

Seçici Lazer Ergitme Katmanlı İmalat Yöntemi ve Döküm İmalat Yöntemiyle Üretilmiş
AlSi10Mg Alaşımın Talaşlı İmalat Karakteristiklerinin İncelenmesi

İbrahim ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2025

Analysis of Machining Characteristics of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Selective Laser
Melting Additive Manufacturing and Casting Methods

İbrahim ŞEN

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

January 2025

Seçici Lazer Ergitme Katmanlı İmalat Yöntemi ve Döküm İmalat Yöntemiyle
Üretilmiş AlSi10Mg Alaşımın Talaşlı İmalat Karakteristiklerinin İncelenmesi

İbrahim ŞEN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğı Uyarınca

Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı

Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU

Ocak 2025

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi İbrahim ŞEN'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Seçici Lazer Ergitme Katmanlı İmalat Yöntemi ve Döküm İmalat Yöntemiyle Üretilmiş AlSi10Mg Alaşımın Talaşlı İmalat Karakteristiklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU

İkinci danışman :-

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU

Üye: Doç. Dr. Ayhan ETYEMEZ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SERT

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Seçici Lazer Ergitme Katmanlı İmalat Yöntemi ve Döküm İmalat Yöntemiyle Üretilmiş AlSi10Mg Alaşımın Talaşlı İmalat Karakteristiklerinin İncelenmesi ” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 03/01/2025

İbrahim ŞEN

İmza

ÖZET

Bu tezde, seçici lazer ergitme (SLM) katmanlı imalat yöntemi ve kum kalıba döküm yöntemiyle imal edilmiş AlSi10Mg deney numunelerinin frezeleme yöntemiyle işlenmesinde kesme kuvvetleri, kesici takım aşınması ve talaş formları incelenmiştir. Hem kum kalıba dökülerek hem de seçici lazer ergitme katmanlı imalat yöntemi kullanılarak beşer adet numune üretilmiş ve toplamda on adet numunenin farklı kesme hızlarında ve farklı eksenel derinlik değerleriyle yapılan kesme testlerinde dış başına ilerleme ve radyal kesme derinliği sabit tutulmuştur. SLM numuneler, yoğun ve ince taneli mikro yapıları nedeniyle kesme kuvvetlerinin daha yüksek olmasına ve bu durumun yüksek yüzey pürüzlülüğüne yol açmasına rağmen, talaşlar daha kısa ve düzenli oluşmaktadır, bu da işleme sırasında talaş yapışmasını azaltır ve talaş kontrolünü kolaylaştırır. Döküm numuneler ise daha yumuşak ve heterojen yapıları sayesinde daha düşük kesme kuvvetlerine sahiptir, bu da daha uzun ve sürekli talaşlar üretir ve genellikle daha homojen bir yüzey kalitesi sağlar. Hem döküm hem de SLM numunelerde, iş mili devir sayısının artması ve kesme derinliğinin azalması ile kesme kuvvetleri azalırken, talaş yapışması ve takım aşınması da önemli ölçüde düşmektedir.

Anahtar Kelimeler: AlSi10Mg, Katmanlı İmalat, Seçici Lazer Ergitme, Takım Aşınması, Kesme Kuvvetleri

SUMMARY

In this thesis, the cutting forces, tool wear, and chip forms were analyzed in the milling process of AlSi10Mg test samples manufactured by selective laser melting (SLM) additive manufacturing method and sand casting. Five samples each were produced using both sand casting and selective laser melting additive manufacturing methods, and a total of ten samples were tested under various cutting speeds and axial depth of cut values while keeping the feed per tooth and radial depth of cut constant. SLM samples, due to their dense and fine-grained microstructures, exhibit higher cutting forces which lead to higher surface roughness; however, they form shorter and more regular chips, which reduces chip adhesion during machining and facilitates chip control. On the other hand, cast samples, with their softer and more heterogeneous structures, have lower cutting forces, producing longer and continuous chips and generally resulting in more uniform surface quality. In both cast and SLM samples, increasing spindle speeds and decreasing cutting depths lead to reductions in cutting forces, chip adhesion, and tool wear.

Keywords: AlSi10Mg, Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Milling, Tool Wear, Cutting Forces

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, yolumu aydınlatan danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Alper Sofuoğlu'na ve çalışmamızın başarılı bir şekilde tamamlanması için özverili katkılarıyla yanımda olan Dr. Öğretim Üyesi Abdullah Sert'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Özellikle, test kesimleri için TUSAŞ Akıncı Tesisleri'nde bulundukları esnada gerçekleşen hain terör saldırısını yaşamalarına rağmen, büyük bir kararlılık ve fedakârlık göstererek yarım kalan testler için tekrar gelmeleri, hem bilimsel hem de insani anlamda unutulmaz bir örnek teşkil etmiştir.

Bu süreçte bana her zaman destek olan, sevgisi ve anlayışıyla güç veren eşim Daria Şen'e, yoğun çalışmalar sırasında sabırla yanımda olan sevgili çocuklarım Ali Murat ve Emir'e minnettarım.

Bu zorlu süreci birlikte aşmamda katkısı olan herkese gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Katmanlı İmalat	3
2.1.1. Tarihçe	3
2.1.2. Kullanım alanları	3
2.1.3. Katmanlı imalat yöntemleri	4
2.1.3.1. <u>SLM katmanlı imalat yöntemi</u>	5
2.1.4. Katmanlı imalatla imal edilen parçaların kalitesini etkileyen etmenler	6
2.1.5. Katmanlı imalatın avantajları ve dezavantajları	7
2.2. Alüminyum	8
2.2.1. Alüminyum ve özellikleri	8
2.2.2. AlSi10Mg alaşımı ve önemi	9
2.2.3. AlSi10Mg kullanım alanları	10
2.2.4. AlSi10Mg alaşımının işlenebilirliği	12
2.3. Frezeleme Talaşlı İmalat Yöntemi.....	13
2.3.1. Tanımlar.....	14
2.3.2. Frezelemede talaş kaldırma işlemi.....	16
2.3.3. Eğik ve ortogonal kesme	17
2.3.4. Takım aşınması.....	19
2.3.4.1. <u>Bosluk Yüzeyi Aşınması</u>	19
2.3.4.2. <u>Krater Aşınması</u>	19
2.3.4.3. <u>Talaş Yığılması</u>	20

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.4. Literatür Çalışmaları	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Freze Tezgâhı.....	27
3.2. Test Numuneleri	28
3.3. Kesici Takım	30
3.4. Veri Toplama.....	31
3.5. Sertlik Ölçümleri	33
3.6. Test Parametreleri	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	34
4.1. İşlenmemiş Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Analizler.....	34
4.1.1. Mikrosertlik test sonuçları	34
4.1.2. Mikroyapı analizi.....	34
4.2. Kesme Kuvvetlerinin Analizi	36
4.3. Takım Aşınmalarının Analizi	41
4.4. Talaş Analizi	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	49

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. SLM katmanlı imalat yönteminin şematik gösterimi (Kempen vd.,2012).....	6
2.2. Boksit cevheri (Eskier, 2023).	9
2.3. Örnek otomotiv ve havacılık parçaları. a) otomobil direksiyon dişli kutusu (Pieklo vd., 2021) b) havacılık jet motoru aksesuar dişli kutusu (Magerramova vd., 2022).....	11
2.4. Deformasyon bölgeleri	17
2.5. Ortogonal kesme modeli.....	18
2.6. Eğik kesme modeli	18
2.7. Boşluk yüzeyi aşınması	19
2.8. Krater aşınması	20
2.9. Talaş yığılması.....	20
3.1. Freze tezgahı.....	27
3.2. Test numune ölçüleri (Ölçüler mm'dir).....	28
3.3. Nikon SLM 280 3 boyutlu yazıcı (Nikon SLM Solutions 2024)	29
3.4. Katmanlı imalat ile üretilen test numuneleri üretim aşaması	30
3.5. Kesici takım görseli (Ölçüler mm'dir)	30
3.6. Kistler 9257B dinamometre	31
3.7. Kesme test düzeneği	32
3.8. CAM yazılımı test düzeneği şematik gösterimi	32
3.9. Mikrosertlik cihazı.....	33
4.1. Döküm ve SLM ile üretilen numunelerin farklı büyütme oranlarında mikroyapı görüntüleri	35
4.2. Kesme kuvvetleri kesme derinliği ilişkisi	37
4.3. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden kesme derinliği ilişkisi	37
4.4. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden kesme derinliği ilişkisi	38
4.5. Kesme kuvvetleri iş mili devir sayısı ilişkisi.....	39
4.6. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden iş mili devir sayısı ilişkisi.....	40
4.7. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden iş mili devir sayısı ilişkisi.....	40
4.8. Döküm numunelerin işlenmesi sonucu takım aşınmaları (x20)	42
4.9. SLM numunelerin işlenmesi sonucu takım aşınmaları (x20).....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ**Şekil****Sayfa**

4.10. Döküm numunelerin işlenmesi sonucu oluşan talaş şekilleri (x20)	45
4.11. SLM numunelerin işlenmesi sonucu oluşan talaş şekilleri (x20)	46



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Freze tezgahı özellikleri.....	27
3.2. Test numuneleri kimyasal kompozisyonları.....	28
3.3. Katmanlı imalat üretim parametreleri	30
3.4. Kesme parametreleri.....	33
4.1. Mikrosertlik ölçüm sonuçları	34



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
μ	Sürtünme Katsayısı
a_e	Radyal Kesme Derinliği (mm)
A_k	Kayma Düzleminin Alanı (mm ²)
A_o	Kesilmemiş Talaş Kesiti Alanı (mm ²)
a_p	Eksenel Kesme Derinliği (mm)
D	Kesici Çapı (mm)
F	İlerleme Hızı (mm/dk)
F_e	Eksenel Kesme Kuvveti (N)
F_k	Kayma Kuvveti (N)
F_{Nk}	Kayma Kuvvetine Dik Kuvvet (N)
F_{Ns}	Sürtünme Kuvvetine Dik Kuvvet (N)
F_r	Radyal Kesme Kuvveti (N)
F_s	Sürtünme Kuvveti (N)
F_t	Teğetsel Kesme Kuvveti (N)
f_z	Diş Başına İlerleme Hızı (mm/diş)
n	Devir sayısı (devir/dk)
r	Talaş Oranı
R_t	En Fazla Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
R_z	En Fazla Yüzey Pürüzlülüğü Ortalaması (μm)
t_c	Kesilmiş Talaş Kalınlığı (mm)
t_o	Kesilmemiş Talaş Kalınlığı (mm)
V_c	Çevresel Kesme Hızı (m/dk)
z	Kesici Diş Sayısı (adet)
α	Talaş Açısı ($^\circ$)
β	Sürtünme Açısı ($^\circ$)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler****Açıklama** γ

Boşluk Açısı (°)

 τ Kayma Gerilmesi (N/mm²) ϕ

Kayma Açısı (°)

 Ω

Kesme Kenarı Eğim Açısı (°)



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

Açıklama

BJ	Yapıştırıcı Püskürtme (Binder Jetting)
EBM	Elektron Işını ile Ergitme (Electron Beam Melting)
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
LMD	Lazer Metal Biriktirme (Lazer Metal Deposition)
EDS	Enerji Dağılımlı Spektroskopi (Energy Dispersive Spectroscopy)
LMD	Lazer Metal Biriktirme (Lazer Metal Deposition)
SLS	Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)
XRF	X-Işını Işıldaması (X-ray Fluorescence)
SLM	Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)
SLS	Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)
STL	Standart Üçgen Dili (Standart Triangle Language)
CAM	Bilgisayar Destekli Üretim (Computer Aided Manufacturing)
MQL	Minimum Miktarda Yağlama (Minimum Quantity Lubrication)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Teknolojinin ve endüstriyel gereksinimlerin gelişimi, daha hafif, dayanıklı ve karmaşık geometrilere sahip bileşenlerin üretimini zorunlu kılmıştır (Kruth vd., 2014). Özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayileri gibi sektörlerde hem ağırlık azaltımı hem de yüksek mekanik performans talepleri giderek artmaktadır (Gibson vd., 2010). Geleneksel üretim yöntemleri, yüksek malzeme israfı, uzun üretim süreçleri ve sınırlı tasarım olanakları nedeniyle bu gereksinimlere yeterli cevap verememektedir. Bu bağlamda, Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing, AM) yöntemleri, malzeme verimliliği ve tasarım esnekliği ile yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Huang vd., 2015). Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting, SLM) gibi modern eklemeli imalat teknolojileri, malzemeyi katman katman işleyerek karmaşık geometrilerde hafif ve dayanıklı yapılar üretme olanağı sunar (DebRoy vd., 2018).

AlSi10Mg, SLM süreçlerinde sıklıkla kullanılan bir alüminyum alaşımıdır. Alaşımın içeriğindeki silikon (%10) ve magnezyum (%0,3–0,5), hem döküm hem de lazer tabanlı üretim süreçlerinde iyi akışkanlık ve üstün mekanik özellikler sağlar. SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg parçalar, döküm yöntemiyle üretilenlere kıyasla daha ince taneli, anizotropik ve yüksek dayanıklılığa sahip bir mikro yapı sergiler (Calignano vd., 2017). Bu anizotropik yapı, özellikle mekanik özellikler ve işlenebilirlik açısından önemlidir (Thijs vd., 2013). Ancak, bu benzersiz mikro yapının işlenmesi sırasında kullanılan kesme parametrelerinin, işlem verimliliği ve yüzey kalitesi üzerinde büyük bir etkisi vardır. Eklemeli imalatın avantajlarına rağmen, üretilen parçaların genellikle son işlem gerektiren yüzey pürüzlülüğü ve geometrik hassasiyet problemleri bulunmaktadır (Özsoy vd., 2024; Siyambaş vd., 2022). Yüzey pürüzlülüğü, özellikle yorulma dayanımı gibi fonksiyonel özellikleri etkileyebilir (Sames vd., 2016).

Bu çalışmada, SLM ve kum kalıba döküm yöntemleriyle üretilen AlSi10Mg malzemelerin frezeleme işlemi sırasında işlenebilirlik davranışları karşılaştırılacaktır. Frezeleme sırasında oluşan kesme kuvvetleri, takım aşınması ve talaş morfolojisi gibi talaşlı

imalat karakteristikleri detaylı bir şekilde incelenerek, bu iki üretim yönteminin avantaj ve dezavantajları ortaya konulacaktır. Çalışmanın özgün yönü hem geleneksel hem de ileri üretim teknolojilerini işlenebilirlik açısından kapsamlı bir şekilde karşılaştırması ve özellikle SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının frezeleme davranışına dair literatürde sınırlı olan verileri genişletmesidir. Bu kapsamda, modern üretim ihtiyaçlarını karşılayacak uygun tasarım ve işlem yöntemlerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

SLM ile üretilmiş AlSi10Mg parçaların frezelenmesi, özellikle hassasiyet ve yüzey kalitesi gereksinimlerini karşılamak açısından kritik bir adımdır. Kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği gibi parametrelerin doğru seçimi hem işlem süresini hem de parçanın fonksiyonel özelliklerini optimize etmek için gereklidir. Bununla birlikte, frezeleme sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri, malzemenin sertliği ve mikro yapısından büyük ölçüde etkilenir (Kalpakjian ve Schmid, 2009). Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, SLM gibi ileri üretim teknolojileri, yalnızca daha karmaşık ve detaylı geometrilere sahip parçaların üretimine olanak tanımakla kalmaz, aynı zamanda bu parçaların hafiflik ve dayanıklılık gibi kritik tasarım isterlerini de karşılayabilir. Bu teknoloji, havacılık sektöründe yüksek dayanım ve hafiflik gereksinimlerini karşılayan karmaşık yapısal bileşenlerin, medikal sektörde hastaya özel ve biyouyumlu implantların ve otomotiv sektöründe hem yakıt verimliliğini artıran hem de performansı optimize eden parçaların üretimini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, SLM ile üretilen parçaların işlenebilirliğine dair eksik olan literatürü genişletirken, bu teknolojinin endüstriyel uygulamalarda kullanımını optimize etmek için değerli bilgiler sunacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Katmanlı İmalat

Katmanlı İmalat (Additive Manufacturing, AM), geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak dijital modellerden hareketle malzemeyi katman katman ekleyerek üç boyutlu nesneler üretir. Bu teknoloji, karmaşık geometrilere sahip hafif ve dayanıklı parçaların üretimini mümkün kılarak özellikle havacılık, otomotiv ve tıp sektörlerinde devrim yaratmıştır (Hull, 1987). İlk ticari uygulamaları, stereolitografi (SLA) yönteminin geliştirilmesiyle başlamış ve 1990'larda metal ve seramik gibi malzemelerin kullanılmaya başlanmasıyla genişlemiştir (Kodama, 1981).

2.1.1. Tarihçe

Katmanlı imalatın teorik temelleri 1970'lere kadar uzansa da, 1980'lerde dijital üretim süreçlerinin gelişmesiyle dikkat çekmiştir. İlk uygulamalardan biri, Hideo Kodama'nın fotopolimer reçine kullanarak katmanlı yapılar oluşturmalarıdır. Daha sonra, Charles Hull tarafından stereolitografi teknolojisi geliştirilmiş ve 1987'de ticari olarak kullanıma sunulmuştur (Kruth vd., 2014). Metal tozlarının lazerle ergitilmesiyle çalışan Lazer Toz Yatağı Füzyonu (L-PBF) ve Elektron Işını Ergitme (EBM) gibi yöntemler ise 2000'li yıllarda yaygınlaşmıştır (Calignano vd., 2017). Türkiye'de ise katmanlı imalatın tanınırlığı ve uygulanabilirliği 2010'lu yıllarda hız kazanmıştır (Akyıldız, 2020).

2.1.2. Kullanım alanları

Katmanlı imalat teknolojisi, farklı sektörlerde çok çeşitli uygulama alanları bulmaktadır:

- **Havacılık ve Uzay:** Uçak yapılarında ve roket motorlarında kullanılan hafif ve karmaşık tasarımlı parçaların üretiminde yaygın olarak tercih edilir. Bu yöntem,

özellikle ağırlık azaltımı ve yakıt tasarrufu gibi avantajlarıyla dikkat çeker (Aktimur ve Gökpınar, 2015).

- **Otomotiv:** Prototipleme ve özel bileşenlerin üretimi için idealdir. Otomotiv sektöründe, ağırlığı azaltarak yakıt tasarrufu sağlamak ve performansı artırmak için sıklıkla kullanılır (Özel vd., 2020).
- **Tıp ve Dişçilik:** Kişiye özel implantlar, protezler ve medikal cihazların üretiminde önemli bir rol oynar. Türkiye'de, özellikle diş hekimliğinde 3D yazıcıların kullanım oranı hızla artmaktadır (Tian vd., 2021).
- **Savunma Sanayii:** İnsansız hava araçları (İHA) ve diğer askeri ekipmanlarda kullanılan kritik parçaların hafif ve dayanıklı şekilde üretilmesini sağlar. Bu teknoloji, savunma sektöründe giderek artan bir öneme sahiptir (Herzog vd., 2016).
- **Eğitim ve Araştırma:** Prototipleme, tasarım simülasyonları ve ürün geliştirme süreçlerinde hem eğitim hem de araştırma projelerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Ngo vd., 2018).

2.1.3. Katmanlı imalat yöntemleri

Katmanlı imalat, kullanılan malzeme ve süreçlere bağlı olarak çeşitli yöntemler sunar. En yaygın yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

Stereolitografi (SLA): Fotopolimer reçinelerin UV ışığı kullanılarak sertleştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntem, yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi gerektiren uygulamalar için uygundur.

Seçici Lazer Sinterleme (SLS): Toz halindeki malzemelerin lazer ışını ile sinterlenmesiyle parçalar üretilir. Plastik ve seramik gibi malzemeler için tercih edilen bir yöntemdir.

Füzyon Biriktirme Modelleme (FDM): Eritilmiş termoplastik filamentlerin katmanlar halinde biriktirilmesi ile çalışır. Özellikle düşük maliyetli prototip üretimi için idealdir.

Seçici Lazer Ergitme (SLM): Metal tozlarının lazerle tamamen ergitilmesiyle katı bir yapı oluşturulur. Yüksek dayanım gerektiren metal parçaların üretiminde kullanılır.

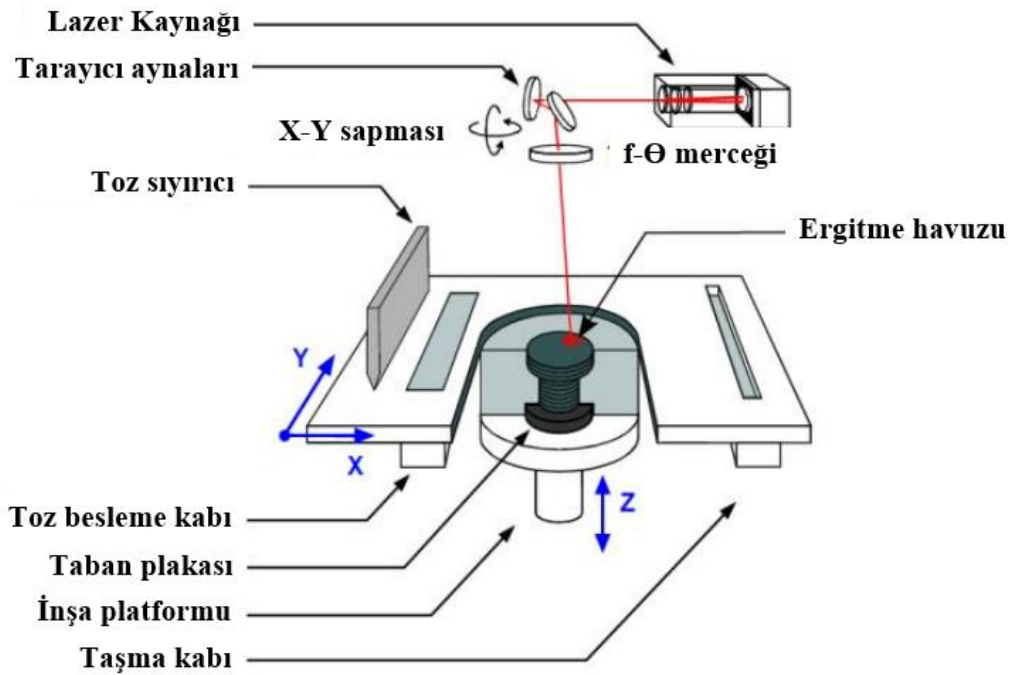
Elektron Işını Ergitme (EBM): Metal tozlarının bir elektron ışını yardımıyla ergitildiği bu yöntem, titanyum gibi yüksek dayanımlı malzemelerin üretimi için uygundur.

Doğrudan Enerji Biriktirme (DED): Metal tozları veya telleri lazer yardımıyla eriterek katmanlar oluşturur. Büyük ölçekli metal parçaların onarımı veya özelleştirilmiş üretimi için tercih edilir.

Bu yöntemler, uygulama alanına ve ihtiyaçlara göre özelleştirilebilen çözümler sunar.

2.1.3.1. SLM katmanlı imalat yöntemi

Seçici lazer ergitme (SLM), metal tozlarının lazer yardımıyla tamamen ergitilerek üç boyutlu bir yapı oluşturduğu ileri düzey bir katmanlı imalat yöntemidir (Şekil 2.1). Bu yöntem, metal tozunu lazerle ergiterek ardışık katmanlar halinde birleştirir ve nihayetinde katı bir parça oluşturur (Herzog vd., 2016). Yüksek yoğunluklu lazer ışını malzemeyi seçici olarak ergitir ve daha sonra katılaştırır. Bu süreç, AlSi10Mg gibi hafif alaşımların üretiminde özellikle etkili bir yöntem olarak dikkat çeker (Trevisan vd., 2017).



Şekil 2.1. SLM katmanlı imalat yönteminin şematik gösterimi (Kempen vd.,2012)

SLM yönteminin en büyük avantajlarından biri, kompleks geometrilerin üretimine olanak tanınmasıdır. Geleneksel imalat yöntemlerinde üretilmesi zor veya imkansız olan karmaşık yapılar, SLM teknolojisiyle kolaylıkla üretilebilir (Hitzler vd., 2020). Bunun yanı sıra, SLM düşük malzeme israfı ve yüksek hassasiyet sunar, bu da havacılık ve tıp gibi endüstrilerde geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlar (Thijs vd., 2013; Prashanth, 2020).

Bu yöntemle üretilen AlSi10Mg alaşımları, hafiflik ve dayanım gibi avantajlarıyla otomotiv ve havacılık endüstrilerinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, parçaların mikroyapısı ve mekanik özellikleri, lazer parametreleri ve ısı işlemler gibi birçok faktöre bağlı olarak değişim gösterebilir (Clement vd., 2022). İsrafı önleme ve kompleks geometriler oluşturma kabiliyeti, endüstride geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

2.1.4. Katmanlı imalatla imal edilen parçaların kalitesini etkileyen etmenler

Katmanlı imalat yöntemleriyle üretilen parçaların kalitesi, bir dizi kritik faktöre bağlıdır. Bu faktörler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır:

İşlem Parametreleri: Lazer gücü, tarama hızı ve katman kalınlığı gibi parametreler, parçanın nihai yoğunluğunu, mekanik özelliklerini ve mikroyapısını önemli ölçüde etkiler. Optimal lazer gücü ve tarama stratejisi kullanıldığında, parça içinde porozite oranı minimize edilir (Kruth vd., 2014).

Toz Özellikleri: Tozun partikül boyutu, şekli ve akışkanlığı, malzemenin katmanlar arasındaki bağlanabilirliğini etkiler. Sferik toz partikülleri daha iyi paketleme yoğunluğu ve daha düşük porozite oranı sağlar (Averardi vd., 2020).

Tarama Stratejisi: Paralel ve çapraz tarama stratejileri, iç gerilmeleri ve parça bozulmalarının azaltılmasında kritik bir rol oynar. Tarama stratejisinin optimize edilmesi, hem parça dayanımı hem de boyutsal hassasiyet açısından faydalıdır (Hajnys vd., 2020).

Isıl İşlem: Üretim sonrası uygulanan ısıtma işlemleri, iç gerilmeleri azaltır ve mekanik özellikleri iyileştirir. Örneğin, gerilim giderme tüm SLM parçaları için önerilen bir uygulamadır (DebRoy vd., 2018).

Çevresel Koşullar: Ortam şartları, oksijen seviyesi ve nem miktarı, parça kalitesini etkileyebilir. Düşük oksijen ortamında üretim, oksidasyonu azaltarak parça dayanımını artırır (Baroutaji vd., 2023).

2.1.5. Katmanlı imalatın avantajları ve dezavantajları

Katmanlı imalatın avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Tasarım Esnekliği: Karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimini kolaylaştırır. Geleneksel yöntemlerle yapılamayan içi boş yapılar, SLM teknolojisiyle mümkün hale gelir (Vayre vd., 2012).

Malzeme Tasarrufu: Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine göre düşük malzeme israfı sağlar. Bu durum, hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlar (Gibson vd., 2010, Maware vd., 2024).

Kişiselleştirme: Tıp endüstrisinde bireysel ihtiyaçlara özel çözümler sunar. Örneğin, diş implantları veya protezlerin hastaya özel tasarlanması mümkün olur (Raheem vd., 2021).

Prototipleme Hızı: Hızlı prototipleme süreçleri, tasarım döngüsünü hızlandırarak zamandan tasarruf sağlar (Rayna ve Striukova, 2016).

Katmanlı imalatın dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Yüksek Maliyet: Yüksek ilk yatırım maliyetleri, bu teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlar. Özellikle yüksek kaliteli metal tozları ve enerji ihtiyacı, toplam maliyeti artırır.

Üretim Hızı: Geleneksel seri imalat yöntemlerine göre daha yavaştır. Bu durum, büyük ölçekli üretimlerde dezavantaj oluşturur (Akgümüş Gök vd., 2023).

Yüzey Kalitesi: Parçalar, genellikle ek finisaj işlemleri gerektirir. Yüzeyde oluşan pürüzlülük, nihai üretim kalitesini etkileyebilir (Jiménez vd., 2021; Shanmugam vd., 2021). Bu avantajlar ve dezavantajlar, katmanlı imalatın seçimi sırasında dikkatlice değerlendirilmelidir.

2.2. Alüminyum

2.2.1. Alüminyum ve özellikleri

Alüminyum, hafifliği, yüksek korozyon direnci ve iyi elektrik iletkenliği sayesinde modern endüstrinin en önemli malzemelerinden biri haline gelmiştir. Ancak saf alüminyum doğada bulunmaz; boksit cevheri işlenerek elde edilir. Bu süreç, Bayer Prosesi olarak bilinir ve boksitin sodyum hidroksit ile reaksiyona sokulmasıyla alüminyum hidroksit elde edilir. Alüminyum hidroksit, ısıtılarak alüminyum oksit (alümina) formuna dönüştürülür ve son aşamada elektroliz yöntemiyle saf alüminyum üretilir (Seetharaman vd., 2013). Şekil 2.2’de boksit cevheri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Boksit cevheri (Eskier, 2023).

19. yüzyılda endüstriyel olarak saf alüminyum üretiminin başarılmaması, havacılık ve otomotiv sektörlerinde devrim niteliğinde ilerlemeler sağlamıştır. Alüminyum, yüksek mukavemeti ve hafifliği sayesinde çelik ve bakır gibi geleneksel malzemelere üstünlük sağlamış, özellikle ağırlık tasarrufu gerektiren uygulamalarda tercih edilir (Davis, 1993).

2.2.2. AlSi10Mg alaşımı ve önemi

AlSi10Mg, alüminyumun silisyum ve magnezyum ile alaşımlanması sonucu elde edilen, hafifliği ve mekanik dayanımı ile öne çıkan bir malzemedir. Alaşımın kimyasal bileşiminde yaklaşık %90 alüminyum, %9 silisyum ve %1 magnezyum bulunur. Alüminyum, alaşımın hafif ve korozyona dayanıklı olmasını sağlarken, silisyum sertlik ve çekme dayanımını artırır. Magnezyum ise alaşıma süneklik ve korozyon direnci kazandırarak döküm özelliklerini iyileştirir (ASM International, 1990). Ayrıca, silisyum ve magnezyumun özel katkıları, alaşımı hem geleneksel imalat hem de eklemeli imalat süreçlerinde kullanılabilir ideal bir malzeme haline getirir (DebRoy vd., 2018).

AlSi10Mg'nin mikroyapısı, alaşımın üretim sırasında uygulanan soğuma hızı ve element oranlarına bağlı olarak değişir. İnce ve homojen bir mikroyapı, alaşıma daha yüksek dayanım ve süneklik kazandırır. Silisyumun katkısı, çekme dayanımı ve sertliği önemli ölçüde artırarak alaşımı yüksek yük taşıma kapasitesine sahip uygulamalarda kullanılabilir hale getirir. Magnezyum ise kırılma riskini azaltır ve karmaşık geometrilere sahip bileşenlerin üretimini kolaylaştıran akıcılığı artırır (Hernandez vd., 2017). Bu özellikleri

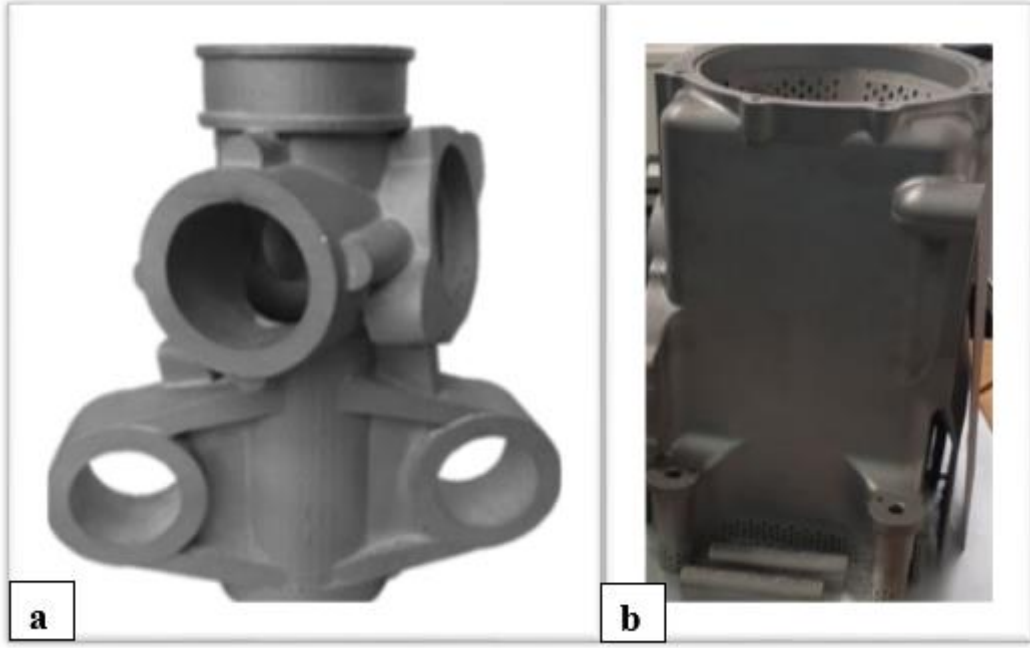
nedeniyle AlSi10Mg, özellikle taşımacılık ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak tercih edilir. Alüminyumun düşük yoğunluğu, çelik gibi metallerle karşılaştırıldığında AlSi10Mg'yi daha hafif bir alternatif haline getirir. Bu özellik, taşımacılık ve havacılıkta yakıt tasarrufu sağlama ve performansı artırma açısından önemli avantajlar sunar (Totten ve MacKenzie, 2003; Kahramanzade vd., 2021).

Alaşımın korozyon direnci, alüminyumun doğal pasifleşme özelliği ve magnezyumun bu direnci artırıcı etkisiyle daha da güçlenir. Bu sayede AlSi10Mg, hem sert çevre koşullarında hem de medikal uygulamalarda dayanıklılığını kanıtlamıştır. Medikal sektörde, biyouyumlu implantlar ve protezlerin üretiminde sıklıkla kullanılır. Otomotiv sektöründe ise hafif ve dayanıklı parçaların geliştirilmesi için tercih edilmektedir (Herzog vd., 2016). Havacılık ve uzay sektörlerinde ise kritik öneme sahip bileşenlerin üretiminde AlSi10Mg'nin özelliklerinden yararlanılır.

Eklemeli imalat teknolojileri, AlSi10Mg'nin kullanım alanlarını daha da genişletmiştir. 3D yazıcılar sayesinde karmaşık geometrilere sahip parçalar, malzeme israfı olmadan ve geleneksel üretim yöntemlerinin sınırlarını aşarak üretilebilir. Bu yöntem, AlSi10Mg'nin prototipleme ve özel tasarım gerektiren uygulamalarda öncelikli olarak tercih edilmesine olanak tanır. Hafiflik, dayanım, işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde AlSi10Mg, otomotivden havacılığa, medikal sektörden uzay endüstrisine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

2.2.3. AlSi10Mg kullanım alanları

Alüminyum ve AlSi10Mg alaşımı, hafiflik, dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi üstün özellikleri sayesinde modern endüstrinin pek çok alanında vazgeçilmez bir rol oynamaktadır (Şekil 2.3). Bu malzemeler, özellikle otomotiv, havacılık, inşaat, elektronik, ambalaj ve enerji gibi sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Otomotiv sektöründe, motor blokları, silindir kapakları, jantlar ve gövde panellerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Hafifliği sayesinde araç ağırlığını azaltarak yakıt tasarrufu ve performans artışı sağlaması, alüminyum alaşımlarının otomotiv sektöründe öncelikli tercih edilmesine neden olmaktadır (ASM International, 1990).



Şekil 2.3. Örnek otomotiv ve havacılık parçaları. a) otomobil direksiyon dişli kutusu (Pieklo ve Garbacz-Klempka, 2021) b) havacılık jet motoru aksesuar dişli kutusu (Magerramova vd., 2022)

Havacılık sektörü, alüminyum ve $AlSi10Mg$ 'nin dayanıklılık ve korozyon direnci gibi özelliklerinden faydalanır. Uçak gövdeleri, kanatlar ve şasi elemanlarının üretiminde bu malzemeler sıklıkla kullanılarak, uçakların hafifliği korunurken güvenlik standartları da artırılmaktadır (Süt vd., 2019). İnşaat sektöründe ise pencere profilleri, cephe kaplamaları gibi yapı bileşenlerinde alüminyumun dayanıklılığı ve estetik görünümü bir araya getirilmektedir.

Elektronik sektöründe, alüminyum alaşımlarının termal iletkenlik ve hafiflik gibi özelliklerinden yararlanılmaktadır. Bilgisayar kasaları ve soğutucular gibi bileşenlerde kullanılan alüminyum, cihazların performansını artırırken toplam ağırlıklarını da azaltmaktadır (Davis, 1993). Ambalaj sektöründe, alüminyumun esnekliği ve korozyon direnci sayesinde içecek kutuları ve alüminyum folyolar yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu malzemeler, gıda ürünlerini koruma ve uzun raf ömrü sağlama açısından büyük bir avantaj sunar.

Enerji sektöründe ise alüminyum, elektrik hatları ve güneş panellerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Elektrik hatlarında hafifliği ve yüksek iletkenliği sayesinde enerji kaybını en aza indirirken, güneş panellerinde dayanıklılığı ve yansıtıcı özellikleri ile enerji verimliliğini artırır (Morrow vd., 2007). Alüminyum ve AlSi10Mg'nin bu kadar geniş bir kullanım alanına sahip olması, modern endüstriyel uygulamalardaki çok yönlülüğünü ve önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

2.2.4. AlSi10Mg alaşımasının işlenebilirliği

AlSi10Mg alaşımı, içeriğinde bulunan alüminyum-silisyum (Al-Si) fazı ve magnezyum elementi sayesinde yüksek dayanım ve sertlik sunarken, bu özellikler malzemenin işlenebilirliğini belirgin bir şekilde zorlaştırmaktadır. Özellikle Al-Si fazı, malzemeye mekanik mukavemet ve aşınma direnci kazandırırken, eksiltmeli imalat süreçlerinde takım aşınmasını hızlandırarak üretim süreçlerini karmaşık hale getirebilir (Davis, 1993). Magnezyum elementi ise alaşımın korozyon direncini artırırken, alaşıma süneklik kazandırarak çekme dayanımına katkı sağlar. Ancak, bu elementin varlığı alaşımın döküm ve işleme sırasında mikro yapısında farklılıklar oluşturabilir (ASM International, 1990).

Eksiltmeli imalat yöntemlerinde, düşük soğutma oranları nedeniyle iri taneli yapı oluşumu sıklıkla gözlenmektedir. Bu iri taneli mikro yapı, malzemenin mekanik özelliklerinde bozulmalara yol açabilir ve çatlak oluşum riskini artırabilir. Soğutma oranlarının kontrol edilmesi, AlSi10Mg alaşımında daha ince ve homojen taneli bir yapının elde edilmesine olanak sağlar. Bu durum, mekanik dayanımı artırırken, malzemenin işlenebilirliğini de bir miktar iyileştirebilir (Morrow vd., 2007; Aboulkhair vd., 2017). Katman kalınlığı ve enerji aktarımı gibi üretim parametrelerinin değiştirilmesi, mikro yapı üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin, yüksek enerji yoğunluğu ve ince katman kalınlığı, homojen bir mikro yapıya katkı sağlayarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesini destekler. Ancak, bu üretim parametrelerinin optimize edilmemesi durumunda, mikro yapıda heterojenlik ve mekanik özelliklerde tutarsızlıklar ortaya çıkabilir (DebRoy vd., 2018).

Katmanlı imalat yöntemlerinde, AlSi10Mg'nin işlenebilirliği enerji aktarımı, lazer parametreleri ve tarama stratejilerinin doğru şekilde ayarlanmasına bağlıdır. Yüksek lazer gücü ve uygun tarama stratejisi, malzemenin mikro yapısını ince taneli hale getirerek işlenebilirliği kolaylaştırabilir. Buna karşın, düşük enerji yoğunluğu ya da kontrolsüz soğuma süreçleri, mikro yapıda iri taneli yapılar oluşmasına neden olarak mekanik özelliklerde ciddi kayıplara yol açabilir.

Bu bağlamda, AlSi10Mg'nin eksiltmeli ve katmanlı imalat süreçlerinde kullanımı, üretim parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesini gerektirir. Doğru üretim parametreleri ile malzemenin sertliği ve dayanımı artırılırken, işlenebilirliği ve üretim verimliliği de iyileştirilebilir (Maamoun vd., 2019). AlSi10Mg'nin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini kontrol altında tutmak, özellikle otomotiv, havacılık ve medikal sektörlerde yüksek performans gereksinimlerini karşılamak için kritik öneme sahiptir.

2.3. Frezeleme Talaşlı İmalat Yöntemi

Frezeleme, talaşlı imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanılan tekniklerden biridir ve modern üretim süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Dönen bir kesici takım ile iş parçasından malzeme kaldırarak işlem yapma esasına dayanan frezeleme yöntemi, düz yüzeylerden karmaşık geometrilere kadar geniş bir üretim yelpazesi sunmaktadır (Kalpakjian ve Schmid, 2009). CNC makineleri ile frezeleme işlemi, yüksek hassasiyetli ve otomasyon destekli imalatı mümkün kılar. Ancak, CNC makinelerinin ve özel kesici takımların yüksek maliyetleri ile talaş uzaklaştırma ve bertaraf süreçleri, yöntemin dezavantajları arasında yer almaktadır.

Frezeleme işleminin başarısı; kullanılan kesici takımın geometrisi, iş parçasının malzemesi, kesme sıvısı ve makine ayarları gibi birçok faktöre bağlıdır. Kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızı gibi değişkenlerin doğru seçimi, üretim kalitesini ve maliyetini doğrudan etkiler (Thiele ve Melkote, 1999).

2.3.1. Tanımlar

Takım Tezgâhı: Bir iş parçasının istenilen son şekle getirilmesi için kullanılan bir makinedir. Bu işlem sırasında, belirli bir geometrik yapıya sahip kesici takım aracılığıyla iş parçasından talaş, toz, partikül veya yonga halinde malzeme kaldırılır.

Kesici Takım: Belirli bir geometrik yapıya sahip ve keskin kenarıyla malzeme işleme sürecini gerçekleştiren bir araçtır.

Takım Tutucu: Frezeleme işlemlerinde kullanılan kesici takımı iş miline bağlamak ve iş milinin dönüş hareketini kesici takıma aktarmak amacıyla kullanılan, belirli bir geometriye sahip bir araçtır.

Tezgâh İş Mili: frezeleme gibi talaşlı imalat yöntemlerinde, kesici takımın veya iş parçasının gerekli çevresel hıza ulaşmasını sağlayan ve bir motor tarafından tahrik edilen temel makine elemanıdır.

Talaşlı İmalat: İş parçasının son şeklini almasını sağlamak amacıyla, belirli bir miktardaki malzemenin partikül, toz, talaş yongası veya kütle halinde kaldırılmasıyla gerçekleştirilen bir imalat yöntemidir. Bu süreç, kesici takımın kendi eksenini etrafında dönmesi, iş parçasının belirli bir eksen etrafında hareket etmesi veya kesici takım ile iş parçasının doğrusal olarak hareket ettirilmesi gibi farklı mekanizmalarla uygulanabilir.

Frezeleme: Bir iş milinin belirli bir açısal hızla döndürdüğü kesici takımın, aynı zamanda doğrusal bir ilerleme hareketi yapması veya işlenecek malzemenin tabla aracılığıyla kesici takıma doğru hareket ettirilmesi prensibine dayanan bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu süreçte, dönen kesici takım ile sabit konumda bulunan iş parçasının temas noktasında malzeme talaş halinde uzaklaştırılır.

Frezeleme Parametreleri: İşleme sırasında kaldırılacak talaş hacmini belirleyen temel değişkenlerdir. Bu parametreler arasında iş mili devir sayısı, kesici ağız sayısı, eksenel kesme derinliği, kesme hızı, radyal kesme derinliği, ilerleme hızı ve kesici ağız başına

ilerleme yer almaktadır. Bu faktörler, frezeleme işleminin verimliliğini, yüzey kalitesini ve takım ömrünü doğrudan etkileyen unsurlardır.

İş Mili Devir Sayısı: iş milinin kendi eksenini etrafında belirli bir zaman aralığında yaptığı dönüş miktarını ifade eder. Zaman birimi olarak genellikle dakika kullanılır. Devir sayısının birimi "devir/dakika" şeklinde tanımlanır ve literatürde yaygın olarak "n" harfi ile gösterilir.

Kesme Hızı: Talaş kaldırma işleminin gerçekleşmesi için gerekli enerjiyi belirleyen önemli parametrelerden biridir. Kesici takım kendi eksenini etrafında dönerken, takımın ucundaki herhangi bir nokta dairesel bir yörünge izler. Bu noktada, yörüngeye teğet doğrultuda bir çizgisel hız meydana gelir ve bu hız, talaşlı imalat süreçlerinde kesme hızı olarak adlandırılır. Genellikle "Vc" sembolü ile ifade edilir ve Denklem 2.1 ile hesaplanır.

$$V_c \text{ (m/dakika)} = \frac{\pi \times D \text{ (mm)} \times n \left(\frac{\text{devir}}{\text{dakika}} \right)}{1000}$$

Denklem 2.1 Kesme hızı denklemi

Yukarıdaki formülde Vc (m/dakika) kesme hızını, D (mm) kesici takım çapını ve n (devir/dakika) iş mili devir sayısını ifade eder.

İlerleme Hızı: kesme işlemi sırasında kesici takımın iş parçasına, iş parçasının kesici takıma veya her ikisinin birbirine göre sahip olduğu çizgisel hızdır. Genellikle F sembolü ile gösterilir ve aşağıdaki Denklem 2.2 yardımıyla hesaplanır.

$$F \text{ (mm/dakika)} = n \text{ (devir/dakika)} \times z \times f_z \text{ (mm/ağız)}$$

Denklem 2.2 İlerleme hızı denklemi

Denklemde F (mm/dakika) ilerleme hızını, n (devir/dakika) iş mili devir sayısını, z kesici takımın ağız sayısını ve fz (mm/ağız) ağız başına ilerlemeyi ifade eder.

Kesici Ağız Sayısı: Bir kesici takımın üzerinde yer alan ve malzeme kesme işlemini gerçekleştiren keskin kenarların toplamıdır. Aynı zamanda **kesici diş sayısı** olarak da bilinir ve literatürde genellikle "z" sembolü ile ifade edilir.

Kesici Ağız Başına İlerleme: bir kesici ağzın iş parçası ile temasını tamamlamasından sonra, sıradaki kesici ağzın aynı noktaya ulaşmasına kadar geçen süre içinde takımın doğrusal olarak kat ettiği mesafedir. "fz" sembolü ile gösterilir ve literatürde genellikle "mm/diş" veya "mm/ağız" birimleriyle ifade edilir.

Devir Başına İlerleme: Bir kesici takımın kendi eksenini etrafında bir tam tur atması sırasında doğrusal olarak aldığı mesafeyi belirtir. "fn" sembolü ile gösterilir ve "mm/devir" birimiyle ifade edilir.

Eksenel Kesme Derinliği: Bir kesici takımın eksenini yönünde iş parçasına daldığı kesme miktarını ifade eder. "ap" sembolü ile gösterilir ve ölçü birimi milimetre (mm) olarak tanımlanır.

Radyal Kesme Derinliği: Bir kesici takımın yarıçap doğrultusunda iş parçasına uyguladığı kesme miktarını ifade eder. "ae" sembolü ile gösterilir ve ölçü birimi milimetre (mm) olarak tanımlanır.

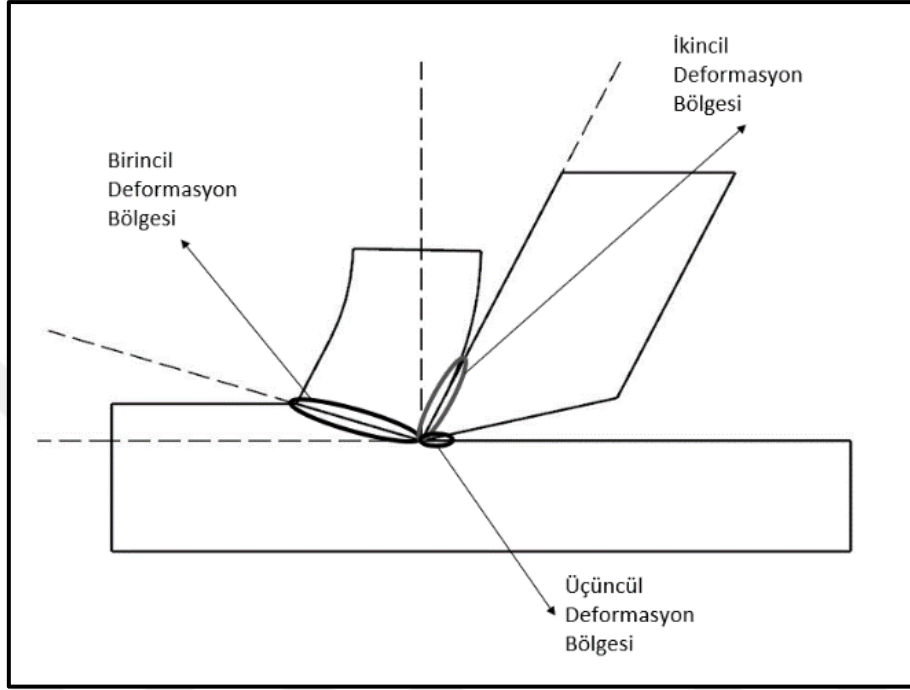
2.3.2. Frezelemede talaş kaldırma işlemi

Frezeleme sırasında, kesici takım ile iş parçasının etkileşiminde farklı deformasyon bölgeleri oluşur. Bu bölgeler, talaş oluşum mekanizmasını ve işleme sırasında ortaya çıkan kuvvetleri etkiler (Merchant, 1945). Deformasyon bölgeleri Şekil 2.4'te verilmiştir.

Birincil Deformasyon Bölgesi: Malzeme, elastoplastik deformasyona uğrayarak talaş haline gelir.

İkincil Deformasyon Bölgesi: Talaş ile kesici takımın temas ettiği alan; burada sürtünme nedeniyle yüksek miktarda ısı açığa çıkar.

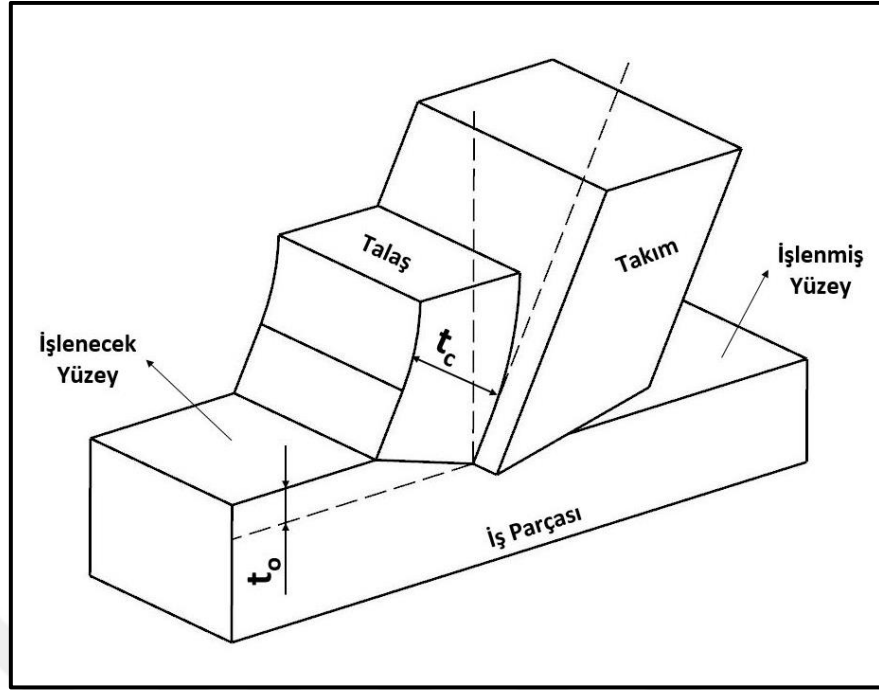
Üçüncül Deformasyon Bölgesi: Kesici takımın iş parçasına temas ettiği yüzeydir ve elastoplastik deformasyon ile sürtünme oluşur. Bu deformasyon bölgelerinde oluşan kuvvetler ve ısı, iş parçasının kalitesini ve kesici takımın ömrünü etkiler.



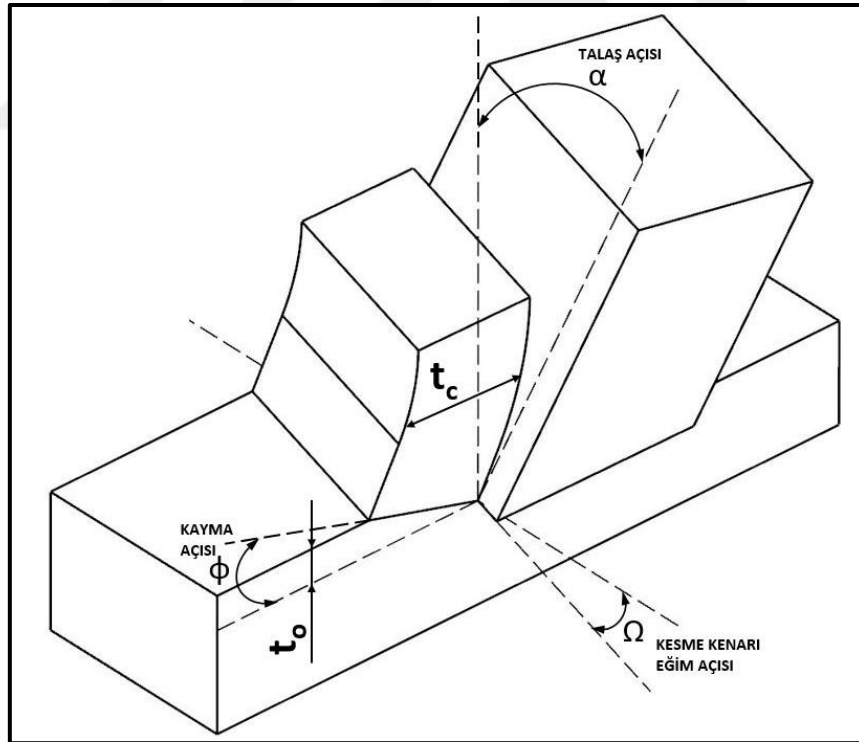
Şekil 2.4. Deformasyon bölgeleri

2.3.3. Eğik ve ortogonal kesme

Frezeleme işlemi, genelde eğik kesme modeli ile tanımlanır. Ancak, analiz kolaylığı sağlamak için çoğu zaman ortogonal kesme modeli kullanılır (Şekil 2.5) (Merchant, 1945). Ortogonal model, kesici takımın kesme kenarının kesme hızına dik olduğu bir durumu temsil eder ve talaş oluşumunu anlamada önemli bir kolaylık sağlar (Kalpakjian ve Schmid, 2009). Eğik model ise kesme kenarının kesme hızına bir açı yaptığı durumları temsil eder ve daha karmaşık geometrilerde daha doğru sonuçlar verir (Şekil 2.6).



Şekil 2.5. Ortogonal kesme modeli



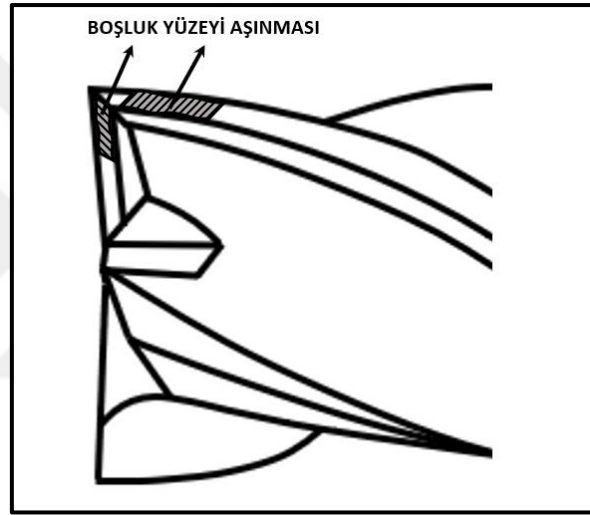
Şekil 2.6. Eğik kesme modeli

2.3.4. Takım aşınması

Kesici takım, frezeleme işlemi sırasında çeşitli aşınma türlerine maruz kalır. Bu aşınmaların başlıca nedenleri arasında yüksek sıcaklık, sürtünme ve uygun olmayan kesme koşulları bulunur. Başlıca aşınma türleri şunlardır:

2.3.4.1. Boşluk Yüzeyi Aşınması

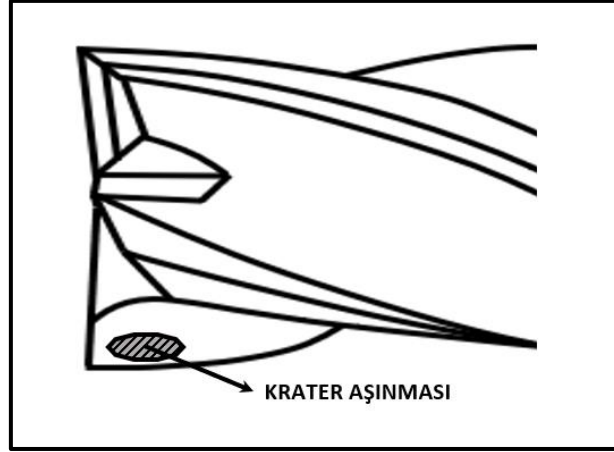
Sert malzemelerin kesici takım yüzeyini zımparalaması sonucu oluşur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Boşluk yüzeyi aşınması

2.3.4.2. Krater Aşınması

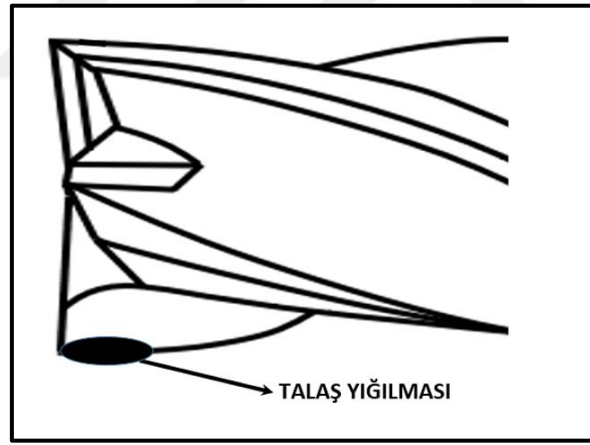
Yüksek sıcaklık ve kimyasal reaksiyonlar sonucu kesici yüzeyde oyuklar oluşmasıdır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Krater aşınması

2.3.4.3. Talaş Yığılması

Talaşın kesici yüzeye yapışarak takım geometrisini bozmasıdır (Kalpakjian ve Schmid, 2009) (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Talaş yığılması

Bu aşınmaların etkileri arasında üretim kalitesinde düşüş, maliyetlerin artması ve üretim süresinin uzaması yer almaktadır

2.4. Literatür Çalışmaları

Günümüzde katmanlı imalat (additive manufacturing), tasarım özgürlüğü, malzeme tasarrufu ve hızlı üretim süreçleri gibi avantajlarıyla endüstride yaygın bir şekilde

kullanılmaktadır. Özellikle AlSi10Mg gibi hafif metallerin üretiminde, katmanlı imalat teknolojileri, mikro yapı ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır. Literatürde, katmanlı imalat parametrelerinin değiştirilerek elde edilen parçaların mikro yapı ve mekanik özelliklerinin nasıl optimize edilebileceği üzerine yoğunlaşan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemle üretilen parçaların yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve özellikle işlevsel yüzeylerin pürüzlülüğün giderilmesi için frezeleme gibi ikincil işlemler üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Bu durum, frezeleme sürecinin katmanlı imalat parçalarına özgü zorluklarını ele alarak bu alandaki bilgi boşluğunu dolduracak yeni çalışmalara olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

AlSi10Mg malzeme, yüksek işlenebilirliği ile bilinse de özellikle havacılık dişli muhafazaları gibi boyutsal hassasiyet ve yüksek yüzey kalitesi gerektiren bileşenlerde, katmanlı imalat yöntemiyle üretilen parçaların frezeleme parametrelerinin önceden belirlenmesi büyük bir zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabileceği aşıkardır (Magerramova vd., 2022; Gisario vd., 2019).

Konuyla ilgili bazı çalışmaların yıl sırasına göre özetleri aşağıda verilmiştir.

Davis (1993) yaptığı çalışmada, alüminyum ve alaşımlarının temel özelliklerini, tarihsel gelişimini ve üretim yöntemlerini detaylı olarak incelemiştir. Alüminyumun hafifliği, korozyon direnci ve iyi elektrik iletkenliği gibi özelliklerinin sanayi için kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Çalışma ayrıca, AlSi10Mg alaşımının mekanik özelliklerinin talaşlı işleme uygunluğu ve işlenebilirliği üzerindeki etkilerini ele almıştır.

Kempen vd. (2012) çalışmasında, Seçimli Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, çekme dayanımı, uzama, Young modülü, darbe tokluğu ve sertlik gibi parametreler değerlendirilmiş ve SLM ile üretilen malzemelerin döküm yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlara göre, SLM yöntemiyle üretilen numunelerin mekanik özellikleri döküm malzemelerle karşılaştırılabilir seviyede olup, hatta bazı durumlarda üstün mekanik performans sunduğu belirlenmiştir. Özellikle, ince taneli mikro yapı ve homojen Si fazı dağılımı sayesinde sertlik ve çekme dayanımının daha yüksek olduğu, ancak üretim yönüne bağlı olarak malzemedeki mekanik anizotropi gözlemlendiği tespit edilmiştir.

Çalışma, SLM süreciyle üretilen AlSi10Mg parçaların hafif ve yüksek dayanımlı uygulamalar için uygun olabileceğini ortaya koymaktadır.

Sekmen vd. (2015) çalışmasında, AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarının işlenmesi sırasında kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş (YT) ve yığıntı katmanı (YK) oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşleme sırasında oluşan yüzey bütünlüğü, talaş oluşumu ve takım aşınma mekanizmaları değerlendirilmiş, farklı talaş açıları kullanılarak talaş kaldırma sürecinin etkileri gözlemlenmiştir. Kaplamasız karbür kesici takımlarla gerçekleştirilen kesme deneylerinde, oluşan yığıntı yapılar SEM ve EDS kullanılarak detaylı şekilde incelenmiştir.

Çalışmada AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımları işlenmiş, kaplamasız karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kesme hızı, talaş açısı, yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu gibi parametreler değerlendirilmiştir. AA 7075 alaşımında düşük talaş açılarında daha fazla yığıntı talaş ve yığıntı katmanı olduğu, ancak talaş açısı arttıkça bu oluşumların azaldığı gözlemlenmiştir. AA 2011 alaşımında yüzey pürüzlülüğü daha düşük seviyelerde kalırken, AA 7075 alaşımında düşük talaş açıları ve düşük kesme hızlarında daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, EDS analizleri, kesici takım yüzeyinde oluşan yapışma aşınmasının, alaşım içeriğindeki bakır ve çinko elementlerinden etkilendiğini ortaya koymuştur.

Li vd. (2016) çalışmasında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımına uygulanan çözeltme ve yaşlandırma ısıl işlemlerinin mikro yapı, mekanik özellikler ve kırılma mekanizması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, çekme dayanımı, sertlik, süneklik, mikro yapı değişimleri ve kırılma yüzeyi morfolojisi değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, SLM ile üretilen as-built numunelerde ultra ince ötektik mikro yapı oluşmuş ve bu yapı yüksek sertlik ve mukavemet sağlamıştır. Çözeltme ısıl işlemi sonrasında Si fazının ayrılarak iri parçacıklar oluşturduğu, bunun da mekanik özellikleri etkilediği gözlemlenmiştir. Isıl işlemle çekme dayanımı önemli ölçüde azalırken, süneklik belirgin şekilde artmıştır. Kırılma yüzeyi analizleri, as-built numunelerde gevrek kırılma mekanizmasının baskın olduğunu, ancak ısıl işlemle birlikte sünek kırılma özelliklerinin ortaya çıktığını göstermiştir. Çalışma, SLM ile üretilen AlSi10Mg

alaşımlarının mekanik özelliklerinin uygun ısı işlemlerle optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Piscopo vd. (2019) çalışmasında, Lazer Toz Yatak Ergitme (L-PBF) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarının talaşlı işleme sonrası artık gerilme dağılımı incelenmiştir. Delme yöntemiyle yapılan artık gerilme ölçümleri, L-PBF yöntemiyle üretilen ve ardından frezeleme işlemi uygulanan numunelerin artık gerilme durumlarını ortaya koymuştur. Sonuçlara göre, L-PBF ile üretilen parçalar, döküm parçalarla karşılaştırıldığında daha düşük yüzey altı basma gerilmeleri göstermiş, ayrıca işleme sonrası çekme gerilmelerinin ve artık gerilme derinliğinin arttığı belirlenmiştir. Yüksek kesme kuvvetlerinin yüzeyde çekme gerilmesi oluşturduğu, ancak alt katmanlarda basma gerilmelerinin baskın olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, L-PBF ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının mekanik özelliklerinin ve işlenebilirliğinin artık gerilmeler açısından optimizasyon gerektirdiğini göstermektedir.

Gisario vd. (2019) çalışmasında, metal eklemeli imalatın (AM) ticari havacılık endüstrisindeki kullanımı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, toz yatak füzyonu (PBF) ve doğrudan enerji biriktirme (DED) gibi AM tekniklerinin uçak bileşenleri üzerindeki etkileri ele alınmış, tasarım, malzeme geliştirme, maliyet analizi ve çevresel etkiler açısından değerlendirmeler yapılmıştır. AM'nin hafif, yüksek dayanımlı ve karmaşık geometrili bileşenlerin üretiminde sunduğu avantajlar vurgulanmıştır. Özellikle Buy-to-Fly (BTF) oranlarının geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde iyileştirilmesi, üretim atıklarının azaltılması ve tedarik zinciri yönetiminde sağladığı esneklik öne çıkan bulgulardandır.

Çalışma, havacılık endüstrisinde AM'nin tasarım optimizasyonu, parça entegrasyonu ve üretim süreçlerini nasıl değiştirdiğini inceleyerek kompleks bileşenlerin tek parça olarak üretilmesini mümkün kılan yönlerini ortaya koymuştur. AM'nin hava araçlarının yakıt verimliliğini artırarak çevresel etkiyi azaltabileceği belirtilmiş ve ticari uçaklarda %9-17 arasında bir ağırlık azaltımı ile yakıt tasarrufu ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlayabileceği hesaplanmıştır.

Ayrıca, çalışmada AM'nin yedek parça üretiminde dijital envanter yönetimi ile birlikte merkezi ve dağıtılmış üretim ağlarına olan etkileri tartışılmıştır. Dijital yedek parça

konseptiyle, havacılık sektöründe kritik parçaların üretiminin talebe göre anında gerçekleştirilebileceği ve envanter maliyetlerinin düşürülebileceği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, hammadde maliyetleri, üretim hızları ve kalite kontrol sistemlerinin yetersizliği gibi mevcut sınırlamalar ele alınmış ve AM'nin havacılık sanayisinde daha geniş çapta benimsenmesi için standartlaştırma ve süreç optimizasyonuna ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Çalışma, metal eklemeli imalatın havacılık sektöründe üretim maliyetlerini, tedarik zinciri yapılarını ve çevresel etkileri nasıl dönüştürebileceğini ortaya koyarak, AM'nin gelecekteki gelişim alanları ve uygulama potansiyeli hakkında önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Matras (2020) çalışmasında, lazer tabanlı toz yatak ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımından yarı mamul parçaların frezeleme işlemiyle yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi araştırılmıştır. Çalışmada, SLM işlem parametreleri (lazer tarama hızı) ve frezeleme parametreleri (ilerleme hızı ve kesme genişliği) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri açısından değerlendirilmiştir. SLM sürecinde kullanılan yüksek lazer tarama hızlarının gözenekliliği ve yüzey düzensizliklerini artırdığı, ancak ardından uygulanan yüzey frezeleme işlemiyle pürüzlülüğün 20 kat azaltılabildiği tespit edilmiştir. Matematiksel modellerle optimizasyon yapılarak en düşük yüzey pürüzlülüğü ($R_a = 0.14 \mu m$, $R_z = 1.1 \mu m$) değerlerine ulaşılmıştır. Kesme genişliği ve ilerleme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiş, ayrıca kesici takımın talaş yüzeyine yapışan malzeme nedeniyle bazı işlenmiş yüzeylerde hasarlar meydana gelmiştir.

Zimmermann vd. (2021) çalışmasında, lazer tabanlı toz yatak ergitme (L-PBF) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının frezeleme işlemindeki işlenebilirliği değerlendirilmiştir. Çalışmada, talaş yapısı, kesme kuvvetleri, yüzey morfolojisi, mikro sertlik ve çapak oluşumu analiz edilerek, L-PBF yöntemi ile üretilen malzemelerin konvansiyonel döküm AlSi10Mg ile karşılaştırılması yapılmıştır. L-PBF yöntemiyle üretilen numunelerin mikro yapılarının anizotropik olduğu, kesme kuvvetlerinin imalat yönüne bağlı olarak değiştiği ve talaş oluşumunun kesme yönü ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, L-PBF ile üretilen parçaların döküm malzemeye kıyasla daha düşük kesme kuvvetleri ve sürekli talaş oluşumu gösterdiği, ancak işlenmiş yüzeylerde daha

belirgin pullanma yapısı ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğü olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, frezeleme işleminde çapak oluşumunun L-PBF parçalar için önemli ölçüde düşük olduğu, bu durumun ince taneli mikro yapı ve düşük süneklikle ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Ramoni vd. (2021) çalışmasında, lazer tabanlı toz yatak ergitme (LPBF) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının farklı soğutma koşulları (kuru, sulu ve Minimum Miktarla Yağlama- MQL) altında işlenebilirliği incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması, mikro sertlik ve mikro yapı değişimleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, MQL yöntemi kuru ve sulu soğutmaya kıyasla yüzey kalitesini %45-63 ve %23-43 oranlarında iyileştirmiş, takım aşınmasını %45-29 ve %18-31 oranlarında azaltmıştır. Ayrıca, MQL stratejisinin kesme sıcaklığını düşürerek mikro sertlik değerini artırdığı ve işlenmiş yüzeyde daha homojen bir mikro yapı sağladığı tespit edilmiştir.

Uçak vd. (2022) çalışmasında, lazer tabanlı toz yatak ergitme (Selective Laser Melting- SLM) ve elektron ışını ergitme (Electron Beam Melting- EBM) yöntemleriyle üretilen metalik malzemelerin işlenebilirliği detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma, bu eklemeli imalat (Additive Manufacturing- AM) yöntemleriyle üretilen parçaların frezeleme, tornalama ve delme işlemleri açısından performanslarını değerlendirerek, yüzey bütünlüğü, takım aşınması, kesme kuvvetleri ve talaş oluşumu gibi temel işlenebilirlik parametrelerini ele almıştır.

Çalışmada SLM ve EBM yöntemleri kullanılarak üretilen Ti6Al4V ve AlSi10Mg alaşımları incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme kuvvetleri ve talaş oluşumu gibi parametreler gözlemlenmiştir. AlSi10Mg alaşımı özelinde, SLM ile üretilen parçaların döküm yöntemine kıyasla daha yüksek mukavemete sahip olduğu, ancak işleme sırasında takım aşınmasını artırdığı ve kesme kuvvetlerini yükselttiği belirlenmiştir. Yüzey kalitesi açısından, optimum işleme parametreleri seçilmediğinde mikro çatlaklar oluşabileceği tespit edilmiştir.

Magerramova vd. (2022) çalışmasında, Lazer Toz Yatak Ergitme (L-PBF) yöntemiyle hafifletilmiş AlSi10Mg alaşımlı bir dişli kutusu gövdesinin tasarımı, simülasyonu ve optimizasyonu incelenmiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi (FEM)

kullanılarak üretim sürecinin simülasyonu gerçekleştirilmiş ve yapısal ağırlık azaltma stratejileri belirlenmiştir. ProX320DMP 3D yazıcısı ile üretilen prototip, mekanik testler ve metalografik analizlerle değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, optimize edilmiş L-PBF parametreleri ile üretilen yapıların %15 daha hafif olmasına rağmen mukavemet standartlarını karşıladığı belirlenmiştir. Ayrıca, mikro yapı analizleri, AlSi10Mg alaşımının ince taneli dendritik bir yapı sergilediğini ve bunun mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Çalışma, havacılık ve motor bileşenlerinde hafif ve dayanıklı parçalar üretmek için L-PBF yönteminin uygunluğunu kanıtlamaktadır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Test düzeneği TUSAŞ Ankara tesislerinde 3 eksen freze tezgâhı, test numuneleri, kesici takım ve dinamometreden oluşmaktadır.

3.1. Freze Tezgâhı

Testlerin yapıldığı CNC tezgâh DMG marka 3 eksen DMV 115 model tezgahdır (Şekil 3.1). Tezgâh bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Freze tezgâhı özellikleri

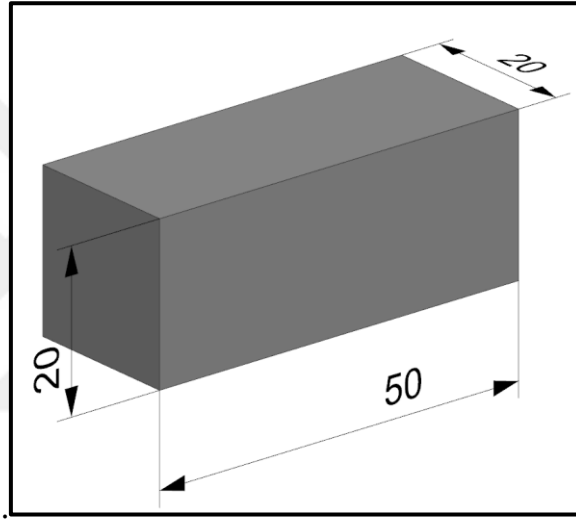
İş Mili Devri (maksimum)	20.000 d/dk
İş Mili Torku	130 Nm
İş Mili Gücü	35 kw
Eksen Limitleri X eksen	1150 mm
Eksen Limitleri Y eksen	700 mm
Eksen Limitleri Z eksen	550 mm



Şekil 3.1. Freze tezgâhı

3.2. Test Numuneleri

Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) ile ve kum kalıba döküm yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemle üretilmiş AlSi10Mg test numuneleri kullanılmıştır. Test numune boyutları aşağıda verilmiştir (Şekil 3.2). Her iki yöntemle üretilen test numunelerine herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmamıştır. Test numuneleri kimyasal kompozisyonları Buruker S1 Titan marka XRF cihazı kullanılarak belirlenmiştir. İlgili veriler Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Test numune ölçüleri (Ölçüler mm’dir)

Çizelge 3.2. Test numuneleri kimyasal kompozisyonları

	Katmanlı İmalat	Döküm
Element	Miktar (%)	
Al	90,33	90,01
Si	9,1	9,08
Mg	0,34	0,36
Fe	0,14	0,14
Co	0,03	0
Cr	0,03	0
Ni	0,02	0,01
Zn	0,01	0,03
Cu	0	0,03
Ti	0	0,05

Test numunelerinin döküm yöntemiyle üretiminde, AlSi10Mg alaşımı önce 730°C'ye kadar ertitilerek homojen bir yapı elde edilmiştir. Bu sıcaklık, homojen bir yapıya ulaşmayı sağlar ve oksidasyonu önler (Campbell, 2015). Ertitilen metal, çekme hatalarını ve mikro yapıdaki bozulmaları önlemek amacıyla kontrollü bir şekilde 690°C'ye soğutulmuş ve silis kumu kullanılarak hazırlanan kalıba dökülmüştür. Malzeme, oda sıcaklığında doğal olarak soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işleminin ardından, dikdörtgen prizma formunda üretilen döküm malzeme, şerit testere yardımıyla istenilen ölçülere getirilmiştir.

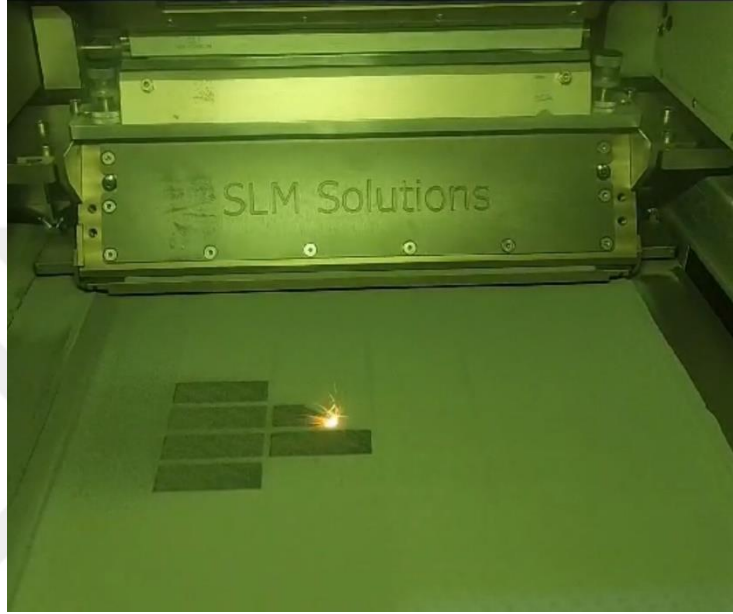
Katmanlı imalat ile üretilen test numuneleri Nikon marka SLM 280 model 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir (Şekil 3.3). Üretim aşamasını gösteren fotoğraf Şekil 3.4'te görülmektedir. Test numuneleri üretimi esnasında kullanılan parametreler Çizelge 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Nikon SLM 280 3 boyutlu yazıcı (Nikon SLM Solutions, 2024)

Çizelge 3.3. Katmanlı imalat üretim parametreleri

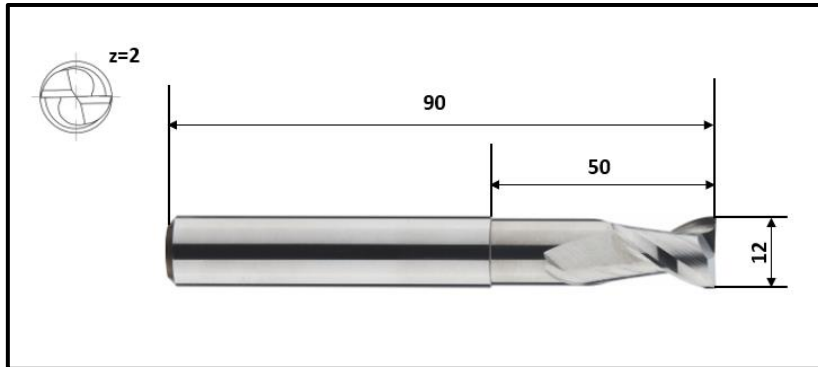
Parametre	Değer
Katman kalınlığı	30 μm
Lazer gücü	370 W
Tarama hızı	1335 mm/s
Tarama aralığı	0.17mm
Odak noktası çapı	~ 08mm



Şekil 3.4. Katmanlı imalat ile üretilen test numuneleri üretim aşaması

3.3. Kesici Takım

Testler esnasında karbür 10 mm çapında 2 ağızlı kaplamasız parmak freze kullanılmıştır (Şekil 3.5).



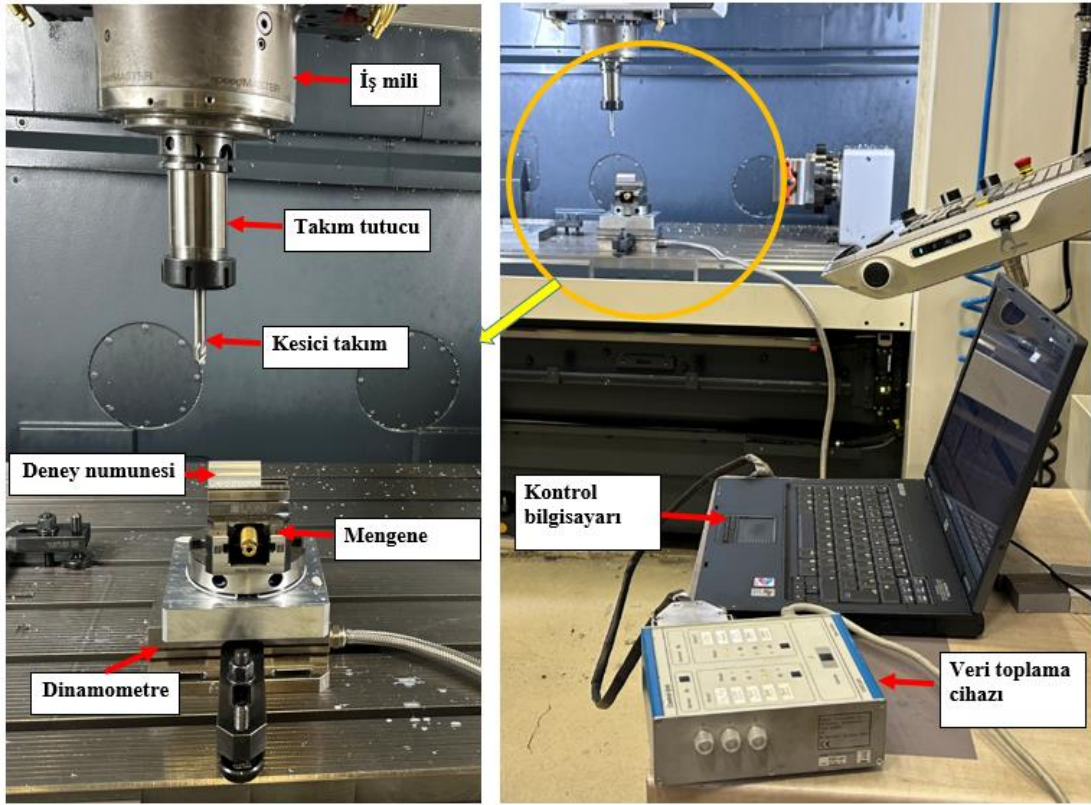
Şekil 3.5. Kesici takım görseli (Ölçüler mm'dir)

3.4. Veri Toplama

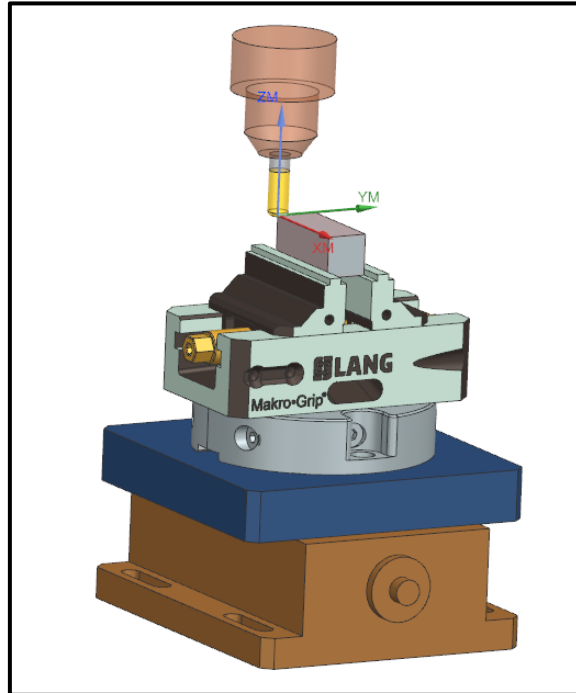
Test verileri aşağıda görseli verilen Kistler 9257B model numaralı dinamometre ile toplanmıştır (şekil 3.6). Test düzeneğı genel görseli şekil 3.7 'de verilmiştir. Kesme testleri sonucunda oluşan kesme kuvvetleri dinamometre ile ölçölerek anlık olarak görüntölennmiş ve aynı zamanda bilgisayara DYNOWARE yazılımı ile kaydedilmiştir. Kesme testleri için CAM programı Siemens NX yazılımı ile yapılmıştır. CAM programındaki test düzeneğı şematik gösterimi şekil 3.8'de verilmiştir.



şekil 3.6. Kistler 9257B dinamometre



Şekil 3.7. Kesme test düzeneği



Şekil 3.8. CAM yazılımı test düzeneği şematik gösterimi

3.5. Sertlik Ölçümleri

100 gf 10 saniye uygulanarak işlenmemiş numuneler üzerinden mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yüzeyler üzerinden 5 farklı noktadan ölçüm alınmıştır ve ortalaması hesaplanmıştır. Numunelerin mikrosertlik değerlerini belirlemek amacıyla FUTURE TECH FM 700 model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Deneyde kullanılan ekipman , Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Mikrosertlik cihazı

3.6. Test Parametreleri

Çizelge 3.4’te deney esnasında kullanılan kesme parametreleri verilmiştir. Aynı parametre ile bir numune üzerinde 12 paso kesme işlemi yapılmıştır

Çizelge 3.4. Kesme testi parametreleri

Deney	İş mili devri (dev/dk)	a_e (mm)	a_p (mm)	İlerleme hızı (mm/diş)
1	16000	6	4	0,15
2	14000	6	4	0,15
3	18000	6	4	0,15
4	18000	6	3	0,15
5	18000	6	2	0,15

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. İşlenmemiş Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Analizler

4.1.1. Mikrosertlik test sonuçları

Çizelge 4.1'de mikrosertlik testi sonuçları sunulmuştur. Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen numunenin, döküm yöntemiyle üretilene kıyasla daha yüksek mikrosertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Seçici lazer ergitme tekniği ile üretilen numuneler genellikle daha yoğun, homojen ve ince taneli bir mikro yapıya sahiptir. Bu mikro yapıdaki ince taneli ve yüksek yoğunluklu yapı, malzemenin sertliğinin ve mekanik dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır.

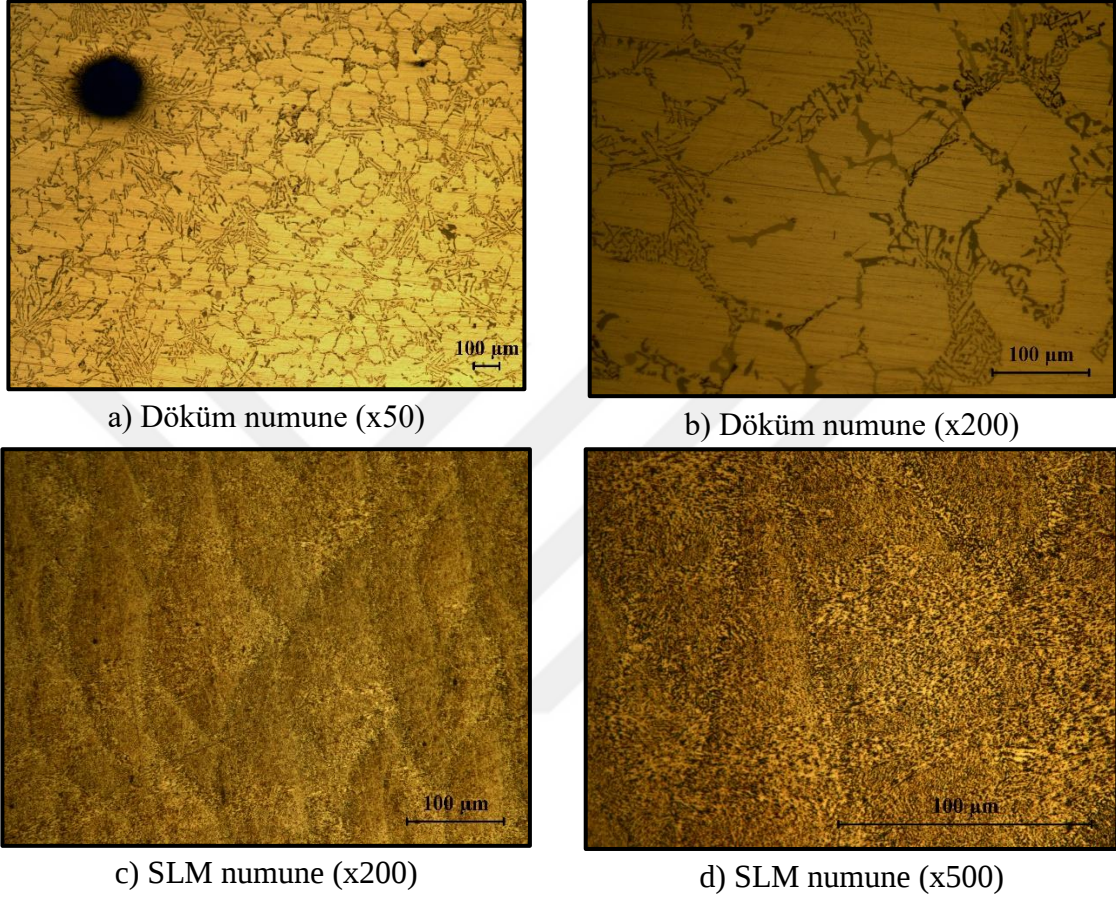
Çizelge 4.1. Mikrosertlik ölçüm sonuçları

Ölçüm no.	Döküm ile üretilen numune (HV)	SLM ile üretilen numune (HV)
1	66,6	108,0
2	64,5	127,2
3	65,4	120,7
4	55,3	114,4
5	65,3	120,4
Ortalama	63,42	118,14

4.1.2. Mikroyapı analizi

Şekil 4.1'de işlenmemiş numunelere ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Döküm numunelerinde genellikle dendiritik yapılar görülür. Bu, sıvı metalin yavaş soğuması sırasında dendirit kristallerin büyümesiyle oluşur. Boşluklar ve gözenekler kum kalıpların yüzeyinden kaynaklanabilir. Ayrıca gaz boşlukları ve hatalı kalıp tasarımı bu tür eksikliklere yol açabilir. Yüzeyin homojen olmadığı, daha düzensiz bir mikro yapı sergilediği söylenebilir. Seçici lazer ergitme yöntemlerinde katmanlı yapı daha belirgin olur. Bu, yöntemin doğasından kaynaklanır; malzeme tozları katman katman ergitilerek birleştirilir.

Gözenekler katmanlar arasındadır. Mikro yapı daha homojendir. Daha düzgün ve kontrollü bir mikro yapı elde edilir. Seçici lazer ergitmede boşluklar genelde işlem parametrelerinden veya toz malzemenin kalitesinden kaynaklanır.



Şekil 4.1. Döküm ve SLM ile üretilen numunelerin farklı büyütme oranlarında mikroyapı görüntüleri

Kum kalıba döküm numunelerde gözlemlenen dendritler α -Al dendritleridir. Alüminyum matrisi, döküm sürecinde yavaş soğuma nedeniyle dendritik bir şekilde katılır. Dendritler arasında kalan bölgelerde ise genellikle ötektik Si fazı bulunur. Bu faz, Al-Si alaşımlarında karakteristiktir ve yapının genel sertlik ve aşınma direncine katkıda bulunur. Silisyum fazları, dendritler arasındaki koyu bölgelerde bulunur. Döküm sırasında yeterince hızlı bir soğuma olmadığında, silisyum fazları daha iri ve düzensiz bir şekilde oluşur.

Katmanlı yapı içinde α -Al matrisi hâkimdir. Bu yapı, lazer ergitme sırasında hızlı soğuma nedeniyle ince ve homojen bir şekilde oluşur. Mikro silisyum fazları (Si), hızlı soğuma nedeniyle, silisyum fazları daha ince ve daha düzgün bir şekilde dağılmıştır. Ötektik Si fazı, lazer sinterleme numunelerinde küçük koyu bölgeler olarak görülür. AlSi10Mg alaşımında, magnezyum içeriği nedeniyle Mg_2Si fazı da bulunur. Bu fazlar, matris içinde dağılmış halde görülür ve genellikle daha koyu renkli veya ince çizgiler halindedir.

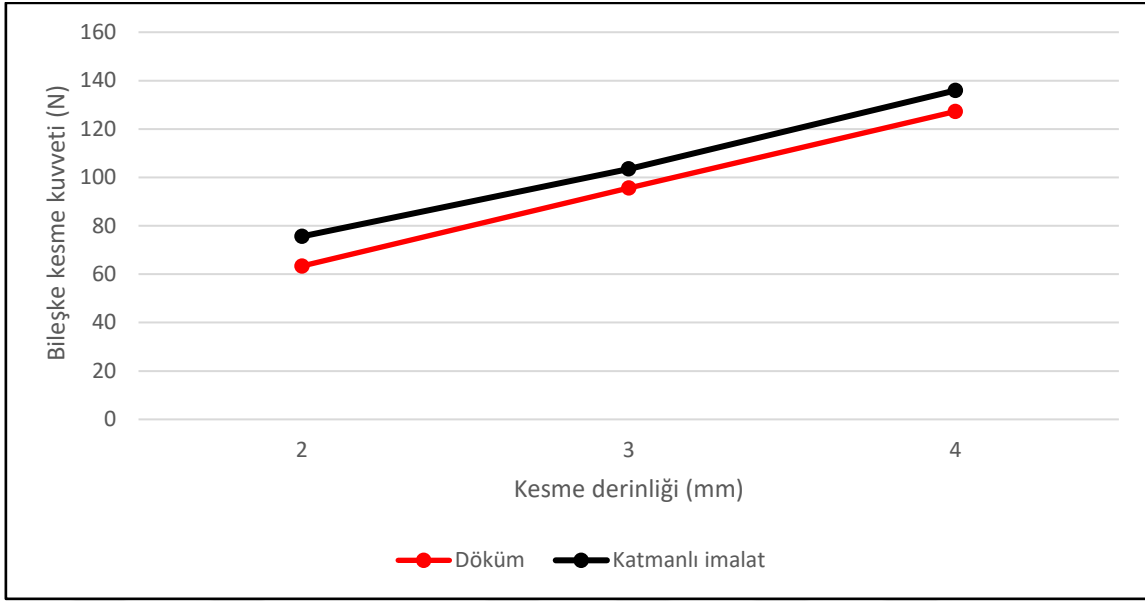
4.2. Kesme Kuvvetlerinin Analizi

Kesme kuvvetleri 12 paso işlemi sonucunda ortalama alınarak hesaplanmıştır. Farklı numuneler kıyaslanırken üç eksendeki kuvvetlerin bileşkesi alınarak karşılaştırılmıştır. DYNOWARE yazılımı ile kesme kuvvetleri analiz edilmiştir.

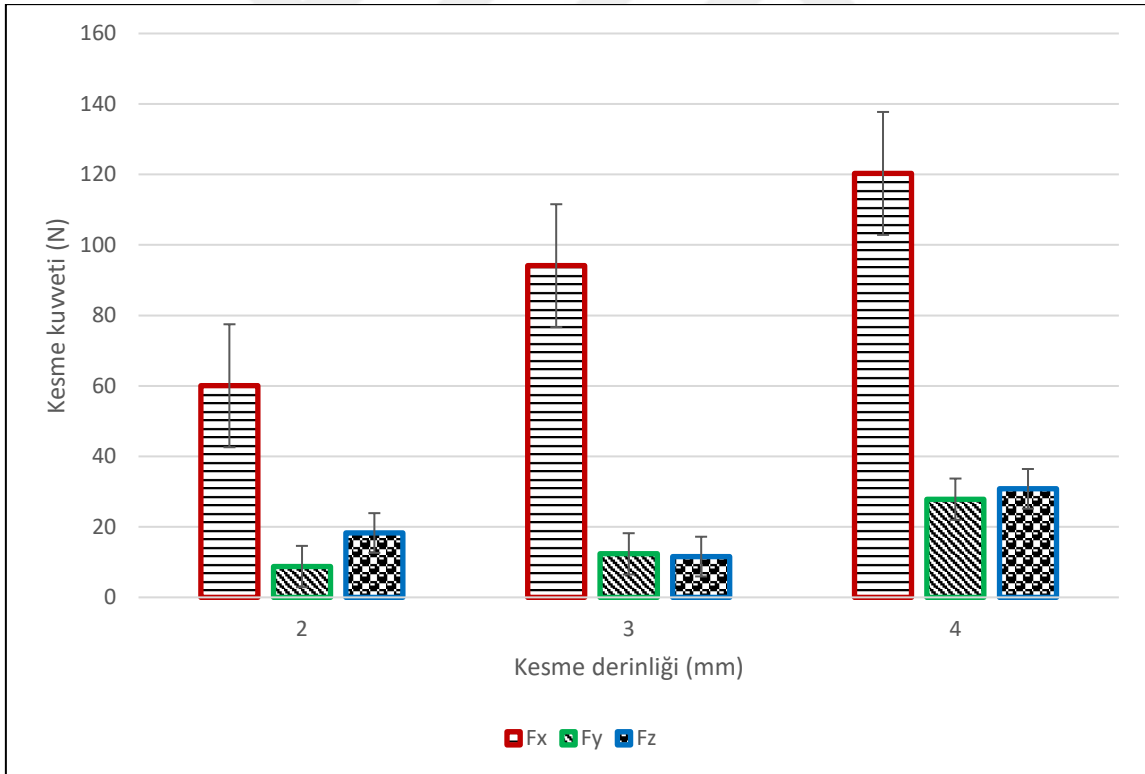
Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen test numunelerinin, frezeleme sırasında ölçülen kesme kuvvetlerinin, döküm yöntemiyle üretilen numunelere göre ortalama % 6,25 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

4.2.1. Kesme kuvvetleri ile kesme derinliği ilişkisi

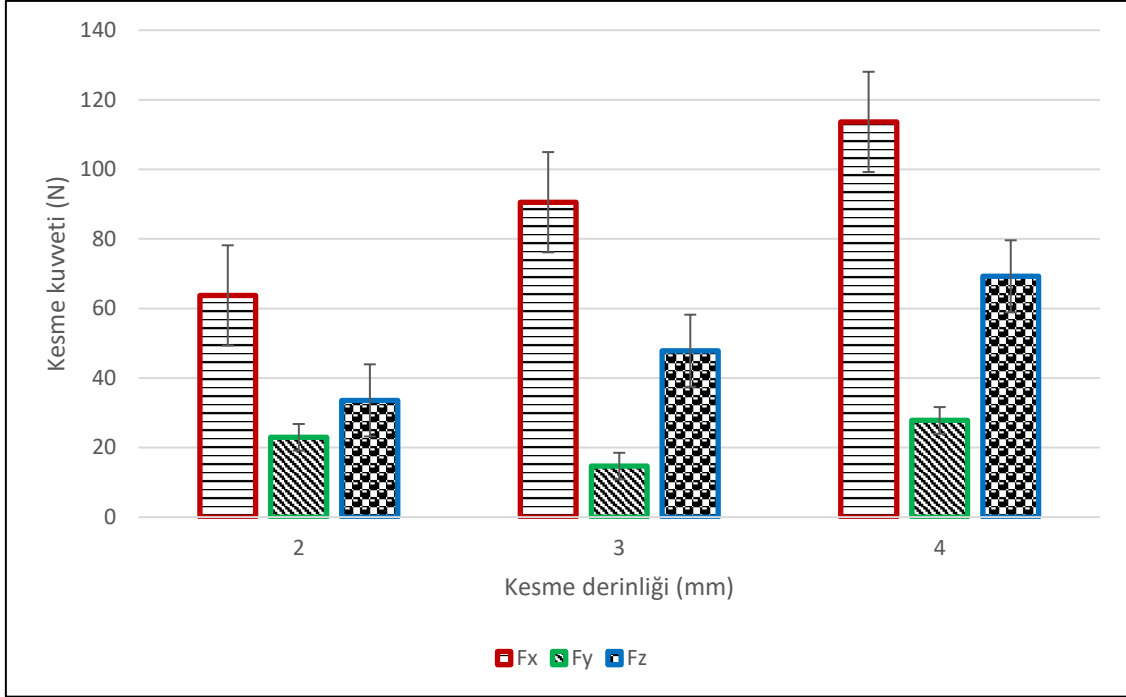
Şekil 4.2’de kesme derinliği ile kesme kuvvetleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere, kesme derinliğinin artışıyla birlikte kesme kuvvetleri de artmaktadır. Kesme kuvvetleri kıyaslandığında, seçici lazer ergitme ile üretilen numunede kesme kuvvetlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kesme kuvvetlerinin kesme derinliğinin değişimine göre bileşenler cinsinden değerleri Şekil 4.3-4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.2. Kesme kuvvetleri kesme derinliği ilişkisi



Şekil 4.3. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden kesme derinliği ilişkisi
(Döküm malzeme)



Şekil 4.4. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden kesme derinliği ilişkisi (SLM malzeme)

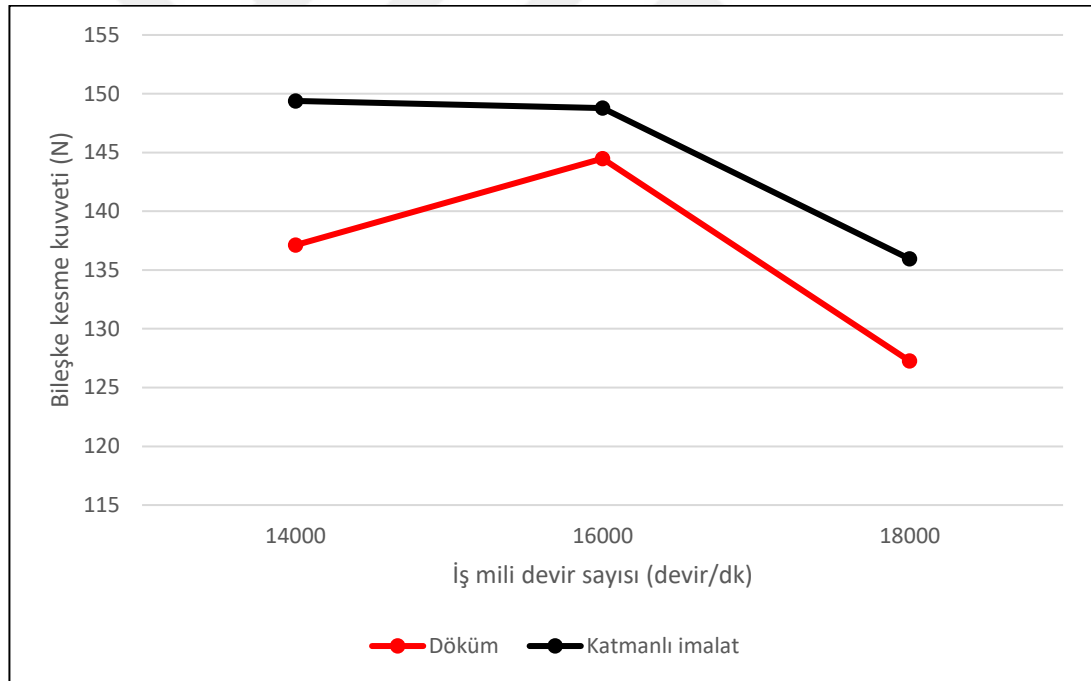
Kesme derinliği, kesici takımın iş parçasına ne kadar "içeri" girdiğini tanımlar. Kesme derinliği arttıkça, iş parçasından kaldırılan malzeme miktarı artar ve buna bağlı olarak takımın karşılaştığı direnç de artar. Bu durum, kesme işlemindeki yükün yükselmesine neden olur. Sonuç olarak kesme derinliği arttıkça, kesme kuvvetleri genellikle artar.

Seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen numuneler, genellikle daha ince taneli, yoğun ve homojen bir yapıya sahiptir. Bu yoğunluk ve mikro yapıdaki ince taneli yapı, malzemenin mukavemetinin artmasına ve dolayısıyla kesmeye karşı direncinin yükselmesine neden olur. Yani SLM ile üretilmiş malzeme daha sert, dayanıklı veya yüksek mukavemetli bir yapı sunabilir. Buna karşın kum kalıba dökümle elde edilen numunelerde mikro yapısal heterojenlik, gözeneklilik ve yerel sertlik farkları genellikle daha fazla olduğundan malzeme ortalamada daha “yumuşak” veya daha düşük mukavemetli özellikler gösterebilir. Çizelge 4.1’de işlenmemiş numuneler üzerinden gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümleri sonucu elde edilen değerler de bu durumu teyit etmektedir. Sonuç olarak, SLM yöntemiyle üretilen parçanın daha sıkı ve yoğun yapısı, takıma uygulanan kesme kuvvetlerinin daha yüksek çıkmasına neden olur. Bu, malzemenin kesme esnasında takıma

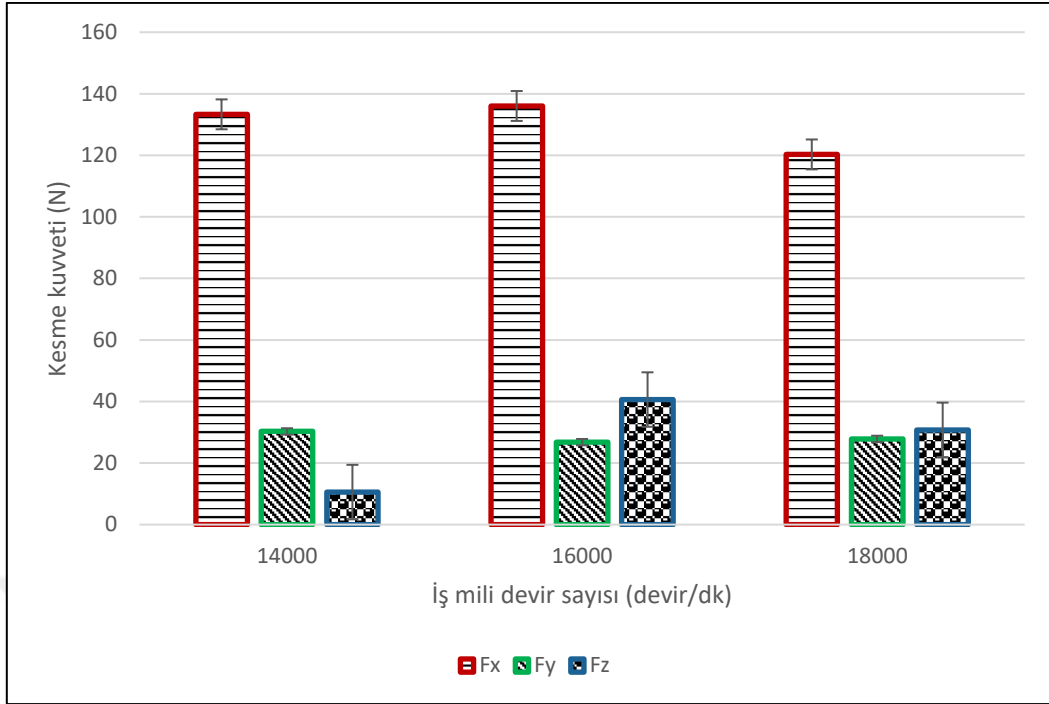
daha fazla direnç göstermesi ve talaş oluşumu için daha yüksek kuvvet gerektirmesi anlamına gelir. Bu sebeple kıyaslandığında, SLM numunesinde kesme kuvvetlerinin daha yüksek olması normal bir sonuçtur.

4.2.2. Kesme kuvvetleri ile iş mili devir sayısı ilişkisi

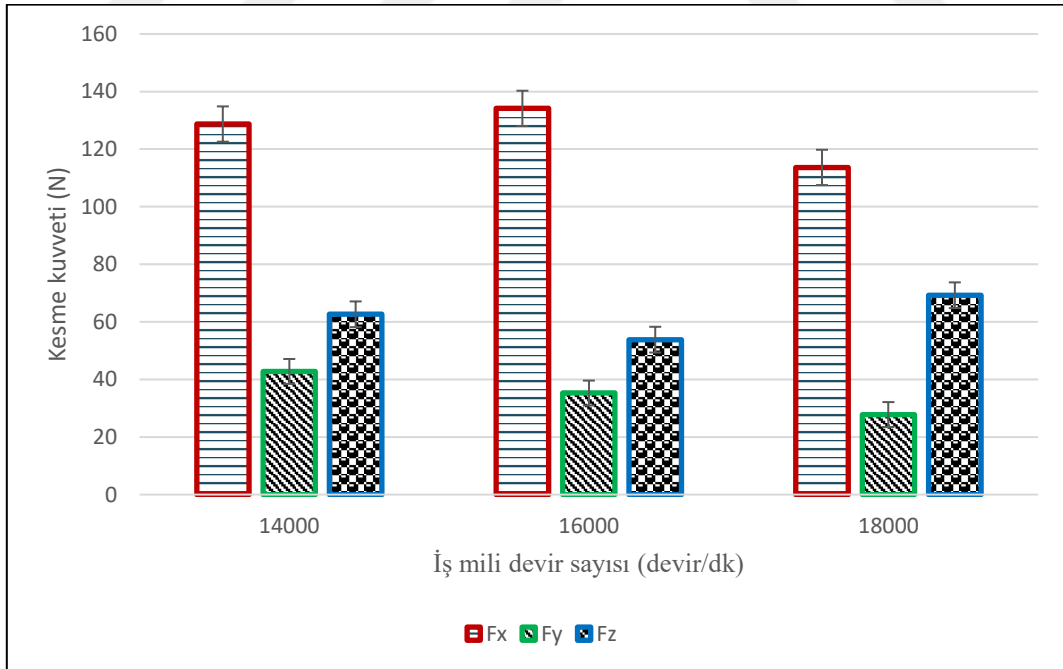
Şekil 4.5'de iş mili devir sayısı ile kesme kuvvetleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere, iş mili devir sayısının artışıyla birlikte kesme kuvvetleri de azalmaktadır. Kesme kuvvetleri kıyaslandığında, seçici lazer ergitme ile üretilen numunede kesme kuvvetlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kesme kuvvetlerinin iş mili devir sayısı değişimine göre bileşenler cinsinden değerleri Şekil 4.6-4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Kesme kuvvetleri iş mili devir sayısı ilişkisi



Şekil 4.6. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden iş mili devir sayısı ilişkisi
(Döküm malzeme)



Şekil 4.7. Kesme kuvvetlerinin bileşenleri cinsinden iş mili devir sayısı ilişkisi
(SLM malzeme)

İş mili devir sayısı, takımın kesme kenarının iş parçası yüzeyindeki hareket hızını ifade eder. Kesme hızı arttıkça talaş oluşum süreci hızlanır, kesme bölgesi ısınır ve malzeme daha kolay biçim değiştirir. Malzeme akma direncini kısmen kaybeder. Yüksek kesme hızlarında genellikle daha az yapışmış talaş (built-up edge) oluşur ve bu da yüksek devirlerde kesici takımın düşük devirlere göre daha verimli kesim yapmasına imkân tanır. Bu koşullar altında kesme kuvvetleri genellikle azalır ya da en azından daha kontrol edilebilir bir seviyeye düşer. Dolayısıyla kesme hızı arttıkça kesme kuvvetleri genellikle azalır.

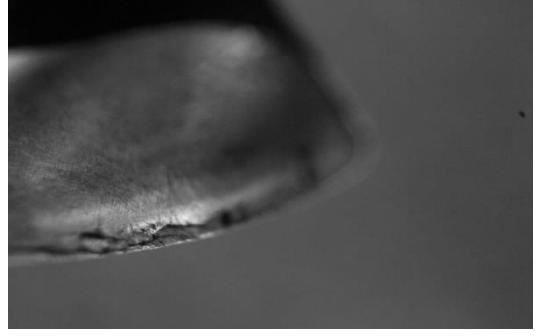
SLM yöntemiyle üretilen numuneler, yoğun, homojen ve ince taneli bir mikro yapı sergiler. Bu özellikler, mukavemetin ve kesmeye karşı direncin artmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, kum kalıba dökümle üretilen numuneler gözeneklilik ve mikro yapısal heterojenlik nedeniyle genellikle daha düşük mukavemet göstermektedir. Zimmermann ve arkadaşlarının (2021) yaptığı çalışmada, bu mikro yapısal farklılıkların, frezeleme sırasında kesme kuvvetlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Çalışmada, işlenmemiş numuneler üzerinden gerçekleştirilen mikro sertlik ölçümleri de SLM ile üretilen numunelerin daha sert olduğunu ve bu nedenle kesme kuvvetlerinin daha yüksek çıktığını göstermiştir. Çalışmanın sonuçları bu anlamda literatür ile uyum göstermektedir.

4.3. Takım Aşınmalarının Analizi

Takım aşınmaları görüntülerinin analizinde Leica stereo mikroskop kullanılmıştır. Şekil 4.8-4.9’da takım aşınmalarının görüntüleri verilmiştir. Döküm ve SLM ile üretilen numunelerin işlenmesinde düşük devir sayılarında beklenildiği gibi talaş yapışması yoğundur ve aşınma düzensizdir. Yanal yüzey aşınması mevcuttur (Deney 1-2). Devir sayısı arttıkça talaş yapışması azalmaktadır. Kesme derinliğinin düşmesi ile aşınma ve talaş yapışması azalmıştır (Deney 3-5). Döküm malzemeler ile SLM malzemeler kıyaslandığında seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş numuneler, talaş yapışması açısından daha avantajlıdır.



a) 1.deney



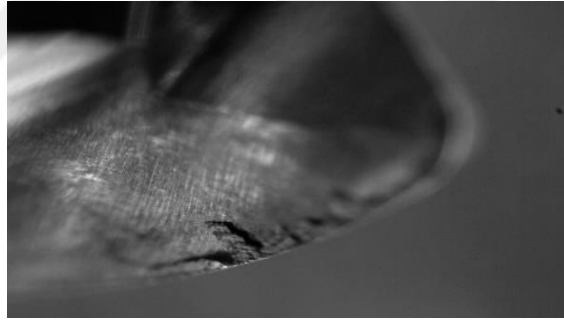
c) 3. deney



b) 2.deney



d) 4.deney



e) 5.deney

Şekil 4.8. Döküm numunelerin işlenmesi sonucu takım aşınmaları (x20)



a)1.deney



c)3.deney



b) 2.deney



d) 4.deney



e) 5.deney

Şekil 4.9. SLM numunelerin işlenmesi sonucu takım aşınmaları (x20)

4.4. Talaş Analizi

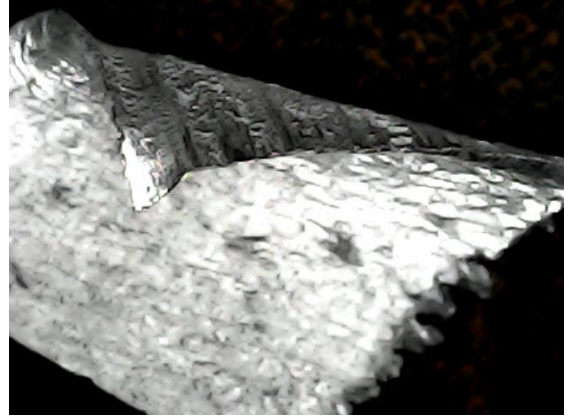
Şekil 4.10-4.11’de talaş şekillerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Döküm numunelerde düşük iş mili devri (Deney 2), talaş kopması zayıf, daha uzun ve sürekli talaş oluşmuştur. Yüksek iş mili devrinde (Deney 3-5), talaş daha homojen ve kırılmaya daha yatkındır. Daha iyi talaş kontrolü sağlanmıştır. Kesme derinliğinin azalması ile (Deney 4-5), talaşlar daha kısa ve düzenli hale gelmiştir. Bu, talaş kontrolünü kolaylaştırır. Bu sonuçlar, talaşın iş parçasından etkin bir şekilde ayrılması ve talaş kontrolünün sağlanması için kesme derinliğinin azaltılması ve yüksek iş mili devrinin tercih edilmesi gerektiğini gösterir. Özellikle deney 5 parametreleri talaş kontrolü açısından en uygun görülmektedir.

Aynı şekilde SLM numunelerde daha yüksek kesme derinliği ve orta iş mili devri, talaşların uzun ve sürekli olmasına neden olmuştur. Daha düşük kesme derinliği ve yüksek iş mili devri, talaşların daha kısa ve yönetilebilir olmasını sağlamıştır. Sinter lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş numunelerde homojen mikro yapı ve ince tane yapısı, talaşların düzgün kopmasını desteklemiştir. Ayrıca SLM numunelerin yüksek sertliği talaşların parlaklığından da anlaşılmaktadır.

AlSi10Mg alaşımı, yüksek silisyum içeriği nedeniyle sert ve kırılğan bir yapıya sahiptir. Bu, özellikle talaşların daha kısa ve kırılğan olmasını destekler. Magnezyum içeriği, malzemenin sertleşme potansiyelini artırarak talaş kopmasını kolaylaştırır. Bu, özellikle Deney 4 ve 5’te görülen daha kısa talaş oluşumunu açıklayabilir. AlSi10Mg’nin yüksek ısı iletkenliği, talaşın oluşumu sırasında kesme bölgesindeki ısının daha hızlı dağılmasını sağlar. Bu durum, talaşın kolay kopmasına ve sürekli talaş yerine kısa ve düzenli talaşların oluşmasına yol açar. Deney 3-5’te yüksek iş mili devirlerinde talaş kontrolünün iyileşmesi, bu malzemenin ısıyı hızlı iletme özelliğiyle uyumludur. Kum kalıba döküm yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemelerinde dendritik α -Al ve ötektik silisyum fazları bulunur. Dendritler, talaş oluşumu sırasında kesici takımın daha fazla güç harcamasına neden olabilir ve bu da daha uzun talaşlara yol açabilir (örneğin, Deney 1 ve 2’de). Daha düşük kesme derinliklerinde (kesme derinliği = 2-3 mm, Deney 4 ve 5), bu fazlar talaşın kolayca kopmasını destekler. Kum kalıba dökümde talaşlar genelde daha uzun ve sürekli olduğundan talaş kontrolü zordur. Seçici lazer ergitmede talaşlar daha kısa ve düzenli olduğu için talaş kontrolü daha kolaydır.



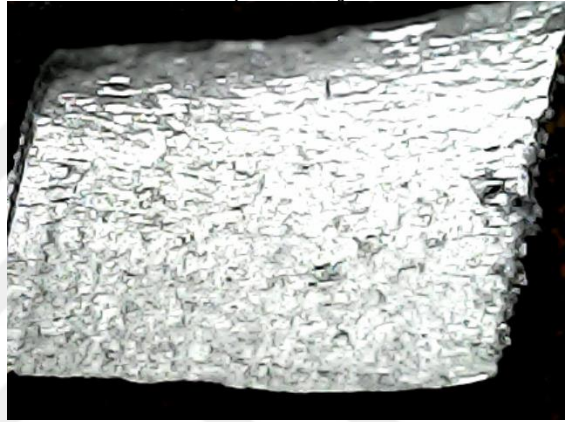
a) 1. deney



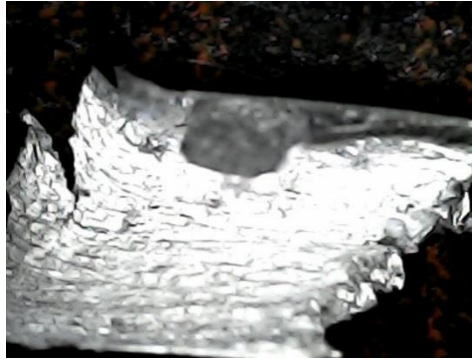
c)3. deney



b)2. deney



d)4.deney



e)5. deney

Şekil 4.10. Döküm numunelerin işlenmesi sonucu oluşan talaş şekilleri (x20)



a) 1. deney



c) 3. deney



b) 2. deney



d) 4. deney



e) 5. deney

Şekil 4.11. SLM numunelerin işlenmesi sonucu oluşan talaş şekilleri (x20)

2 farklı malzemeye ait talaş görüntüleri incelendiğinde, katmanlı imalat ile üretilen talaşların daha parlak olduğu görülebilmektedir. Bu durum malzemelerin sertliği ile açıklanabilir. Sünek malzemelerin yüzeylerinin işlenmesi esnasında yüzeylerinde rölyef yapı oluşumu gözlemlenirken, sert malzemelerin yüzeyleri ise daha pürüzsüz ve parlak elde edilebilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

AlSi10Mg alaşımının, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ve geleneksel kum kalıba döküm yöntemiyle üretilen numuneler üzerinde yapılan analizler, her iki üretim yöntemi arasında önemli farklar olduğunu ortaya koymaktadır:

Mikrosertlik ve Mikroyapı:

1-SLM yöntemiyle üretilen numuneler, döküm numunelere kıyasla daha yüksek mikrosertliğe sahiptir. Bunun temel nedeni, SLM'nin ince taneli, yoğun ve homojen bir mikro yapı oluşturmastır. Bu yapı, malzemenin sertliğini ve dayanımını artırmaktadır.

2-Döküm numuneler ise dendritik yapı ve düzensiz mikro yapıya sahiptir. Yavaş soğuma nedeniyle oluşan dendritler ve ötektik silisyum fazları, gözeneklilik ve heterojenlik gibi dezavantajlar barındırmaktadır.

Kesme Kuvvetleri:

3-SLM numunelerde, daha yoğun ve ince taneli mikro yapı nedeniyle kesme kuvvetleri daha yüksektir. Döküm numuneler ise daha yumuşak ve heterojen bir yapıya sahip oldukları için kesme kuvvetleri daha düşüktür.

4-Kesme kuvvetleri, kesme derinliğinin artışıyla yükselirken, iş mili devir sayısının artışıyla azalır.

Talaş Şekilleri ve Takım Aşınması:

5-SLM numunelerde talaşlar daha kısa ve düzenli oluşurken, döküm numunelerde daha uzun ve sürekli talaşlar görülmektedir.

6-Döküm ve SLM ile üretilen numunelerin işlenmesinde, düşük devir sayılarında yoğun talaş yapışması ve düzensiz aşınma görülürken, devir sayısının artması ve kesme derinliğinin azalması ile talaş yapışması ve aşınma azalmaktadır. SLM yöntemiyle üretilen numuneler, döküm malzemelere kıyasla talaş yapışması açısından daha avantajlıdır.

SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımları, yüksek dayanım ve sertlik gerektiren havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerinde kritik parçalar için oldukça uygun bir malzeme olarak öne çıkıyor. Ancak, bu alaşımların işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek kesme kuvvetlerini dengelemek için yüksek iş mili devirleri ve düşük kesme derinlikleri kullanılması gerekir. Daha düşük maliyetli ve yüksek mukavemet gerektirmeyen uygulamalar için ise kum kalıba döküm yöntemi daha uygun bir alternatif sunmaktadır.

SLM ile üretilen parçaların işlenmesi sırasında, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve takım ömrünü uzatmak için sağlam takım tutucular, optimize edilmiş kesici takım geometrileri ve kaplamaları tercih edilmeli. Aynı zamanda, etkin soğutma sıvıları kullanılarak kesme sıcaklığı kontrol altında tutulmalı ve takım aşınması en aza indirilmelidir. Talaş kontrolünü sağlamak adına kesme derinliğinin düşürülmesi ve doğru takım seçimiyle talaşın daha kolay kırılmasını sağlayacak işleme koşulları belirlenmeli. Tüm bu önlemler, SLM ile üretilen AlSi10Mg parçaların daha verimli işlenmesini sağlayarak endüstride daha yaygın ve güvenilir bir kullanım sunacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Maskery, I., Ashcroft, I., & Tuck, C. (2017). Selective laser melting of aluminum alloys. *MRS Bulletin*, 42(4), 311–319. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2017.6>
- Akgümüş Gök, D., Kılıçtek, S., Gök, S., Yakut, N. (2023). Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 517-537. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1251130>
- Aktimur, B., & Gökpınar, E. (2015). Katmanlı üretimin havacılıktaki uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 3(2), 463-469.
- ASM HANDBOOK COMMITTEE. (1990). *ASM Handbook Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International. Novelty, Ohio. s. 3470. ISBN 978-1-62708-162-7. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02.a0005549>
- Averardi, A., Cola, C., Zeltmann, S. E., & Gupta, N. (2020). Effect of particle size distribution on the packing of powder beds: A critical discussion relevant to additive manufacturing. *Materials Today Communications*, 24, Article 100964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100964>
- Baroutaji, A., Arjunan, A., Beal, J., Robinson, J., & Corrado, J. (2023). The Influence of Atmospheric Oxygen Content on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted AlSi10Mg TPMS-Based Lattice. *Materials*, 16(1), 430. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16010430>
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Iuliano, L., & Fino, P. (2017). Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9–12), 2743–2751. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4688-9>
- Clement, C. D., Masson, J., & Kabir, A. S. (2022). Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Fabricated by Selective Laser Melting Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(3), 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6030052>
- Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM international.
- DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A.E., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Eskier, U. (2023). Alüminyum nedir. Nereelerde kullanılır. Erişim: <https://www.makaleler.com/aluminyum-nedir-nereelerde-kullanilir>, Erişim tarihi: 10.11.2024
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 124-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
- Hajnys, J., Pagáč, M., Měsíček, J., Petru, J., & Król, M. (2020). Influence of Scanning Strategy Parameters on Residual Stress in the SLM Process According to the Bridge Curvature Method for AISI 316L Stainless Steel. *Materials*, 13(7), 1659. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13071659>
- Hernandez, F. C. R., Ramírez, J. M. H., & Mackay, R. (2017). *Al-Si alloys: automotive, aeronautical, and aerospace applications*. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58380-8>
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Dönmez, A. (2015). Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4028725>
- Hull, C. W. (1987). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. U.S. Patent No. 4,575,330.
- Jiménez, A., Bidare, P., Hassanin, H., Tarlochan, F., Dimov, S., & Essa, K. (2021). Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 63-96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06855-4>
- Kahramanzade, H., Sert, Y., & Küçükömeroğlu, T. (2021). Sürtünme Karıştırma İşleminin Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımının Tribolojik Özelliklerine Etkisi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*(28), 1159-1166. DOI: <https://doi.org/10.31590/ejosat.1013345>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2009). *Manufacturing engineering and technology* (6th ed.). Pearson Education. ISBN:9810681445, 9789810681449
- Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 39, 439-446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.059>
- Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52, 1770-1773. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1136492>
- Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. C. (2014). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals*, 56(2), 730–759. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004.001>
- Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q., ... & Shi, Y. (2016). Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 663, 116-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.088>
- Maamoun, A. H., Xue, Y. F., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2019). The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys. *Materials*, 12(1), 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12010012>
- Magerramova, L., Isakov, V., Shcherbinina, L., Gukasyan, S., Petrov, M.A., Povalyukhin, D., Volosevich, D., & Klimova-Korsmik, O. (2022). Design, Simulation and Optimization of an Additive Laser-Based Manufacturing Process for Gearbox Housing with Reduced Weight Made from AlSi10Mg Alloy. *Metals*, 12(1), 67. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12010067>
- Matras, A. (2020). Research and Optimization of Surface Roughness in Milling of SLM Semi-Finished Parts Manufactured by Using the Different Laser Scanning Speed. *Materials*, 13(1), 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13010009>
- Maware, C., Muvunzi, R., Machingura, T., & Daniyan, I. (2024). Examining the Progress in Additive Manufacturing in Supporting Lean, Green and Sustainable Manufacturing: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 14(14), 6041. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146041>
- Merchant, M.E. (1945). Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting. *Journal of Applied Physics*, 16, 318-324. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1707596>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Morrow, W.R., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J., & Skerlos, S.J. (2007). Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 15, 932-943. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2005.11.030>
- Ngo, T.D., Kashani, A.R., Imbalzano, G., Nguyen, K.T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Nikon SLM Solutions. (2024). SLM 280 technical specifications. Nikon Corporation.
- Özel, Ş., Zeren, M., & Çakıcı Alp, N. (2020). 3d Yazıcılar İle Katmanlı İmalat Teknolojisinin Otomotiv Endüstrisinde Uygulanması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 4(1), 18-31.
- Özsoy, A. L., Şirin, E., Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M. (2024). AlSi10Mg Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 12 (2), 480-493. DOI: <https://doi.org/10.29109/gujsc.1437598>
- Pieklo, J.; Garbacz-Klempka, A. (2021). Use of selective laser melting (SLM) as a replacement for pressure die casting technology for the production of automotive casting. *Arch. Foundry Eng.*, 21, 9–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Piscopo, G., Atzeni, E., Calignano, F., Galati, M., Iuliano, L., Minetola, P., & Salmi, A. (2019). Machining induced residual stresses in AlSi10Mg component produced by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). *Procedia CIRP*, 79, 101-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.019>
- Prashanth, K. G. (2020). Selective Laser Melting: Materials and Applications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(1), 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp4010013>
- Raheem, A. A., Hameed, P., Whenish, R., Elsen, R. S., G, A., Jaiswal, A. K., Prashanth, K. G., & Manivasagam, G. (2021). A Review on Development of Bio-Inspired Implants Using 3D Printing. *Biomimetics (Basel, Switzerland)*, 6(4), 65. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040065>
- Ramoni, M., Shanmugam, R., Ross, N.S., & Gupta, M.K. (2021). An experimental investigation of hybrid manufactured SLM based Al-Si10-Mg alloy under mist cooling conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 225-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.045>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Rayna, T., & Striukova, L. (2016). Adaptivity and Rapid Prototyping: How 3D Printing Is Changing Business Model Innovation. In B. van den Berg, S. van der Hof, & E. Kosta (Eds.), *3D Printing. Information Technology and Law Series*, 26. T.M.C. Asser Press, The Hague. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-6265-096-1_10
- Sames WJ, List FA, Pannala S, Dehoff RR, Babu SS. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. 61(5), 315-360. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- Seetharaman, S., McLean, A., Guthrie, R., & Sridhar, S. (2013). Treatise on Process Metallurgy. In *Process Fundamentals* (Vol. 1, pp. 1-952). Elsevier Ltd.. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66691-0>
- Sekmen, M., Günay, M., & Şeker, U. (2015). Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18(3), 141-148. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66691-0>
- Shanmugam, R., Ramoni, M., Thangamani, G., & Thangaraj, M. (2021). Influence of Additive Manufactured Stainless Steel Tool Electrode on Machinability of Beta Titanium Alloy. *Metals*, 11(5), 778. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11050778>
- Siyambaş, Y., & Turgut, Y. (2022). Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımlı Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü- Bir Araştırma. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 10(2), 368-390. DOI: <https://doi.org/10.29109/gujsc.1130098>
- Süt, M., Öztürk, E., & Kara, F. (2019). Havacılık Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojisi. *Journal of Aviation*, 3(2), 123-130.
- Thiele, J. D., Melkote, S. N., Peascoe, R., & Watkins, T. R. (1999). Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of aisi 52100 steel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 122(4), 642-649. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1286369>
- Thijs, L., Kempen, K., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2013). Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia*, 61(5), 1809-1819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.052>
- Tian, Y., Chen, C., Xu, X., Wang, J., Hou, X., Li, K., Lu, X., Shi, H., Lee, E. S., & Jiang, H. B. (2021). A Review of 3D Printing in Dentistry: Technologies, Affecting Factors, and Applications. *Scanning*, 2021, 9950131. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9950131>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes* (Vol. 1). CRC press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203912591>
- Trevisan, F., Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Aversa, A., Ambrosio, E. P., Lombardi, M., Fino, P., & Manfredi, D. (2017). On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials*, 10(1), 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10010076>
- Uçak, N., Çiçek, A., & Aslantas, K. (2022). Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 414-457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
- Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Designing for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 3, 632–637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.108>
- Zimmermann, M., Müller, D., Kirsch, B., Greco, S., & Aurich, J. C. (2021). Analysis of the machinability when milling AlSi10Mg additively manufactured via laser-based powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 989-1005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06391-7>