturing of Metals”, in: V. Schmidt, M.R. Belegatis (Eds.), Laser Technology in Biomimetics, Springer, Heidelberg, pp.143-161 (2013).

Encyclopedia Britannica, “Slikon, Element, Atom, Properties, Uses, & Facts”, Encyclopedia Britannica/Arşiv bağlantısı (2021).

EOSM290 Metal Lazer Sinterleme Teknik Özellikler, ([na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms](http://na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms) 2023).

EPMA Raporu. <http://eklemeliimalat.info.tr/> (2018).

Eroğlu, G., Şahiner, M., “Dünyada ve Türkiye’ de Alüminyum”, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı (2018).

Eskier, U., “Alüminyum Nedir? Nerelerde Kullanılır”, [www.makaleler.com](http://www.makaleler.com). (2017).

Eskier, U., “Magnezyum Nedir? Özellikleri”, [www.makaleler.com](http://www.makaleler.com). (2017).

Eskier, U., “Silisyum Nedir? Özellikleri Ve Kullanımı”, [www.makaleler.com](http://www.makaleler.com). (2017).

Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., “Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, Springer, New York (2010).

Gouldan, I. P. and Jackson, D.M., Combinatorial enumeration, Singapore : John Willey and Sons, 41-55, (1983).

Greenwood, N.N., “Chemistry Of The Elements”, ISBN: 9780750633659. Yayınevi: Butterworth-Heinemann. sf: 356. (1997).

Gül, F., “AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi ”, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Malzeme Mühendisliği ( 2014 ).

Güngör, A., Atay, G., Sezgin, O., Tunçay, T., Şişmanoğlu, S., “Mg Elementinin AlSi10Mg Alaşımının Mikro Yapı Mekanik Özelliklerine Etkisi”, KARABÜK Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ve Teknoloji Fakültesi, Avcılar Demir Çelik Çekme San., Ms Sezgin Mühendislik, (8. Uluslar arası döküm kongresi), (2016).

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C., “Additive Manufacturing of Metals”, Acta Materialia, 117, pp.371–392, <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>. (2016).

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., “Additive Manufacturing of Metals”, Acta Materialia, 117,371-392 (2016).

Hiemenz.J., “Electron beam melting”, Advanced Materials & Processes, 165-3: 45-46, (2007).

Hitzler.L., Sert.E., ve diğ., “Direction and Location Dependency of Selective Laser Melted AlSi10Mg Specimens” (2017).

Horadam, K. J., “The Cohomology Ring of a Combinatorial Aspherical Group”, J.Austral. Math. Soc., 47, 453-457, (1990).

Isgor, “Alaşımlar”, <https://acikders.ankara.edu.tr> > resource > view (2019).

Kahramanzade, H., Sert, Y., Küçükömeroğlu, T., “Sürtünme Karıştırma İşleminin Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımının Tribolojik Özelliklerine Etkisi ”, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü (2021).

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

Kawamura, Y., “Ultralight Magnesium Alloy”, <https://uskudar.biz> > malzeme-bilgisi > magnezyum (2013).

Kayacan, M.Y., Yılmaz, N., “DMLS Eklemeli İmalatta Süreç ve Maliyet Modeli Geliştirilmesi”, Politeknik Dergisi, 22:763-70, (2019).

Kempana, K., Thijsb, L., Humbeeckb Van, J., Kruth, J.P., “Selective by Produced of AlSi10Mg Mechanical Features”, Leuven University, KU Leuven , Dept. \_ or mek . Engineering, Celestijnenlaan 300B 3001 Leuven , Belcika Leuven, University, KU Leuven , Dept. \_ Metallurgy And Mat. Engineering, Arenberg Castle Park 44 3001 Leuven , Belcika (2012).

Matsuda, K., Tada, S., Susuma, I., “Aluminium Alloys,” Science and Engineering of Light Metals, Proc. Congress’91, p. 899. (1991).

Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., Shindo, P.W., Medina, F.R. & Wicker, R.B., “Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies”, J. Mater. Sci. Technol., 28 (1), pp.1-14 (2012).

Nandan, R., DebRoy, T. & Bhadeshia, H.K.D.H., “Recent Advances in Friction-Stir Welding- Process, Weldment Structure and Properties”, Prog Mater Sci, 53 (6), pp.980–1023 (2008).

Ngnekou, J.N.D., Henaff, G., Nicolai, J., Ridosz, L., “Effect of As-Built and Ground Surfaces on the Fatigue Properties of AlSi10Mg Alloy Produced by Additive

Manufacturing”, Pprime Institute, ENSMA-CNRS-University of Poitiers, Avenue Clément Ader, Téléport, 86960 Chasseneuil-Futuroscope, France (2021).

Ngo, T.D., Imbalzano, G., Kashani, A., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., “Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges”, *Composites Part B: Engineering* 143, 172-196 (2018).

Noriko, R., Wang, W., Khamis, E., Moataz, M.A., “Selective Laser Melting of AlSi10Mg Alloy: Process Optimisation and Mechanical Properties Development”, School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK and School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK, (2014).

Özgen, İ., “Endüstri 4.0’ da Robotik ve Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Farklı Rekabet ve Üretim Senaryoları Altında Stratejik Analizi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, (2019).

Özsolak, O., “Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Kullanılan Malzemeler”, Cumhuriyet Üniversitesi (2019).

Özsoy. A.L., “AlSi10Mg Alaşımının Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilmesinde Üretim Parametrelerinin Malzeme Özelliklerine Etkisi” Erciyes Üniversitesi (2022).

Pantělejev, L., Štěpánek, R., Koutný, D., Paloušek, D. 2018. Mechanical Properties of AlSi10Mg Alloy Processed by SLE. *Materials Engineering-Materiálové Inžinierstvo (MEMI)*, 24(4), 108-114

Polmear, I.J., “Light Metals”, E. Arnorld Publishers, London (1981).

Redwood, B., Additive Manufacturing Technologies Overview. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-echechnologies-overview>.(2017).

Rima, A., *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol 4, New York: Pergamon, 45-52, (1978).

Romano, S., Brückner, A., Brandão, A., Gumpinger, J., Ghidini, T., Beretta, S., “Fatigue Properties of AlSi10Mg Obtained by Additive Manufacturing: Defect-Based Modelling and Prediction of Fatigue Strength”, Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering, Via La Masa 1, I-20156 Milan Italy, Institute for Materials Engineering, University of Kassel, Moenchebergstrasse 3, D-34109 Kassel Germany, ESA/ESTEC, European Space Research and Technology Center, Keplerlaan 1, NL 2200AG Noordwijk, Netherlands (2018).

Rysava, Z., Bruschi, S., Carmignato, S., Medeossi, F., Savio, E., Zanini, F., “Micro-Drilling and Threading of the Ti6Al4V Titanium Alloy Produced Through Additive Manufacturing”, *Procedia CIRP*, 46:583-6, (2016).

Segebade, E., Gerstenmeyer, M., Dietrich, S., Zanger, F., Schulze, V., “Influence of Anisotropy of Additively Manufactured AlSi10Mg Parts on Chip Formation During Orthogonal Cutting”, *Procedia CIRP*, 82: 113–118 (2019).

Silvestri, A.T., Astaritaa, A., El Hassanin, A., Manzo, A., Iannuzzo, U., Iannuzzo, G., Vincenzo, D.R., Acerra, F., Squillace, A., “Assessment of the Mechanical Properties of AlSi10Mg Parts Produced through Selective Laser Melting Under Different Conditions”, Department of Chemical, Materials and Industrial Production Engineering (DICMAPI), University of Naples “Federico II”, Piazzale Vincenzo Tecchio 80, 80125, Naples, Italy, University of Bergamo, Bergamo, Italy, 3DnA s.r.l., Viale Impero, 80038, Naples, Italy, Leonardo S.p.A., Naples, Italy (2020).

Simchi, A., Petzoldt, F., & Pohl, H., “On the Development of Direct Metal Laser Sintering for Rapid Tooling, 141, 319–328.” [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00283-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00283-8) (2003).

Siyambaş, Y., Turgut, Y., “Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımli Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü”, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği (2022).

Sürmen, H.K., “Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24:373-92 (2019).

Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (2012).

Strano, G., Surface Roughness Analysis, Modelling and Prediction in Selective Laser Melting, *Journal of Materials Processing Technology*, 213-4: 589-597, (2013).

Şendeniz, M., “Seçilen bir AlSiMg Alaşımının (AlMgSi0,5; ETİAL 60) Isıl İşlemlerle Özellik Değişimlerinin İncelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü* (2006).

Takezawa, A., Kobashi, M., “Design Methodology for Porous Composites with Tunable Thermal Expansion Produced by Multi-Material Topology Optimization and Additive Manufacturing”, *Composites Part B: Engineering*, 131, 21-29 (2017).

Talsad, “Dünya’ da ve Türkiye’de Alüminyum 2021 Yılı Raporu”, *Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği* (2021).

Townsend, A., Senin, N., Blunt, L., Leach, R. K., & Taylor, J. S., “Surface Texture Metrology for Metal Additive Manufacturing: a Review. *Precision Engineering*,46,34-47.” <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001> (2016).

Travitzky, N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert-Demut, I., Schlier, L., Schlordt, T., Greil, P., “Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials”, *Advanced Engineering Materials*, 16(6), 729-754 (2014).

Treguer, P., ve diğ., “The Silica Balance in the World Ocean; A Reestimate”, *American Association for the Advancement of Science (AAAS)*, sf: 375-379. doi: 10.1126/science.268.5209.375. | Arşiv Bağlantısı (2006).

Tumbleston, J.R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Janusziewicz, R., Johnson, A.R., Kelly, D., Chen, K., Pinschmidt, R., Rolland, J.P., Ermoshkin, A., Samulski, E.T., DeSimone, J.M., “Continuous Liquid Interface Production of 3D Objects”, *Science*, 347 (6228) , 1349-1352. (2015).

Varmus, T., Konecna, R., Nicoletto, G., “Microstructure and Fatigue Performance of Additively Manufactured”, *University of Zilina, Univerzita 1.01026 Zilina, Slovakia, University of Parma, Parco Area delle Science 181/A, Italy* (2021).

VATANSEVER, F., ERTÜRK, A.T., KARABAY, S., “Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile

İyileştirilmesi”, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2018).

Velleman, D. J., Kanıt Nasıl Yapılır, (Çev: M. Terziler ve T. Öner), Palme Yayıncılık, 43-54, (2008).

Von Ledebur, S. C., “Optimizing Knowledge Transfer by new Employees in Companies”, Knowledge Management Research & Practice, Advance online Publication, doi: 10.1057/palgrave.kmrp.8500141, (2007).

Wohlers, R., Wohlers, A., (2019).

Wolchik, S. A., West, S. G., Sandler, I. N., Tein, J., Coatsworth, D., Lengua, L., et al., “An Experimental Evaluation of Theory-Based Mother and Mother-Child Programs for Children of Divorce”, Journal of Consulting and Clinical Psychology, 68, 843-856, (2000).

Xometry, Binder jetting. <https://www.xometry.com/blog/3d-printing-processes> (2017).

Yurdakul, M., Tansel, Y., “Döküm Yöntemleri”, Modern imalatın prensipleri dördüncü baskıdan çeviri (2016).

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).

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).

Zygula, K., Bartłomiej, N., Pasiowiec, H., Szysiak, N., “Mechanical Properties and Microstructure of AlSi10Mg Alloy Obtained by Casting and SLM Technique”, Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science, AGH University of Science and Technology, Av. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Poland (2018).