



**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN
17-4 PH PASLANMAZ ÇELİĞİNİN MİKROYAPISI
VE İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDE TEMPERLEME
İŞLEMİNİN ETKİSİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Mustafa YİĞİT

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Halil DEMİR
Doç. Dr. Mahir AKGÜN**

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN 17-4 PH PASLANMAZ
ÇELİĞİNİN MİKROYAPISI VE İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDE
TEMPERLEME İŞLEMİNİN ETKİSİ**

Mustafa YİĞİT

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

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Halil DEMİR
Doç. Dr. Mahir AKGÜN**

**KARABÜK
Haziran 2024**

Mustafa YİĞİT tarafından hazırlanan “EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN 17-4 PH PASLANMAZ ÇELİĞİNİN MİKROYAPISI VE İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDE TEMPERLEME İŞLEMİNİN ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Halil DEMİR
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Mahir AKGÜN
Tez 2. Danışmanı, Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/06/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)
Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Barış ÖZLÜ (ASÜ)

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

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Mustafa YİĞİT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN 17-4 PH PASLANMAZ ÇELİĞİNİN MİKROYAPISI VE İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDE TEMPERLEME İŞLEMİNİN ETKİSİ

Mustafa YİĞİT

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Doç. Dr. Mahir AKGÜN

Haziran 2024, 63 sayfa

Bu çalışma, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliği numunelerin üzerinde temperleme ısıl işleminin etkilerini araştırmaya odaklanmaktadır. Ticari olarak üretilen 17-4 PH çeliği master malzeme olarak temin edilmiştir ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliği ve temperleme işlemi uygulanan numunelerin işlenebilirlik performansları karşılaştırılmıştır. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliği numunelere temperleme ısıl işlemi 580 °C'de 1, 2 ve 3 saat sürelerde uygulanmıştır. İşlenebilirlik deneyleri CNC dik işleme tezgahında kuru ve MQL destekli kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, master malzemenin sertliğine göre SLM yöntemi ile üretilen ve temperleme işlemi uygulanan numunelerin sertliğinin daha düşük olduğunu göstermektedir. İşlemsiz SLM numunenin sertliğine

göre 580 °C'de 3 saat bekletme süresi boyunca temperlenen numunenin sertliğinin yaklaşık olarak %7,9 artmıştır. MQL işleme koşulunun yüzey pürüzlülük değeri üzerinde etkili bir rol oynadığı ve MQL destekli işleme koşulu altında elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin kuru işleme koşuluna göre yaklaşık %86,45 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bütün numunelerin MQL işleme koşulunda işlenmesinde elde edilen kesme sıcaklığı ve titreşim değerlerinin, kuru işleme koşulunda elde edilenlere göre sırasıyla %42 ve %32,13 daha iyi olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : 17-4 PH, SLM, Temperleme, Yüzey Pürüzlülüğü, Sıcaklık, Titreşim

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECT OF TEMPERING PROCESS ON MICROSTRUCTURE AND MACHINABILITY OF 17-4 PH STAINLESS STEEL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

Mustafa YİĞİT

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisors:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Assoc. Prof. Dr. Mahir AKGÜN

June 2024, 63 pages

In this study, focused on investigating the effects of tempering heat treatment on 17-4 PH steel specimens produced by selective laser melting (SLM). Commercially produced 17-4 PH steel was provided as a master material, and the machinability performances of 17-4 PH steel produced by selective laser melting (SLM) method and tempered samples were compared. Tempering heat treatment was applied to 17-4 PH steel samples produced by selective laser melting (SLM) method at 580 °C for 1, 2 and 3 hours. Machinability tests were carried out on CNC vertical machining machine under dry and MQL assisted cutting conditions. The outcomes of this study show that the hardness of the samples produced by the SLM method and tempered is lower compared to the hardness of the master material. The hardness of the sample tempered

at 580 °C for 3 hours increased by approximately 7.9% compared to the hardness of the untreated SLM sample. the MQL machining condition plays an effective role on the surface roughness value and the surface roughness values obtained under the MQL assisted machining condition are approximately 86.45% less than the dry machining condition. It was observed that the cutting temperature and vibration values obtained when processing all samples under MQL processing condition were 42% and 32.13% better, respectively, than those obtained under dry processing condition.

Key Word : 17-4 PH, SLM, Tempering, Surface Roughness, Temperature, Vibration

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi çalışmam boyunca bana desteğini esirgemeyen, danışmanlık yapan ve değerli katkılarını sağlayan Sayın Hocam Prof. Dr. Halil DEMİR' e ve 2. Danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Mahir AKGÜN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca bana sağladıkları maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan eşime ve kızım Cemre' ye şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, araştırma sürecimde laboratuvar çalışmalarında yardımcı ve katkıda bulunan değerli arkadaşlarım Uğur IŐIK, Levent KUTLUCAN, Emre ULUDAĞ, Harun KAHYA' ya teşekkür ederim. Bu süreçte yanımda olan ve bana inanan herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	xii
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN 17-4 PH ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE MİKRO YAPISAL KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI.....	3
2.2. PH PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN İŞLENEBİLİRLİK ÇALIŞMALARI ..	7
2.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ ÖZETİ.....	11
BÖLÜM 3	13
KURAMSAL TEMELLER	13
3.1. EKLEMELİ İMALAT	13
3.1.1. Giriş	13
3.1.2. Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting).....	15
3.1.3. Elektron Işın Ergitme (Electron Beam Melting)	17
3.1.4. Direkt Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering).....	18
3.2. PASLANMAZ ÇELİKLER	19
3.2.1. Paslanmaz Çeliklerin Tanımı.....	19
3.2.2. Paslanmaz Çelik Türleri	20

	<u>Sayfa</u>
3.2.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler	21
3.2.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	22
3.2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler	22
3.2.2.4. Dubleks (Duplex) Paslanmaz Çelikler	22
3.2.2.5. PH (Çökelmeye Sertleşebilen) Paslanmaz Çelikler	23
3.2.3. 17-4 PH Paslanmaz Çeliğinin Özellikleri.....	23
3.3. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA TEKNİĞİ (MQL).....	24
3.4. TALAŞLI İMALAT	26
3.5. ÇELİKLERE UYGULANAN TEMPERLEME (MENEVİŞLEME) İŞLEMLERİ	27
BÖLÜM 4	29
MATERYAL VE YÖNTEM	29
4.1. DENEY MALZEMESİ	29
4.2. TAKIM TEZGÂHI.....	31
4.3. DENEYLERDE KULLANILAN KESME PARAMETRELERİ	31
4.4. MQL SİSTEMİ.....	32
4.5. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	33
4.6. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	33
4.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ	33
4.8. KESME SICAKLIĞI ÖLÇÜMÜ	34
4.9. TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ	34
BÖLÜM 5	36
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	36
5.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	36
5.2. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	40
5.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	41
5.4. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ	45
5.4. TİTREŞİMİN DEĞERLENDİRİLMESİ	50
BÖLÜM 6	54
SONUÇLAR	54
6.1. SONUÇLAR	54

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1.	Toz yataklı füzyon sistemi seçici lazer eritme şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.2.	SLM 280 HL Printer cihazı.....	16
Şekil 3.3.	Elektron ışın ergitme yönteminin şematik görünümü.....	18
Şekil 3.4.	DMLS şematik görünümü.....	19
Şekil 3.5.	1980'den 2017'ye kadar olan dönemde ana metallerin yıllık bileşik büyüme oranı.....	20
Şekil 3.6.	MQL püskürtme sistemi.....	26
Şekil 3.7.	Dik işleme modeli.....	27
Şekil 4.1.	PH 17-4 alaşımı tozunun görüntüsü.....	29
Şekil 4.2.	Nikon SLM 500 eklemeli imalat cihazının görüntüsü.....	30
Şekil 4.3.	CNC dik işleme tezgâhı ve test düzeneği.....	31
Şekil 4.4.	MQL soğutma sisteminin şematik görüntüsü.....	32
Şekil 4.5.	Data logger ve K tipi ısıl-çiftin görüntüsü.....	34
Şekil 4.6.	K333D01-VM dijital titreşim ölçer.....	35
Şekil 5.1.	Temperleme işlemi sonrası 17-4 PH çelikten alınmış optik mikroskop görüntüleri: a) işlemsiz, b) 580 °C'de 1 saat, c) 580 °C'de 2 saat, d) 580 °C'de 3 saat.....	37
Şekil 5.2.	24 saat derin kriyojenik işlem uygulana takım için EDS sonuçları.....	39
Şekil 5.3.	Kesme hızına göre yüzey pürüzlülüğü değerinin dağılımı: a) kuru b) MQL destekli işleme.....	42
Şekil 5.4.	İlerleme miktarına göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı: a) kuru b) MQL destekli işleme.....	44
Şekil 5.5.	Kesme hızına göre kesme sıcaklığı değerinin dağılımı: a) kuru b) MQL destekli işleme.....	46
Şekil 5.6.	İlerleme miktarına göre kesme sıcaklığı değerlerinin dağılımı.....	47
Şekil 5.7.	Mastar malzeme ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulana numunelerin işlenmesi sonrası kesici takımların SEM görüntüleri.....	49
Şekil 5.8.	Kesme hızına göre titreşim değerinin dağılımı: a) Kuru b) MQL destekli işleme.....	51
Şekil 5.9.	İlerleme miktarına göre titreşim değerlerinin dağılımı.....	52
Şekil 5.10.	Mastar malzeme ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numuneler için talaş görüntüleri.....	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Katmanlı imalatta kullanılan metal ve alaşımları sınıflandırma.	14
Çizelge 3.2. 17-4 PH paslanmaz çeliğinin % kimyasal bileşimi.	23
Çizelge 3.3. 17-4 PH paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri	24
Çizelge 4.1. PH 17-4 alaşım tozunun % kimyasal bileşimi.	29
Çizelge 4.2. seçici lazer ergitme (SLM) üretim parametreleri.	30
Çizelge 4.3. Deneyleerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri.	32
Çizelge 4.4. Deneyleerde kullanılan kesme sıvısının özellikleri.	33
Çizelge 5.1. 17-4 PH çeliği numunelerin sertlik değeri.	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Ra : ortalama yüzey pürüzlülüğü
V : kesme hızı
f : ilerleme miktarı
a : talaş derinliği
Al : alüminyum
Cr : krom
Ni : nikel
Mn : mangan
Si : silisyum
Co : kobalt
Ti : titanyum
CI : güven aralığı
 α : anlamlılık düzeyi
fe : hata serbestlik derecesi
 n_{eff} : etkili yineleme sayısı
Ve : hata varyansı

KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
TS : Türk Standardı
PVD : Physical Vapour Deposition (Fiziksel buhar çökeltme)
CVD : Chemical Vapour Deposition (Kimyasal buhar çökeltme)
SEM : Scanning Electron Microscope (Tarama elektron mikroskobu)
WC : Tungsten Karbür

BUE : Built Up Edge (Yığıntı Talaş)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojileri, temelleri ilk olarak 1980'li yıllarda atılmıştır. 1984 yılında Charles Hull, stereolitografi (SLA) yöntemini icat etti ve 1986 yılında bu teknoloji için patent alarak piyasaya sürmüştür. 2000'li yılların başlarında eklemeli imalat teknolojileri daha fazla erişebilir olmasıyla birlikte son yıllarda gelişen ve geniş bir yelpazede uygulama yenilikçi imalat yöntemlerinden biri haline gelmiştir. 2010'lardan sonra daha fazla malzeme türü ile baskı yapma imkanı sağlamaktadır. Günümüzde özellikle metal eklemeli imalat teknolojileri, enerji savunma, medikal havacılık, otomotiv ve inşaat sektörlerinin gelişmesinde önemli rol oynamaktadır [1].

Eklemeli imalat teknolojisi, özellikle yüksek performanslı malzemelerin karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak sağlayan yenilikçi bir yöntemdir. Özellikle havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde yüksek mukavemetli ve işlenebilir malzemelere ihtiyaç artmaktadır. 17-4 PH paslanmaz çelikler sahip oldukları yüksek mukavemet ve sertlik, korozyon direnci gibi özellikler bakımından ihtiyaçları karşılamaktadır. İşlenmesi zor olan 17-4 PH paslanmaz çelikler, üretim maliyetleri oldukça yüksek olduğu için, talaşlı imalat ile işlenirken yapılacak hatalar ciddi maddi kayıplara yol açacaktır. Eklemeli imalat ile oluşacak hatalar en aza indirgenerek maddi kayıpların önüne geçilebilir [2].

Bu çalışmada, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde oldukça sık kullanılan 17-4 PH çeliğinin işlenebilirliği, mikro yapı ve temperleme işleminin incelenmesi amaçlanmıştır. Üretimi tamamlanan ürünlerin kalitesinin kontrol edileceği çeşitli işlenebilirlik yöntemleri bulunmaktadır, örneğin frezeleme uygulanan iş parçalarında yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, işleme kuvvetleri, ısı oluşumu gibi durumlar işleme operasyonları için istenmeyen bir durumdur. İşleme sırasında oluşan ısının azaltılması son derece önemli olması işlenebilirliği etkilemektedir. Bu nedenle, ısı azaltmak ve

işlenebilirliği iyileştirmek için MQL destekli işleme yöntemi önem arz etmektedir. Genellikle MQL yöntemi ile işleme sırasında kullanılan kesme sıvıları temas bölgelerindeki sürtünme kuvvetini azaltarak hem kesici takımını hem de iş parçasını soğutmada önemli görev almaktadır. Bu yöntemde, MQL destekli işleme şartlarında işlenen numunenin titreşim, talaş özellikleri incelenmiştir. Buna bağlı olarak kuru işleme şartlarında oluşan talaş ve titreşim temperlemeye bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca ticari olarak tedarik edilen ve SLM ile üretilen 17-4 PH çelikler arasında ısıtım işlem sonrası uygulama sonrası sertlik ölçümleri karşılaştırılmıştır. Özellikle, temperleme öncesi ve sonrası mikroyapı etkileri araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN 17-4 PH ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE MİKRO YAPISAL KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Mahmuodi ve arkadaşları, eklemeli imalat yöntemini (SLM) kullanarak üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin mekanik ve mikro yapısal özelliklerini incelemiştir. Karakterizasyon çalışmaları mekanik basma ve çekme testi, mikrosertlik testi, optik mikroskop ve elektron mikroskobu kullanarak SLM koşullarına ve ısıl işleme bağlı olarak mikro yapı ve faz bileşimlerinin geleneksel yöntemlerle üretilenlerden çok farklı olacağını belirtmişlerdir. İstenilen çekme özelliklerini elde etmek için ısıl işlemin gerekli olduğunu ve sertliğini artırdığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, üretilen diğer numunelere göre daha az sünek olduğunu gözlemlemişlerdir [3].

Vunnam ve arkadaşları, eklemeli imalat yöntemini (SLM) kullanarak üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısı gelişimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Martenzitik bir 17-4 PH bileşeni elde etmek üretim sonrası herhangi bir ısıl işlem uygulamamışlardır. Sonuç olarak, SLM ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik üretildiği durumda çeşitli miktarlarda ferrit, östenit ve martenzit içeren karmaşık ve homojen olmayan bir mikroyapı elde etmekte olduğunu belirtmişlerdir. 17-4 PH' nin SLM ile üretilmesi sırasında, katılma sıcaklığının altında feritten östenit faza dönüşmesi başlangıçta ki tozun bileşimine bağlıdır ve bu durum üretimi tamamlanmış durumdaki mikroyapı ve faz değişimlerine sebep olduğunu gözlemlemişlerdir [4].

Guennoini ve arkadaşları, lazer ışını eritme işlemi kullanılarak konvensiyonel imalat ve eklemeli imalat ile elde edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin mikroyapılarını karşılaştırmışlardır. Her iki malzemede aynı H900 ısıl işlemi 1040 °C'de tavlama ve

480 °C' de yaşlandırma işlemi sonra incelemişlerdir. XRD analizinde geleneksel imalat yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz elik numunesi için daha yüksek östenit içeriğe sahip olup (%0.8), eklemeli imalat (%12,6) arasında önemli farklılıklar gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte eklemeli imalatla üretilen 17-4 PH eliğinin daha az sünek olduğu ve mikroyapıdaki gözeneklerin çok düşük olduğu gözlemlenmiştir [5].

Sun ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğe yapılan ısıl işlemin mikroyapıya etkisini incelemiştir. Bu imalat yöntemlerinde bileşenler genellikle dengesiz mikroyapılara sahip olduğu için ısıl işlemi önermişlerdir. Bu alışmada Prox4 SLM makinesi kullanarak paslanmaz elik numuneleri 10x10 kesitli 50 mm yüksekliğinde üretmişlerdir. H 900 koşulunda ısıl işlem sonrası numunelerin tane yapısı önemli ölçüde değişmediğini belirtmişler ortalama martenzit blok boyu, doku kanıtı olmadan 2.9 μm 'dir. Yapılan analizler sonucunda, ısıl işlem sırasında tane sınırı değişimi oksit inklüzyonları tarafından verimli bir şekilde sabitlendiği çözelti ısıl işlem görmüş dövme numunelerinden daha rafine bir tane yapısına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, H 900 ısıl işleminden sonra hem eklemeli olarak üretilen hem de işlenmiş 17-4 PH numuneleri için benzer mikro yapıların ve fazların elde edildiğini söylemişlerdir [6].

Yadollahi ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilen 17-4 PH eliğin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini geleneksel olarak üretilmiş malzemelerle karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada eklemeli imalat ile üretilen 17-4 PH malzeme akma ve çekme mukavemeti geleneksel malzemelerden H 900 ısıl işlem koşulu ile önemli ölçüde düşük sonuçlar elde etmişlerdir. Üretilen yatay ve dikey numunelerde daha yüksek akma mukavemetleri gözlemlemişlerdir. Yatay olarak üretilen numunelerin nihai çekme dayanımları ve kopmaya kadar ki uzamaları hem üretilen haliyle hem de ısıl işlem görmüş koşulda dikey üretilen numuneden daha yüksek olduğunu söylemişlerdir. Sonuç olarak, bunun nedenini yatay ve dikey üretilen numunelerin üretimi sırasında farklı soğuma hızlarının farklı mikro yapılara ve dolasıyla farklı mekanik davranışlara neden olduğunu tespit etmişlerdir [7].

Sabooni ve arkadaşları, farklı bileşimlere sahip olan iki ticari 17-4 PH paslanmaz çelik tozu ile eklemeli imalat yöntemi kullanarak ısıtılarak mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Karşılaştırma için 17 mm çapında bir çubuk üretmişlerdir. Eklemeli imalat ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin mikro yapısı, büyük ölçüde hammadde tozunun kimyasal bileşimine bağlı olduğunu söylemişlerdir. Cr oranına göre seçici lazer eritmeden sonra baskın bir martensitik/ferritik mikro yapılar beklenebileceğini ön görmüşlerdir. Cr oranının artırılması δ -ferrit faz fraksiyonuna yol açacağını belirtmişlerdir. Martensitik veya ferritik mikro yapıya sahip basılmış numuneler için farklı yaş-sertleşme tepkileri gözlemlemişler. Bununla birlikte, ferritik mikro yapıya sahip numunedeki geri döndürülmüş östenitin hacim fraksiyonu, 1 saatlik yaşlandırmadan sonra sadece %1,15 olarak belirtmişlerdir [8].

Kaynak ve arkadaşı, ısıtılma sonrası eklemeli imalat ile üretilen 316 L paslanmaz çeliği yüzey özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada finiş işleme, vibrasyonlu yüzey işleme ve sürüklenme finiş işlemleri yapmışlardır. Ayrıca, yüzey topografyası, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik, mikro yapı ve XRD analizleri yapılarak işleme sonrasında kaynaklanan yüzey özelliklerini de incelemişlerdir. Kuru ve soğuk hava koşulları, titreşimli yüzey finiş ve seramik aşındırıcılar kullanarak finiş işleme yapmışlardır. Üretilen numunelerin son derece düşük yüzey kalitesi genellikle kabul edilemez olduğunu ve finiş işlemin gerektiğini savunmuşlardır. Yüzey kalitesini ölçerken 3 boyutlu yüzey profilometre kullanmışlardır. Finiş işleme süreçleri yüksek yüzey kalitesi sağlasa da karmaşık şekillere sahip eklemeli imalat parçalarına finiş işleme için sürüklenme finiş ve titreşim yüzey finiş tekniklerinin kullanılmasını önermişlerdir. Sonuç olarak incelenen üç işlem sonrası, karmaşık şekillere sahip eklemeli imalat parçaları için sürüklenme finişinin en umut verici son işlem tekniği olduğunu önermişlerdir [9].

Irrinki ve arkadaşları, L-PBF (Lazer Toz Yataklı Füzyon) ile üretilen 17-4 PH çeliğinin mikroyapısı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı lazer güçlerinde bir adet 17-4 PH gaz atomize üç adet 17-4 PH su atomize toz malzeme kullanmışlardır. 64 ve 80 J/mm²'lik düşük enerji yoğunluklarında, düşük gözenekliliğe ve yüksek yoğunluklu (~%97 yoğunluklu) L-PBF parçaları, daha küçük partikül boyutlarındaki gaz atomize

($D_{50} = 13 \mu\text{m}$) ve su atomize ($D_{50} = 17 \mu\text{m}$) tozlar, ancak daha kaba su atomize tozlardan üretilen L-PBF parçaları için daha düşük yoğunluklar (~%87-92) ve büyük düzensiz gözenekler gözlenmiştir. Tüm su atomize L-PBF parçaları için nihai çekme mukavemetleri (UTS), UTS'si 1000-1120 MPa olan gaz atomize L-PBF parçalarından daha düşük olan 470 ila 690 MPa arasında değiştiklerini vurgulamışlardır. Tüm enerji yoğunlukları için, gaz atomize L-PBF parçalarının XRD modeli yalnızca martensit fazlarından oluşurken, su atomize L-PBF parçalarının XRD modeli östenit ve martensit fazlarının bir karışımından oluşuyordu. Enerji yoğunluğu 64 J/mm'den arttığında 104 J/mm'ye kadar, 104 J/mm'de üretilen gaz atomize L-PBF parçaları hariç tüm L-PBF parçaları için tane boyutu azaldığı belirtilmiştir [10].

Dilip ve arkadaşları, HY 100 çeliğinin eklemeli imalat ile üretilen numunelerin proses parametreleri, mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Katman kalınlığı 5-40 μm olan 10x10x10 mm küp numuneler üretmişlerdir. Eklemeli imalat ile üretilen numunelere 2 saat boyunca 620°C, 650°C ve 670°C, sonrasında 900°C 1 saat temperleme uygulamışlardır. HY 100 çelik tozu, eklemeli imalat ile kullanılarak başarılı bir şekilde işlenebileceğini savunmuşlardır. Enerji yoğunluğu artan proses parametreleri gözeneklerin azalmasına sebep olduğunu vurgulamışlardır. Üretilen numuneler, numuneleri, önceden ince östenit sütunlu taneler ile alternatif temperlenmemiş (sert) ve otomatik temperlenmiş (yumuşak) martensit katmanlarına sahip mikro yapılar göstermiştir. Böyle homojen olmayan bir mikro yapı, katman katman imalat sırasında çoklu termal döngü etkilerinin sonucu olduğunu vurgulamışlardır. İnşa edilmiş numuneler, yatay olarak inşa edilmiş numunelere kıyasla dikey olarak inşa edilmiş numunelerde daha yüksek gerilme uzaması göstermiştir. Su verilmiş ve temperlenmiş numuneler, düzgün temperlenmiş martensit mikro yapısı ile 10 μm 'lik tamamen yeniden kristalize edilmiş tane yapıları gösterir. 650 ° C'de söndürme ve temperleme işlemi, HY100 parçalarında arzu edilen gerilme mukavemeti ve iyi süneklik sergilediğini vurgulamışlardır [11].

Nong ve arkadaşları, 15-5 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısını ve mekanik özellikleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Gaz atomize 15-5 PH çeliği kullanarak üretilen numuneleri SEM analizi ile incelemişlerdir. Bu çalışmada dört farklı lazer tarama stratejisini kullanmışlardır. Numunelerin yoğunluğu, mikroyapısı, dokusu ve mekanik

özellikleri değerlendirildi. SLM tarafından dört farklı tarama stratejisi kullanılarak üretilen örneklerin YS ve UTS'leri sırasıyla 808 ve 892 MPa ve 1167 ve 1191 MPa arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde, uzama bu örneklerin %14.1 ile %18.7'si arasında farklılık göstermiştir. Yüksek yoğunluk ve daha ince tane yapısı, rafine edilmiş tutulan östenit ile birlikte, ada stratejisi kullanılarak SLM tarafından üretilen numunenin mükemmel mekanik özelliklerine katkıda bulunmuştur. Sonuçlar, yoğunlaşma, mikro yapı, kristalografik doku ve mekanik özelliklerin farklı tarama stratejileri kullanılarak SLM aracılığıyla uyarlanabileceğini göstermiştir [12].

2.2. PH PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN İŞLENEBİLİRLİK ÇALIŞMALARI

Sivaiah ve Chakradhar çalışmasında, 17-4 PH çeliğinin tornalamasında kriyojenik, MQL ve kuru işleme gibi farklı çevresel temiz işleme süreçlerinin fizibilitesini incelemişlerdir. Tornalama deneylerini yuvarlak çubuk numuneler ile her iki uçnuma merkezleme puntası açarak işlemeye hazır hale getirmişlerdir. Yüzey çatlakları ve parçada oluşacak salgıyı ortadan kaldırmak için 1 mm talaş kaldırarak ilerleme hızı, kesme derinliği sabit parametre, kesme hızı değişken parametre olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak, kesme hızı arttıkça işleme bölgesindeki sıcaklığın tüm ortamlarda artmasının nedenini iş parçası ve takım arasında sürtünmeden meydana geldiğini söylemişlerdir. Soğutma ortamında, kriyojenik işleme koşulları kesme sıcaklıklarını önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Genel olarak, kriyojenik işlemede kuru, ıslak ve MQL işlemede bulunan ilgili sıcaklık düşürme aralığı sırasıyla %63-72, %50-62 ve %49-61 iken, kesme hızı 25 m/dk'dan 132 m/dk'ya yükseldiğini belirtmişlerdir [13].

Leksycki ve arkadaşları, 17-4 PH paslanmaz çeliğin tornalanmasında toplam kesme kuvveti, ve talaş şekli değişikliklerini analizini yapmışlardır. Numuneler C502 universal torna tezgahı kullanılarak işlemişlerdir. Toplam kesme kuvvetinin üç bileşenin ölçümleri (kesme F_c , besleme F_f ve pasif F_p) Kistler 9129A piezoelektrik dinamometre kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kesme kuvvet ve besleme kuvveti ıslak kesme koşulları altında test edilen çeliğin ortogonal tornalanması Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile de hesaplamışlardır. Sonuçlar deneysel çalışmalardan elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. 0,05-0,4 mm/dev değişken ilerlemeler ve 0,2-1,2 mm

kesme derinliği ve 220 mm/dak kesme hızı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, kuru kesme koşullarıyla karşılaştırıldığında, kesme kuvvetinde %43 ve %39'luk bir azalma F_c sırasıyla ıslak işleme ve MQL işleme için elde etmişlerdir. Soğutma koşullarından bağımsız olarak, uygun bir talaş şekli kaydedilmiş. $a_p = 1-1,1$ mm ve $f = 0,25-0,3$ mm/dev. Deneysel çalışmalarla karşılaştırdıklarında ise FEM simülasyonu F kesme kuvveti için ~%13'lük ce F besleme kuvveti için ~%36'lık farklar tespit etmişlerdir [14].

Basmacı ve arkadaşları, 17-4 paslanmaz çeliğin silici ve geleneksel kesici uçlar ile kuru şartlarda tornalanmasının kesme kuvvetleri ve yzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. KC5010 PVD TiAlN kaplı geleneksel kesici uçlar ile işlenebilirlik üzerinde yapılan bu çalışmanın faydalı sonuçlar ortaya koyduğunu vurgulamışlardır. İşlenebilirlik kriterleri yzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve malzeme sertliğine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti için en uygun kesme parametreleri 0,1 mm/dev ilerleme, 0,4 mm kesme derinliği ve 0,8 mm köşe yarıçapı olarak belirlenmiştir. İşlenen yzeydeki yzey pürüzlülüğü değerindeki en etkili kontrol faktörü ilerleme hızıdır. İlerlemenin en kullanışlı faktör olduğu, yine de kesme derinliği ve kesme hızının da rol oynadığı gözlemlenmiştir. Test sonuçları, kesici uçların yzey pürüzlülüğü sağlamasında etkin olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçlar ayrıca, silici u kullanımının yüksek ilerlemeli tornalama işlemlerinde işlenmiş yzey pürüzlülüğünü değiştirmeden kesme verimliliğini önemli ölçüde artıran etkili bir yol olduğunu gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [15].

Ay ve arkadaşı, 17-4 PH paslanmaz çeliğin işleme parametrelerini deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçların daha sağlıklı optimal sonuçlara ulaşarak zaman ve maliyetten kazanımların olacağı düşünülerek, istatistiksel bir yöntem olan Taguchi metodu kullanmışlardır. Taguchi ile hem deney tasarımı yaparak daha az deney ile daha verimli sonuçlara ulaşmışlardır. Sonuç olarak, deneysel ve istatistiksel yöntemler kullanarak yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar; deney tasarımı aşamasında belirlenen parametreler ile bu çalışmada hedeflenen, yzey kalitesi ve kesme kuvveti parametreleri uyuşmuş ve çalışmanın başarıya ulaştığını söylemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada kesme kuvvetine talaş derinliği, ilerleme ve u

radüsünün etkisi incelenmiş artan talaş derinliği ve ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin de arttığını belirtmişlerdir [16].

Li ve arkadaşları, eklemeli imalat ve geleneksel yöntemler ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin işlenebilirliği karşılaştırmışlardır. Tornalama deneyleri üç hız kademesinde 0,005 mm ile 0,6 mm arasında değişen farklı kesme derinliklerinde gerçekleştirilmiştir. Kesme hızı 40 m/dk olduğunda, geleneksel yöntem ile üretilen 316L talaşları 0,6 mm kesme derinliğinde tırtıklı özellikler gösterme eğiliminde olup; hız 80 m/dk olduğunda, kesme derinliği 0,05 mm'den büyük olduğunda eklemeli imalat ile üretilen 316L talaşları tırtıklı hale geldiğini tespit etmişlerdir. İşlenen parçalarda plastik deformasyon ve mikro yapı özellikleri, tırtıklı talaş oluşumunu etkilediğini gözlemlemişlerdir. Kesme kuvvetleri ve parçaların işlenmesindeki kuvvetlerin daha küçük olmasıyla kesme derinliğinin artmasıyla farkın daha büyük olduğunu görmüşlerdir. Kusurlar olarak ise mikro/nano gözenekler, çukurlar ve kümelenmiş yetersiz kaynaklı malzemelerin yapışması eklemeli imalat ile üretilmiş malzemenin yüzeyinde ki en büyük kusur olarak belirtmişlerdir [17].

Çetin ve arkadaşı, 15-5 PH paslanmaz çeliğin kuru tornalamasında kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği kontrol faktörlerinin kesme kuvveti (F_c) ve yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. PVD TiAlN-AlCrO- ve CVD TiCN-Al₂O₃-TiN kaplı karbür kesici takım uçları kullanılarak, L18 ($2^1 \times 3^3$) Taguchi karışık ortogonal dizisi aracılığıyla bir dizi tornalama deneyi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, F_c 'yi etkileyen en önemli kesme parametresinin kesme derinliği olduğunu, R_a ise en fazla katkıyı ilerleme oranının sağladığını tespit etmişlerdir. F_c için 0,981 ve R_a için 0,988 gibi yüksek bir belirleme katsayısına ulaşmışlardır. Kesme kuvveti için optimum kontrol faktörleri CVD kaplamalı kesici takım, 250 m/dk kesme hızı, 0,1mm/r ilerleme hızı ve 0,5 mm kesme derinliği olarak belirlenirken, yüzey pürüzlülüğü için optimum kontrol faktörleri CVD kesici takım, 200 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/r ilerleme hızı ve 0,5 mm kesme derinliği olarak belirlemişlerdir. Kesme kuvveti ve yüzey sertliği için doğrusal regresyon modeli ile elde edilen denklemlerden R^2 değerleri sırasıyla %89,93 ve %87,04 olarak hesaplamışlardır. Bu değerler kuadratik regresyon modelinde %98,11 ve %98,79 olarak bulmuşlardır. Sonuç olarak

15-5 PH paslanmaz çeliğin tornalanmasında Taguchi yöntemi, enerji tüketimini azaltmak ve ürün kalitesini artırmak için başarıyla kullanılacağını söylemişlerdir [18].

Silva ve arkadaşları, 316L paslanmaz çelik ve 18Nİ300 çeliğinin geleneksel metalurjik koşullara göre mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü ve işlenebilirliği üzerinde çalışmışlardır. Malzemelerin işlenebilirliği, kuru koşullar altında universal torna tezgahı kullanılarak uzunlamasına tornalama işlemi yapılmıştır. Kesme kuvvetleri, KISTLER 9257 çok kanallı sinyal amplifikatörüne ve Advantech veri toplama sistemine bağlı akım taşıyıcısına monte edilerek piezoelektrik dinamometre ile ölçmüşlerdir. Operasyonel parametrelerle ilgili olarak, iki dönme hızının (1800 ve 2500 dev/dk), üç ilerlemenin (0,05, 0,1, 0,2 mm/dev) ve üç kesme derinliği (0,1, 0,2, 0,3 mm) kombinasyonları üzerine çalışmışlardır. Eklemeli imalat ile üretilen çeliklerin gözlemlenen daha yüksek mekanik davranışa rağmen, geleneksel yöntemle üretilen malzemelerin işlenmesinde kesme basıncı önemli bir basınç elde edilmemiş olup eklemeli imalat ile üretilen test edilmiş çeliklerin işlenmesi için ek bir enerji gereksinimi olmadığını belirtmiştir. Kesme yükleri üzerinde önemli bir takım etkisi fark etmişlerdir. Her iki kesici ucun ince talaş işleme operasyonlarında önemli ölçüde daha düşük kesme yükleri gözlemlenmiştir [19].

Bai ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilen 316 L paslanmaz çeliğine ısı işlem uygulayıp mikro yapısını ve işlenebilirliğini incelemişlerdir. Deneyle EOS M 290 makinesinde tozu hızlı eritmek için 400 W lazer gücü ve 4 numune kullanmışlardır. Önce mikroyapı ve faz bileşimlerini analiz ederek sonrasında, mikro sertlik, kesme kuvveti ve takım aşınması yüzey kalitesi ve topografya ve talaş morfolojisi incelemişler ve analiz yapmışlardır. Numuneler üretildikten sonra herhangi bir son işleme tabi tutmamışlardır. 480 ve 520 °C iki yaşlandırma uygulaması 1, 6 ve 12 saat olarak belirlemişlerdir. Çözelti işlem sıcaklığı 900 °C uygulamışlardır. Doğrudan yaşlandırma işleminden sonra, östenit içeriği üst yüzeyde %6,2'den %12'ye çıkmıştır. Frezeleme deneyleri dikey bir CNC işleme merkezinde kesme parametreleri, kesme hızı 245 m/dk, 3900 rpm, besleme hızı 468 mm/dk, kesme derinliği 0,15 mm ve Ø 20 mm tutucu kullanmışlardır. Üretilen numuneler üst ve yan yüzeyleri arasındaki mikro yapı ve eriyik üzerindeki fark, işlenebilirlikte farklılığa yol açmıştır. Üst yüzey sertliği, kesme kuvveti ve takım aşınması, yan yüzeyden daha yüksek çıkmıştır. Yaşlandırma

işlemi görmüş numunelere karşılık gelen tüm kesici takımlar ciddi anlamda aşındığını tespit etmişlerdir. Yüzey mikro sertliği, frezelemeden sonra kalan basınç geriliminden kaynaklanan maranging çelik numuneleri için önemli ölçüde artacağını ve kesme uzunluğunun artması, takım aşınmasından dolayı yüzeyin daha da sertleşeceğini söylemişlerdir. Bu numunelerin yüzey mikro sertliği, kesme kuvveti ve takım aşınması, yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelere kıyasla %40-%50 oranında azaldığını ve yüzey pürüzlülüğünün freze ile işlendikten sonra 0,6µm altına ulaştığını tespit etmişlerdir [20].

Tamura ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilen maranging çeliğinin frezele işleminde kesme kuvvetlerini incelemişlerdir. Numuneler, maranging çelik toz boyutu 10 ile 45 µm arasında olan malzeme kullanarak X eksenine göre 0/90 °C 45/-45 °C lazer tarama yöntemi ile iki kübik iş parçası işlemişlerdir. Kesme testleri, üç eksenli bir işleme merkezi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Numuneleri epoksi reçinelere gömerek piezoelektrik dinamometreye bağlamışlardır. Kesme kuvvetleri arasında karşılaştırma yapılarak SLM 0/90'ın X bileşeni grafiği 0,02-0,35 s'de doğrusal olarak arttığını ve SLM 45/-45'in kesme süresi ile eğrisel değiştiğini belirtmişlerdir. SLM 0/90'ın X bileşenindeki maksimum ve minimum, SLM 45/-45 ve dövme iş parçasıninkilerle hemen hemen aynı olmasına rağmen, SLM 0/90'ın Y bileşenindeki maksimum, diğer iş parçalarına kıyasla küçük olacağını tespit etmişlerdir. Ölçülen kesme kuvveti, kesme kuvvetindeki değişim hızı ile analiz edilir. Kesme kuvveti üzerindeki anizotropik etki, lazer tarama yönü tarafından kontrol edilen iş parçalarının frezelemelerindeki değişim oranlarının karşılaştırılmasıyla doğrulamışlardır [21].

2.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ ÖZETİ

Literatür araştırmaları incelendiğinde, nikel esaslı bir süper alaşım olan 17-4 PH çeliği ile ilgili işlenebilirlik, mikroyapı üzerine yoğunlaştığı gözlenmiştir. Ancak, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliklerinin işlenebilirliği, kesme kuvvetleri, temperleme etkisi detaylı incelenmesi üzerine çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, literatür çalışmalarından farklı olarak işlenmesi zor olan 17-4 PH çeliğinin işlenebilirlik deneyleri yapılacaktır. Tornalama deneylerinde elde edilen

kesme kuvvetleri ve temperleme etkileri araştırılarak bu çeliğin kesme mekaniğinin anlaşılmasına katkı sağlanacaktır. Özellikle, havacılık ve uzay sanayinde kullanılan bu malzemenin eklemeli imalat ile üretimi sonrasında temperlemenin mikroyapıya etkisi ve işlenebilirliği ile literatüre veri sağlanması amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 3

KURAMSAL TEMELLER

3.1. EKLEMELİ İMALAT

3.1.1. Giriş

Eklemeli İmalat (Eİ) süreçleri, bir parçanın üç boyutlu (3D) verilerinden katman katman üretildiği yöntemdir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde (tornalama, frezeleme, delme, taşlama vb.) ve talaşsız imalat (döküm, ekstrüzyon, plastik şekil verme, kaynak, sıvama vb.) yöntemleri başlıca imalat yöntemleri olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte yeni nesil imalat yöntemleri sektöre giren eklemeli imalat yöntemleri olmuştur. Bu yöntem geleneksel yöntemlerden farklı olarak üretilemeyen geometrik olarak karmaşık nesnelerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat, Endüstri 4.0 ile ortayı çıkıp üretim yeteneği için büyük fırsatlar sunmaktadır. Buna ek olarak, metaller, seramikler ve polimerler de dahil olmak üzere çok fazla farklı malzemelerin imalatına uygun esnek ve son derece özelleştirilebilir üretim tekniklerine sahiptir [22]. Çizelge 3.1 'de kullanılan metal ve alaşımları malzemeleri göstermektedir. Aynı zamanda üreticilerin tedarik zincirlerini ve teslim sürelerini kısaltma hedefini de kolaylaştırmaktadır. Eklemeli imalat teknikleri, mevcut parçayı üretmek imal etmek için gerekli malzemeyi kullanarak atık malzemeyi en aza indirgeyerek hammadde açısından tasarruf avantajı sağlamaktadır.

Çizelge 3.1. Katmanlı imalatta kullanılan metal ve alaşımları sınıflandırma.

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

Katmanlı imalat, özellikle tasarımcıların ya mevcut ürünlerin tasarımını ya da geleneksel üretim teknikleriyle elde edilemeyen tasarımlara işlevsellik yeteneği kazandırarak yeni yaklaşımlar ve avantajlar sunmaktadır.

Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla katmanlı imalatın sağladığı avantajlar:

- Tasarım serbestliği ve kolaylığı,
- Kafes yapılı tasarımlarda daha hafif ve dayanıklı yapılar elde edilmesi,
- Montajlı parçaların tek seferde elde edilmesi.
- Ham maddeden kalan atık malzemenin azalması ve tekrar kullanılabilir olması.
- Geometriye bağlı olarak geleneksel yöntemlere göre daha hızlı üretim imkanı.
- Karmaşık yapıdaki parçaların tek proseste imal edilebilmesi.

Katmanlı imalatın bu avantajlarına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

- Kİ yöntemiyle üretilen parçaların boyutu makine boyutu ile sınırlıdır.
- Seri üretim için geleneksel yöntemlere kıyasla uygun olmayıp karmaşık ve özel yapılara sahip parçalar üretilmektedir.
- Kİ ile üretilen parçalar yapı tablasından çıkarılabilmemesi ve parçanın fiziksel olarak yapısının bozulmasını için destek elemanları gerekmektedir. Destek

elemanlarının üretilmesi hem enerji sarfiyatı hem de fazla malzeme kullanılacağı için malzeme maliyetine sebep olacaktır.

- Kİ üretimde ani soğumaya bağlı artık gerilmeler ve boşluklu yapılar meydana gelmektedir [23].

Bu bölümde; eklemeli imalat tekniği içerisinde yer alan metal ve alaşımları için üretim metotları açıklanacaktır.

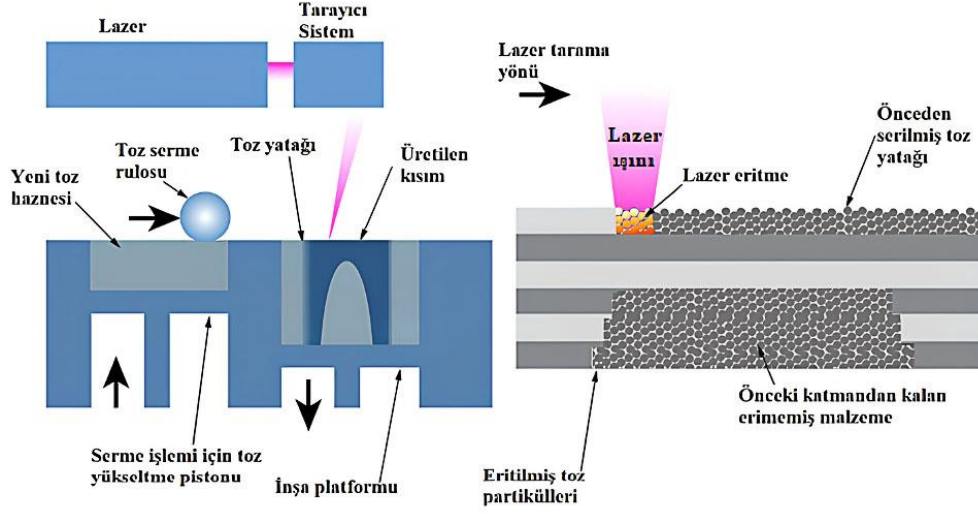
3.1.2. Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)

SLM tekniği, havacılık, uzay, otomotiv, medikal ve AR-GE gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sistemler dünya üzerinde çoklu lazerli sistemleri arasında birden fazla lazerin aynı alan üzerinde çalışmasına imkan veren ilk sistemdir [24]. İşlem sırasında, toz biriktirme ve lazer taramayı içeren adımlardan oluşmaktadır. SLE operasyon sırası aşağıdaki adımlara ayrılabilir:

- 3D bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli bir STL dosyasına dönüştürülür.
- Optimum yapı yönüne göre üretimi planlanır. (Z eksenini yüksekliğe, yüzey kaplamasına ve destek yapılarının en aza indirgenmesine bağlı olarak)
- Destek yapıları, minimal destekler için tüm iterasyonlar oluşturulur
- STL model eşit katmanlar halinde dilimlenerek veri makineye aktarılır
- Yapı plakası genellikle termal gradyanı düşürerek ısı dağılımına yardımcı olmak için ısıtılır.
- Önceden tanımlanmış katman kalınlığı tercih edilen toz tabakası yapı plakası üzerine serilir.
- Odaklanmış bir lazer ışını, ilgili bölgeleri seçici lazer olarak tarayarak x-y düzleminde hareket edip katmanı eritir.
- Yapı plakası daha sonra başka bir katmana geçmesi için bir sonraki katmana eşit mesafede indirir.

G'den h'ye kadar sıralamanın tekrarlanması ile parçayı katman katman üretir. Bu yöntemle, paslanmaz çelik, alüminyum alaşımları, titanyum vb. metal tozlarından

işlevsel ürünler üretmek mümkündür. Endüstride ticari olarak kullanılan Nikon üreticisine ait SLM 280 HL cihaz Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



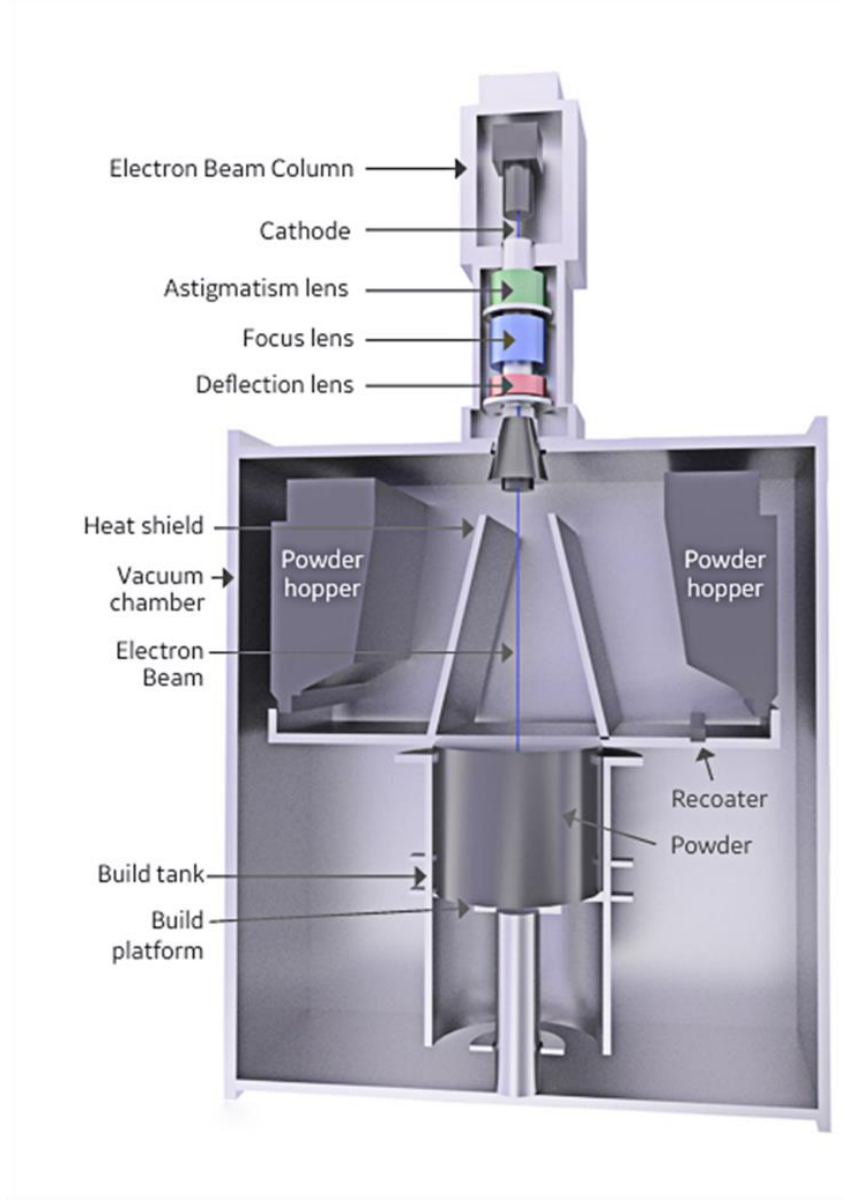
Şekil 3.1. Toz yataklı füzyon sistemi seçici lazer eritme şematik gösterimi [25].



Şekil 3.2. SLM 280 HL Printer cihazı [26] .

3.1.3. Elektron Işın Ergitme (Electron Beam Melting)

Metal katmanlı imalat teknolojilerinden biri olan elektron ışınıyla ergitme (EIE), yenilikçi bir endüstriyel üretim teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, toz halinde bulunan metal malzemeleri elektron ışını yardımıyla eriterek birleştiren proses olarak tanımlanmaktadır ve malzeme çeşitliliği, elektriksel olarak iletken malzemelerde, yani metallerle sınırlıdır. EIE yöntemi ile bir parçayı imal etmek için toz biriktirme, ön ısıtma ve eritme adımlarından oluşur. İlk olarak, bir toz biriktirme mekanizması tarafından inşa edilecek platforma belirlenen katman kalınlığı kadar (0,07 mm kalınlığında) bir toz tabakası serilir. Elektron ışını, metal tozunu sinterleme işlemi esnasında oluşabilecek toz bulutuna karşı malzemenin erime sıcaklığının yaklaşık %50'si kadar ön ısıtma yapar. Ayrıca, ön ısıtma katmanlar arasındaki imal edilecek parça boyunca termal gradyanı azaltmaya yardımcı olur, parçada oluşacak termal stresler azalır. Ön ısıtma tamamlandıktan sonra elektron ışını, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinden alınan 2 boyutlu kesitleri takip ederek metal tozları eritir. Sonraki aşamada ise, inşa platformu bir katman kalınlığı kadar alçalır ve toz biriktirme, ön ısıtma ve eritme adımları imalat tamamlanıncaya kadar tekrarlanır [27]. Elektron ışın ergitme yönteminin şematik görünümü Şekil 3.3' de gösterilmiştir.

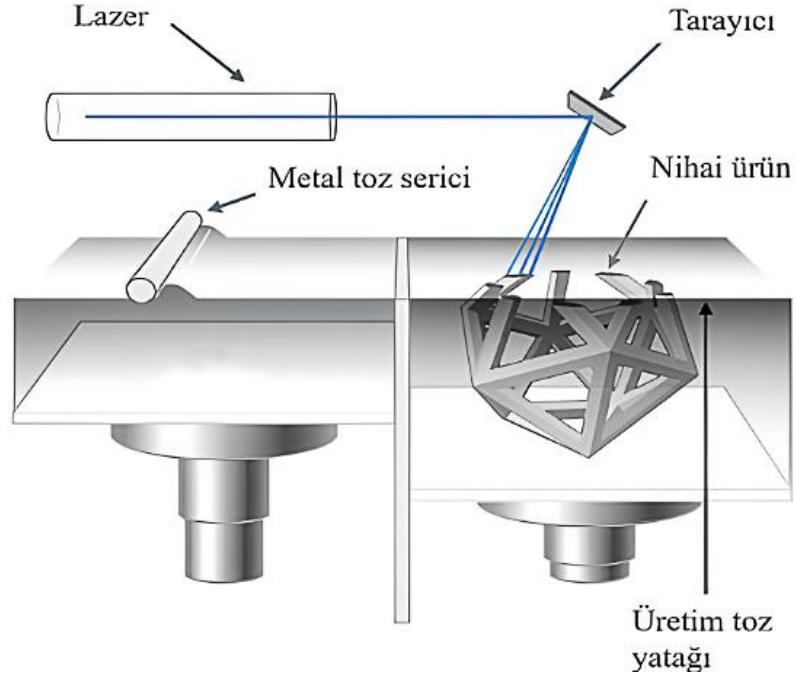


Şekil 3.3. Elektron ışın ertirme yönteminin şematik görünümü [28].

3.1.4. Direkt Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering)

Direkt metal lazer sinterleme (DMLS), Rapid Product Innovations ve EOS GmbH firması tarafından ortak geliştirilen lazer tabanlı eklemeli imalat teknolojisidir. DMLS, yapı platformuna ince bir toz malzeme sermesi ile başlar. Şekil 3.4' te gösterildiği gibi, güçlü bir lazer ışını, üretilecek modeli katmanlar haline ayrıldıktan sonra katman desenlerini tarar ve her katman sonunda lazer tarama tozu doğru pozisyonlarda birleştirir. Aynı anda, yapı platformu her taramadan sonra katman katman aşağı inerek

bu süreçleri tekrar eder. DMLS, geleneksel imalat yöntemlerine göre karmaşık şekilli parçaların üretilmesi için büyük bir potansiyele sahiptir [29].



Şekil 3.4. DMLS şematik görünümü [30].

3.2. PASLANMAZ ÇELİKLER

3.2.1. Paslanmaz Çeliklerin Tanımı

PH çelikler, metalürjide minimum %10,5 krom elementi içeren demir- karbon alaşımı olarak isimlendirilir. Son yıllarda kullanımı artan paslanmaz çelikler korozyona dayanıklı olmaları nedeniyle tercih edilir hale gelmiştir. Aynı zamanda paslanmaz çelikler diğer çeliklere oranla fiyat bakımından daha pahalıdır ancak uzun ömürlü olmaları ve bakım maliyetlerinin daha az olması gibi avantajları vardır. Endüstride havacılık, denizcilik, inşaat, kimya, petrol, inşaat, kimya gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar yüksek mukavemet, sertlik, darbe dayanımı, aşınma ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklere sahiptirler. Metal yüzeyinde oluşan ince koruyucu oksit tabakası sayesinde metale paslanmaz özelliği sağlamaktadır. Ayrıca, paslanmaz çelikler yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıklarında iyi bir performans sergilemektedir. Paslanmaz çeliği diğer ana metallere

karşılaştırıldığında son yıllarda endüstride kullanımı yaygınlaşmıştır. Şekil 3.5’de ana metallerin yıllık bileşik büyüme oranları verilmiştir [31].



Şekil 3.5. 1980’den 2017’ye kadar olan dönemde ana metallerin yıllık bileşik büyüme oranı.

3.2.2. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çelikleri ön plana çıkaran korozyon dayanımlarının yanı sıra, iç yapısını değiştirerek, farklı özelliklerde alaşımlar elde edilebilir. Elde edilen bu alaşımlar arasında en önemli elementler krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunların dışında, bakır, silisyum, alüminyum, titanyum, nitrojen, vanadyum gibi elementler ile farklı mekanik özellikler eklenebilir.

- Krom (Cr), paslanmaz çeliklerde korozyon direncini sağlayan en önemli elementler arasındadır. İçerdiği krom sayesinde çeliğin yüzeyinde ince bir tabaka oluşturur ve oksijenin çelik ile temasını engeller. Bu sayede korozyon direncini artırır. Ancak Krom oranı arttıkça kaynaklanabilirliği azalmaktadır.
- Nikel (Ni), paslanmaz çeliklerde östenitik yapı kazandırır. Çelik yapısı gereği kırılma eğilimi olan ısıtılma işlemi uygulama esnasında kırılabilir. Bu nedenle Nikel kullanımı çeliğin yapısını da kırılma eğilimini azaltır ve tok bir malzemeye dönüşmesini sağlar. Ayrıca asidik ortamlara dayanımı da artar.

- Molibden (Mo), krom ile birlikte kullanıldığında korozyon direncinde büyük artış sağlamaktadır. Molibden oranının artması çeliğin daha yüksek dirence sahip olmasını sağlar.
- Mangan (Mn), paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklığa dayanımını artırmak için kullanılır. Paslanmaz çelik malzemeler yüksek sıcaklık isteyen ortamlarda çalışacak ise Mangan kullanımını şarttır.

Paslanmaz çelikler 5 ana grupta sınıflandırılırlar;

- Östenitik paslanmaz çelikler,
- Ferritik paslanmaz çelikler,
- Martensitik paslanmaz çelikler,
- Dupleks (Duplex) paslanmaz çelikler,
- PH (Çökeltmeyle sertleşebilen) paslanmaz çelikler.

3.2.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelik, krom içeriği genellikle %16 ile %26 arasında değişir; nikel içeriği ise yaklaşık %35'e kadar olabilir ve manganez içeriği %15'e kadar olabilir. Isıl işleme sertleştirilemedikleri gibi soğuk işleme ile sertleştirilebilirler. Yüksek krom ve nikel içeriği, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanmasına imkan sağlar. Ayrıca, manyetik olmayan yapıya sahiptirler ve genellikle mükemmel kaynaklanabilirlik, şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik özelliklerine sahiptirler.

Östenitik paslanmaz çelikler, endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Gıda, içecek, kimya, tıbbi aletler, havacılık, otomotiv gibi birçok endüstride kullanılmaktadırlar. Bu çelikler, yüksek korozyon direnci gerektiren ortamlarda aşınma ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Östenitik paslanmaz çelikler kaliteleri arasında yaygın olarak kullanılan 303, 304, 304L, 316, 316Ti, 321, 347 gibi birkaçı sayılabilir [32].

3.2.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, yaklaşık %12 krom elementi içerir ve karbon oranı daha düşüktür. Ferritik çelikler östenitik çeliklere göre daha az yumuşaktır, ısıl işlem ile sertleştirilemezler ve manyetik özellikleri mevcuttur. Soğuk işleme ile sertleştirilebilir. Ferritik çeliklerde karbon kompozisyonu yaklaşık %0,03'tür. Bu nedenle düşük termal genişleme katsayısı sergileyebilirler. Yüksek sıcaklıklar ve iyi korozyon dirençlerine sahip olup uygulama alanları olarak kazanlar ve ısı değiştirici eşanjörlerde kullanılmaktadırlar [33]. Ferritik paslanmaz çelik dereceleri arasında 409, 430, 430L, 434, 444, 442 gibi sayabileceğimiz birçok kalite bulunmaktadır.

3.2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, %12-17 krom ve %0,10-1,20 karbon bileşimi içeren yüksek veya düşük karbonlu çeliklerdir. Manyetik özellikte olup östenitik çeliklere göre yüksek mekanik özellik gösterir ve daha düşük bir korozyona sahiptirler. Genellikle mekanik dayanımı yüksek olan bu çelikler endüstride pompalar, valfler ve miller gibi parçaların imalatında kullanılırlar. Karbon oranı %0,4' ü aştığı durumlarda plastik enjeksiyon kalıpları, cerrahi bıçaklar ve nozullar gibi ürünlerde kullanılmaktadır. Bu paslanmaz çelikler daha düşük karbon, %13 Cr ve %4 Ni içerdiğinde yüksek mekanik özellikler, yüksek kaynaklanabilirlik ve kavitasyona karşı iyi direnç oluşturmaktadır. Dünya çapında ise tüm hidroelektrik türbin tipleri için kullanılabilirler. Martenzitik paslanmaz çelik dereceleri arasında 410,416,431,420,430,440/M/B/C gibi sayabileceğimiz birçok kalite bulunmaktadır.

3.2.2.4. Dupleks (Duplex) Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler, hem ferritik hem de östenit mikro yapı karışımından meydana gelmektedir. Bu sınıf çelikler yüksek oranda krom içermektedir. % 20-30 krom, %4-7 nikel , %2-4 molibden ve %0,5'e kadar nitrojen azot oluşmaktadır. Bu çelikler endüstride endüstriyel tesislerde, gemi yapımında, petrol ve gaz endüstrilerinde gibi deniz suyu, asitik ve klorür içeren ortamlarda yaygın olarak

kullanılmaktadır [34]. Dupleks paslanmaz çelik dereceleri arasında 1.4462, 1.441 (Süper dupleks) gibi sayabileceğimiz birçok kalite bulunmaktadır.

3.2.2.5. PH (Çökelmeye Sertleşebilen) Paslanmaz Çelikler

PH paslanmaz çelikler, östenitik ve martensitik çökeltme sertleşmesi ile elde edilirler. %17 krom, %4 nikel, %4 bakır ve %0,3 niobium içerir. İçerdiği bakır sayesinde dövülebilme özelliğine yatkındır. Martensitik çeliklere benzer olarak ısıl işleme yüksek mukavemet kazanabildikleri gibi, östenitik kaliteler gibi de korozyona dayanıklıdır. PH paslanmaz çeliklerde 17-4 PH, 15-5 PH , PH 13-8 Mo gibi kaliteler bulunmaktadır. Endüstride 630 ve 17.4 PH en yaygın tercih edilen çeliklerdir.

3.2.3. 17-4 PH Paslanmaz Çeliğinin Özellikleri

Çökeltiyle sertleşebilen paslanmaz çelikler grubunda olan 17-4 PH çelikler, dünyada ve ülkemizde gün geçtikçe daha fazla tercih edilmeye başlamıştır. Endüstride 630(1.4542) olarak da bilinirler. PH adını ise, çökelti sertleşmesi anlamına gelen “precipitation hardening” deyiminin baş harflerinden almaktadır. 17-4 PH paslanmaz çelik, yaşlandırma veya bir başka deyişle çökeltiyle sertleştirilmiş paslanmazlar grubuna giren, mekanik dayanımı oldukça yüksek ve korozyon dayanımı iyi olan bir paslanmaz çelik kalitesidir. 17-4 PH adını, iç yapısında bulunan yaklaşık %17 krom ve %4 nikel elementi içerir [35]. Çizelge 3.2’ de 17-4 PH paslanmaz çeliğinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 3.2. 17-4 PH paslanmaz çeliğinin % kimyasal bileşimi.

17-4 PH	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	Al	Cu	Nb	Ni
630 (1.4542)	<0.07	0.7	1.0	0.04	<0.03	15- 17	<0.6	<0.4	<0.4	3- 5	0,15 - 0,35	3-5

17-4 PH paslanmaz çelikler uygulamaların çoğunluğu havacılık sektöründe uygulanmaktadır. Endüstride motor bileşenleri, uçak yapıları, cıvata, dişliler ve millerin imalatlarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda en önemli özelliği, mekanik değerlerinin yüksek çekme mukavemetine sahip olmasıdır. Çizelge 3.3’de 17-4 PH

paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri verilmiştir. 17-4 PH çeliklerinin bazı genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İşlenebilirlik, tavllanmış durumda 304 paslanmaz çeliğe benzer şekilde iyi işlenebilirliğe sahiptir. Isıl işlem ile sertleştirildikten sonra martensitik yapıya dönüştüğü için işlemesi zordur ama mümkündür.
- Yüksek mukavemet ve sertlik, yaşlandırma işlemi sayesinde yüksek mukavemetlere ve sertliklere ulaşabilirler. Bu durum ise ağır yükler altında bile malzemenin şekil değiştirmesine engel olur.
- Sıcaklık etkileri, iyi derecede oksidasyon direncine sahiptir. Uygulanan yaşlandırma işleminin sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Düşük sıcaklıklarda yaşlandırma, malzemenin mukavemetini artırırken, yüksek sıcaklıklarda esnekliği artırabilir.
- İyi korozyon direnci, krom, nikel ve bakır elementinin var olması çeliği korozyona karşı koruyarak direncini artırır. Bu özellikle birlikte ciddi sorunların yaşanabileceği deniz suyu gibi ortamlarda malzemenin kullanım kolaylığını sağlamaktadır.

Çizelge 3.3. 17-4 PH paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri [36].

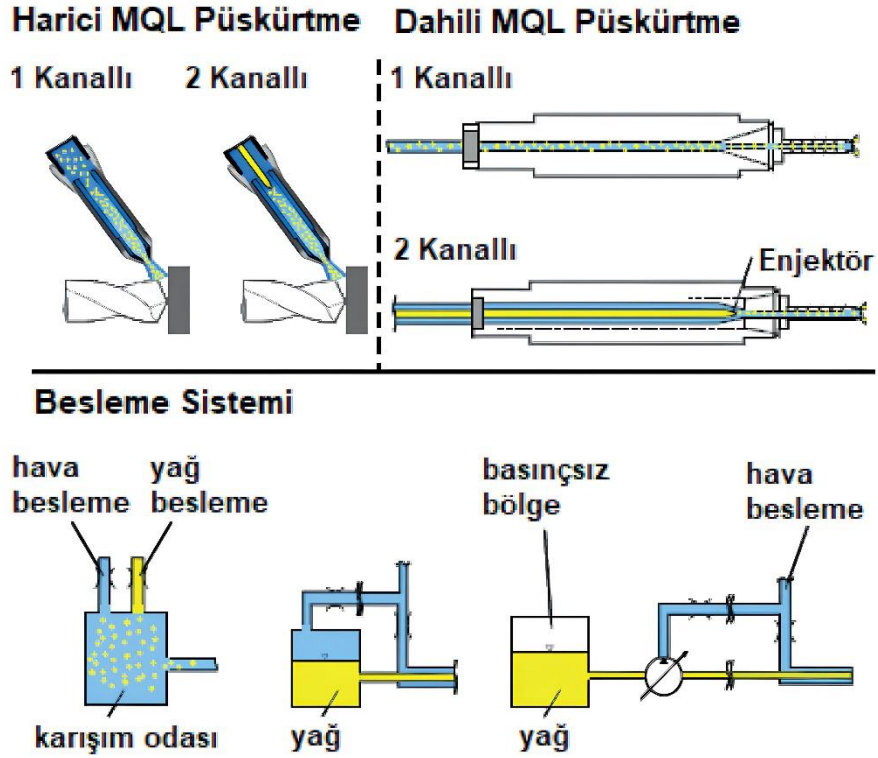
Kalite	630 (1.4542)
Kopma mukavemeti	~ 1090 MPa
Akma mukavemeti	~ 950 MPa
Sertlik, Rockwell (HB)	360 max

3.3. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA TEKNİĞİ (MQL)

İmalat endüstrisinde kesme sıvılarının deri ve solunum problemlerine yol açarak sağlık sorunlarına sebep olabilir. Birçok araştırma, kesme sıvılarıyla ilgili maliyetlerin kesici takım maliyetlerinden daha yüksek olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle işleme operasyonlarında kesme sıvısının kullanımını en aza indirmek veya tamamen önlemek için bazı alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Bu alternatiflerden biri olarak kuru ve minimum miktarda yağlama (MQL) ile işlemdir [37]. Metal işleme

endüstrisinde kullanılan yağlama teknikleri hem performans hem de çevresel etki açısından büyük farklılıklar gösterebilir. Bu yöntem, işleme sırasında kullanılan yağlama miktarını minimize eden bir tekniktir. İş parçası ve takımın yağlanması için sadece minimum miktarda yağ kullanılırken aynı zamanda iş parçası ve takımın ömrünü uzatmaya yardımcı olur. Metal işleme sırasında ısı oluşumu çeşitli bölgelerde oluşur, temel olarak takım-iş parçası ve takım-talaş yüzeylerinde ısı azaltımı önemli rol oynamaktadır. Bu durum, ıslığı azaltmak ve işlenebilirliği artırmak için, farklı endüstriler tarafından yeni metal işleme sıvıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle, kesme sıvıları, sürtünme kuvvetini azaltmak hem kesici takım hem de iş parçasını soğutmaya yardımcı olmaktadır [38].

MQL tekniğı, metal işlemede kesme bölgesine çok küçük miktarlarda yağlama-soğutma sıvılarını hava ile püskürtür. MQL, dahili ve harici olmak üzere iki farklı şekilde uygulanır (Şekil 3.6). Dahili MQL, takım tezgahının ve kesici takımın sistem ile entegre olması gerekir. Dahili sistem tarafından depolanan hava-yağ karışımı doğrudan iş milinin içinden ve kesici takımların bağlı olduğu taret vasıtası ile takım içinden uygulanmaktadır. Harici sistemde ise, MQL ünitesinde bulunan borular vasıtasıyla kesme bölgesine iletilen hava-yağ karışımı sayesinde sabit nozul ile dışardan uygulanmasıdır. Bu yöntemde, hava içerisinde bulunan yağ partikülleri, kesici takım ve iş parçası arasında ince bir yağ katmanı oluşturarak sürtünmeyi ve ısınmayı minimum seviyeye indirir. Özellikle talaşlı imalat işlemlerinde oluşan takım aşınmaları, yüksek kesme bölge sıcaklığı ve düşük işlenen yüzey kalitesi gibi olumsuzluklar minimum seviyeye düşürür [39].



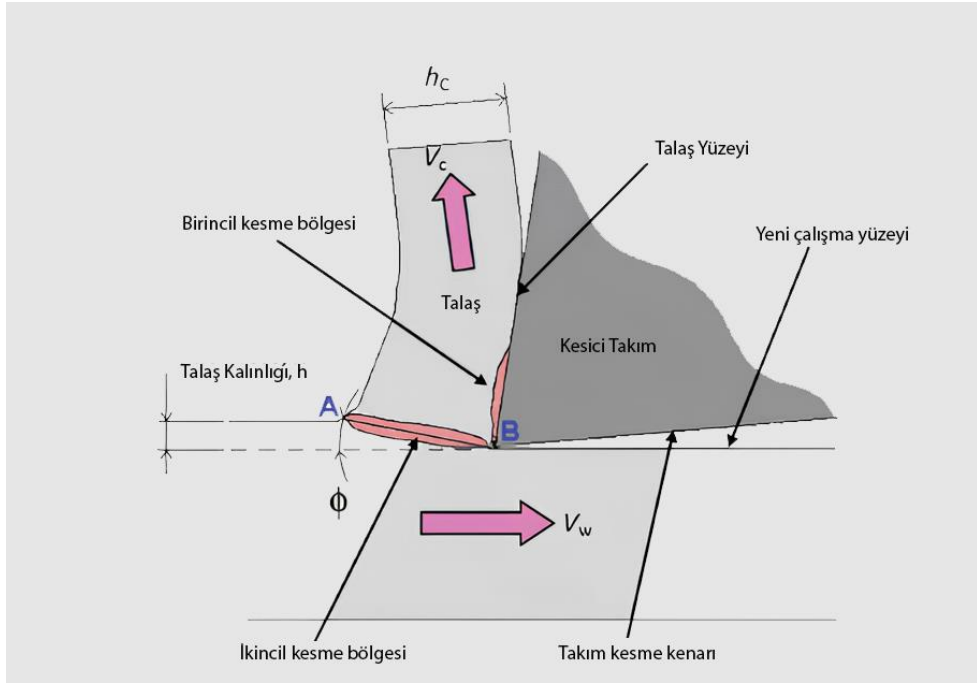
Şekil 3.6. MQL püskürtme sistemi [39].

3.4. TALAŞLI İMALAT

Talaşlı imalat, temel olarak bir kesici takım üzerine mekanik enerji uygulanarak talaş şeklinde parçalar kaldırarak hedeflenen son geometriyi elde etme işlemidir. Diğer tüm imalat işlemleri gibi, üretkenliği artırmak, maliyeti düşürmek ve üretim kalitesini artırmak gibi hedeflere odaklanır. İşlenebilirlik, yapılacak işlemin performansını değerlendirmek için sıklıkla kullanılır ve malzemenin ne kadar kolaylık la işlenebileceğini tanımlar. İşlenebilirliği ölçmenin kabul edilmiş herhangi bir yolu olmamasına rağmen kesme kuvvet, takım ömrü, yüzey kalitesi ve belirli kesme enerjisi gibi parametreler işleme performansını ölçmek için kullanılmaktadır.

İş parçasından daha sert olan kesici takım, V_w hızında hareket ederek plastik deformasyon yoluyla talaş kaldırır. Kesici takım, kesme kenarının önümde bulunan malzeme önce A-B hattı boyunca sıkıştırılarak plastik deformasyona uğrar. Bu bölge birincil kesme bölgesi olarak ifade edilmektedir. Talaş, şekillendirilmiş malzemenin yay açısı yönünde koparak uzaklaşır. Böylece iş parçası üzerinden kaldırılan katman, takım katman yüzeyi üzerinden geçerken kayma deformasyonu ile ikincil

deformasyon işleminde daha fazla plastik deformasyona uğrayabilir. Ayrıca, takım iş parçası üzerinde yanal yüzeyde kaymasından dolayı, takım ucu ile iş parçası arasında üçüncül deformasyon bölgesi oluşur. Takımın hızı, V_w hızı iş parçasının altında V_c hızı ile hareket eder. Üçüncül deformasyon bölgesi iş parçasının yüzey kalitesini etkilediği bölge olarak tanımlanır [40]. Şekil 3.7’ de dik işleme modeli ve talaş oluşumuna dair görsel verilmiştir.



Şekil 3.7. Dik işleme modeli

3.5. ÇELİKLERE UYGULANAN TEMPERLEME (MENEVİŞLEME) İŞLEMLERİ

Temperleme, çelik ve dökme demirlere uygulanan önemli ısı işlem tekniğidir. Bu işlem, dayanıklılığın önemli olduğu endüstrilerde büyük bir rol oynamaktadır. Örneğin savunma sanayisi, askeri teçhizat havacılık, otomotiv, enerji endüstrisinde büyük bir rol oynamaktadır. Otomotivde şasi parçaları, motor, bileşenleri ve süspansiyon sistemleri gibi kritik bileşenlerde sıklıkla kullanılmaktadır.

Temperleme işlemi esnasında martenzitik fazının mikroyapısını değişime uğratarak çeliğin sünekliğinin artmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda çeliğin sertliğini artırarak

daha fazla tokluk elde etmeyi amaçlar. Sertleştirme işlemi, malzemeyi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtarak hızlı bir şekilde soğutma işlemiyle devam eder. Malzeme istenilen sıcaklığa çıkartıldığında ve bu sıcaklıkta belirli bir süre tutulur. Sertleştirilmiş elik bu aşamada kırılğan hale gelebilir ancak sertleştirilmediğinde ise mukavemet ve aşınma direncine sahip olmayabilir. Temperleme eliği işlenebilir hale getirir, şekillendirilebilme kabiliyeti sağlar ve iç gerilmeler nedeniyle çatlamaya ve kırılmaya karşı dayanıklı hale gelmesine yardımcı olur. Uygulanan bu süreç ise, elik malzemenin istenilen mekanik özelliklerini iyileştirir ve istenilen performansa ulaşmasını sağlar [41].

Temperleme süreci üç temel aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Isıtma: elik malzeme belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak martenzitik fazın oluşmasını sağlar. Burada önemli olan huşulardan birisi olarak ısıtma hızı kontrol edilmelidir. Aksi takdirde çatlama riskinin artmasına sebep olabilir. Örneğin, yay çelikleri 300-400 C, yapı çelikleri 450-650 C’de temperlenir.
- Tutma: Malzeme kalınlığı dikkate alınarak uygun bir süre bekletilerek tüm yapının homojen olması sağlanmaktadır.
- Soğutma: Bu işlem kontrollü bir şekilde yapılarak elik malzemenin istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır.

BÖLÜM 4

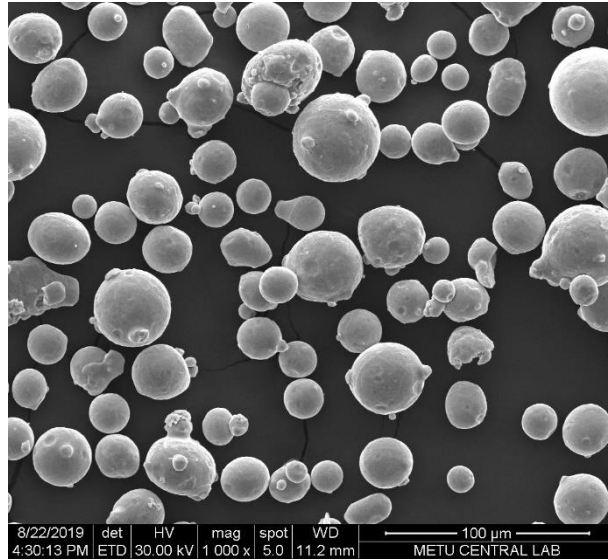
MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. DENEY MALZEMESİ

Bu çalışmada, 17-4 PH alaşımı deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Martensitik bir paslanmaz çelik olarak bilinen 17-4 PH alaşımı tozu, SLM Solutions Group AG.'den temin edilmiştir. 17-4 PH alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 4.1'de ve PH 17-4 alaşımı tozun görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PH 17-4 alaşım tozunun % kimyasal bileşimi.

Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Nb+Ta	C	N	O	P	Fe
15-17	3-5	3-5	1	0,07	0,15-0,45	0,07	0,1	0,04	0,04	Denge



Şekil 4.1. PH 17-4 alaşımı tozunun görüntüsü.

Deneysel numunelerin üretimi Nikon SLM 280 cihazında 100x100x25 mm ölçülerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de Eklemeli imalat cihazı görülmektedir. Üretilen numunelere temperleme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.2. Nikon SLM 500 eklemeli imalat cihazının görüntüsü.

Temperleme işlemi 580 °C'de 1, 2 ve 3 saat olmak üzere üç set şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.2'de seçici lazer ergitme (SLM) üretim parametreleri verilmiştir. Ayrıca ticari olarak üretilen 17-4 PH çeliği master malzeme olarak tedarik edilmiştir ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilen ve temperleme işlemi uygulanan numunelerin işlenebilirlik performansları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2. seçici lazer ergitme (SLM) üretim parametreleri.

Parametre	Değer
Lazer Gücü (W)	250
Katman Kalınlığı (μm)	50
Tarama Boşluğu (mm)	0.1
Tarama Hızı (mm/s)	850
Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)	58,82
Lazer tarama stratejisi	Stripe/70 derece

4.2. TAKIM TEZGÂHI

Frezeleme deneyleri, Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda yer alan Hanssa YH 1600-A CNC Dik işleme tezgahında gerçekleştirilmiştir. Takım tezgâhı, 18,5 kW iş mili motor gücüne sahiptir. Şekil 4.3'te frezeleme deney düzeneği görülmektedir.

4.3. DENEYLERDE KULLANILAN KESME PARAMETRELERİ

İşleme deneylerinde, Walter kesici takım firması tarafından WKP35S kalitesinde ve SDMT06T204-F57 formunda üretilen kesici takımlar kullanılmıştır. Bu kesici takımlar, Walter marka M4132-Ø25 takım tutucuya rijit bir şekilde bağlanmıştır. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde üretici takım firmasının önerileri ve literatürde 17-4 PH çeliğinin işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir.



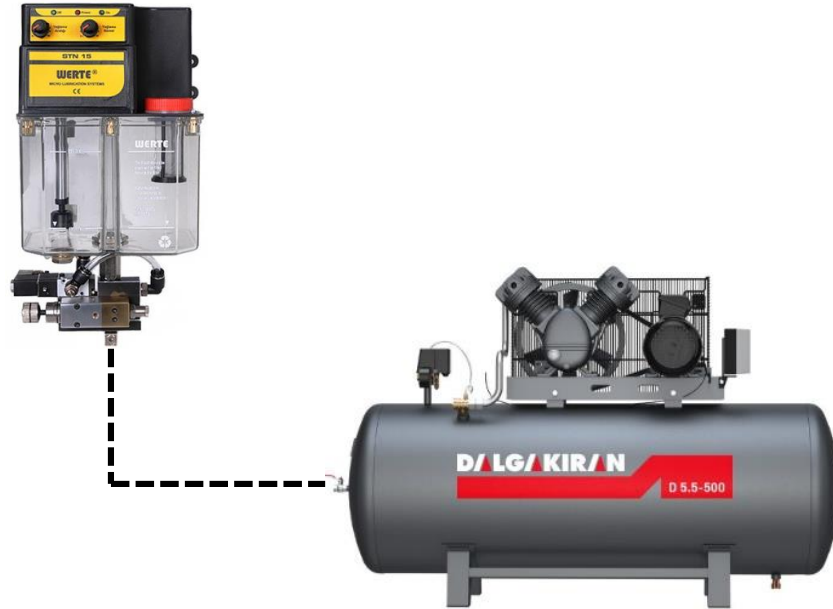
Şekil 4.3. CNC dik işleme tezgâhı ve test düzeneği.

Çizelge 4.3. Deneyleerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Kesme Parametreleri	I	II	III	IV
Ort	İşleme Şartı	Kuru	MQL		
t	Talaş derinliği (mm)	0,6			
f	İlerleme miktrı (mm/dev)	0,06	0,12	0,18	
Vc	Kesme hızı (m/dak)	50	100	150	200

4.4. MQL SİSTEMİ

MQL soğutma yönteminde soğutucu akışkan bir nozul aracılığıyla basınç altında sis buharı şeklinde işleme alanına iletilmektedir. Deneyleerde soğutucu akışkan olarak Çizelge 4.4'te özellikleri verilen bio-stabil yarı sentetik metal işleme sıvısı kullanılmıştır. Kesme sıvısının işleme alanına iletilmesinde Werte Mikro STN 15 model MQL (Minimum Miktarıda Yağlama) sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.4'te MQL soğutma sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Frezeleme deneyleeri, MQL sistemi 6 bar püskürtme basıncında ve 0,028 ml/sn debide olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kesme sıvısının işleme alanına iletilmesinde 2 mm çapa sahip çift nozul kesici takıma 30° açı yapacak şekilde konumlandırılarak kullanılmıştır.



Şekil 4.4. MQL soğutma sisteminin şematik görüntüsü.

Çizelge 4.4. Deneylerde kullanılan kesme sıvısının özellikleri.

Özellik	Birim	Test Metodu	Açıklama
pH		-	9,5
Yoğunluk	15 °C, kg/m ³	ASTM D 4052	1,070
Görünüş	-	-	Berrak-kızıl kahve
Koku	-	-	Tipik
Akma noktası	°C, max	ASTM D 97	-22
Kırılma İndisi	n _{20/D}	ASTM D 1218	1,4222
Emülsiyon	5% deminarilize su	-	Geçer
Emülsiyon Kararlılığı	24 saat	-	

4.5. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Mikro sertlik ölçümleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan TTS Matsuzawa HWMMT-X3 marka mikro sertlik ölçme cihazında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik değerleri, her bir numune üzerinden beşer ölçüm yapılarak ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

4.6. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Temperleme ısıl işleminin numunelerin mikroyapısında meydana getirdiği değişimleri belirlemek optik metal mikroskobu ve SEM mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikroyapı görüntüleri Aksaray Üniversitesi, Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Metalografik inceleme işlemi, bakalite alınan numunelerin zımparalanma, parlatılma ve elmas süspansiyon işlemleri sonrası dağlanarak gerçekleştirilmiştir.

4.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

Her bir frezeleme deneyi sonrası oluşan işlenmiş yüzeyler üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Mahr Perthometer M1 cihazı kullanılmıştır. Ölçümler öncesi master aracılığıyla yüzey pürüzlülüğü cihazının kalibrasyonu sağlanmıştır. Pürüzlülük

ölçümlerinde örnekleme uzunluğu (λ) 0,8 mm ve ölçme uzunluğu (L) 5,6 mm seçilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri, frezelenmiş yüzeyler üzerinde işleme yönünde beş farklı noktadan ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

4.8. KESME SICAKLIĞI ÖLÇÜMÜ

Frezeleme deneylerinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın ölçülmesinde K tipi ısıl-çift (Termokupl) kullanılmıştır. Isıl-çiftler işleme alanına 1 mm mesafeye aralarında 20 mm mesafe olacak şekilde 3 mm çapında açılan deliklere yerleştirilmiştir. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklık verisi Pico marka veri kaydedici ve PicoLog 8 kanallı veri kayıt yazılımı ile elde edilmiştir. Şekil 4.5. Data logger ve K tipi ısıl-çiftin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5. Data logger ve K tipi ısıl-çiftin görüntüsü.

4.9. TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ

Titreşim ölçümleri, K333D01-VM dijital titreşim ölçer seti ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6. K333D01-VM dijital titreşim ölçerin görülmektedir. Titreşim sensörünün montajı için deney numunelerine 3mm çapında delik delinmiş, klavuz çekilmiş ve

sensör üzerinde yer alan vida ile sensör sabitlenmiştir. Her bir frezeleme deneyinde oluşan titreşim verisi VibeCheck programı aracılığıyla elde edilmiştir.



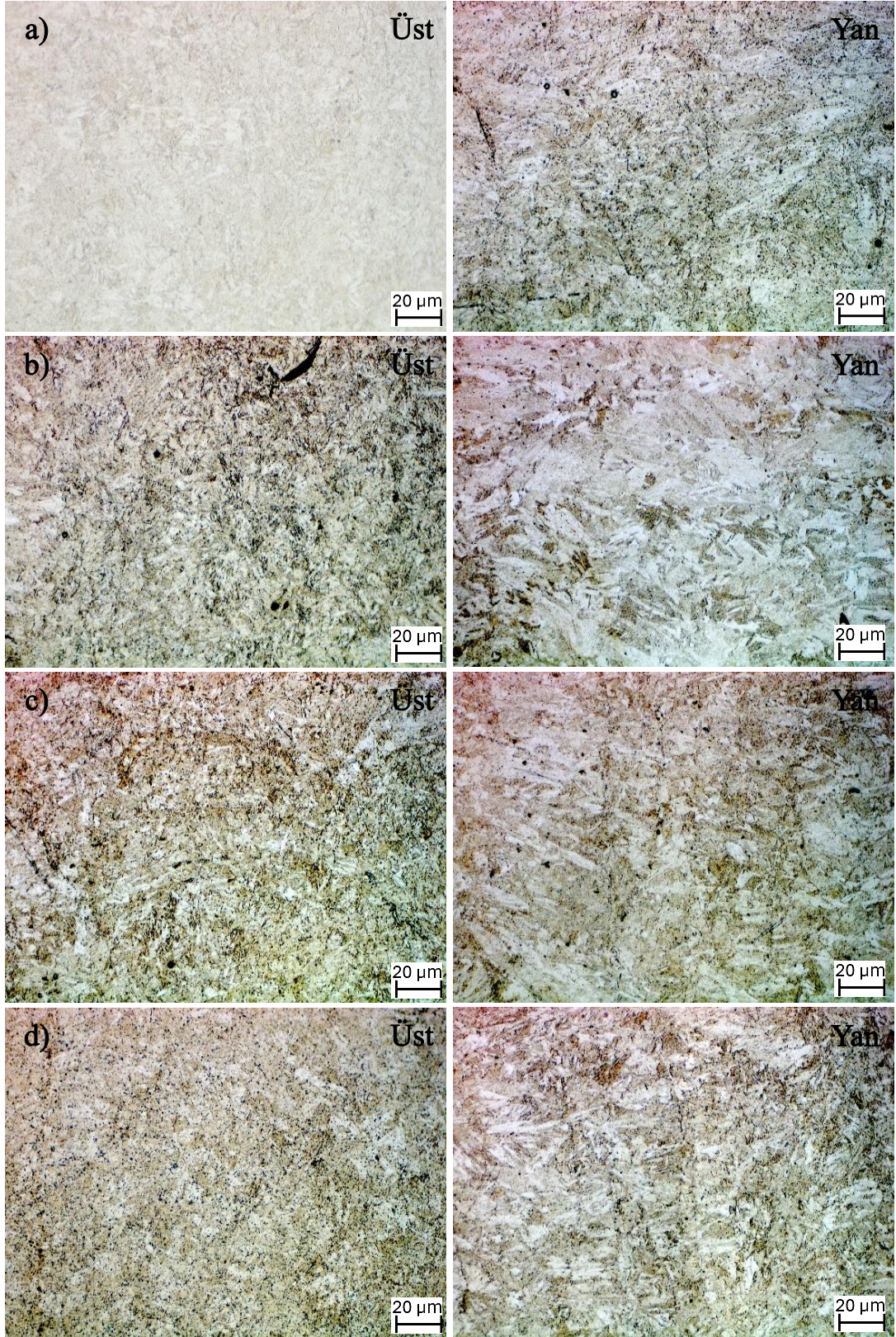
Şekil 4.6. K333D01-VM dijital titreşim ölçer.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

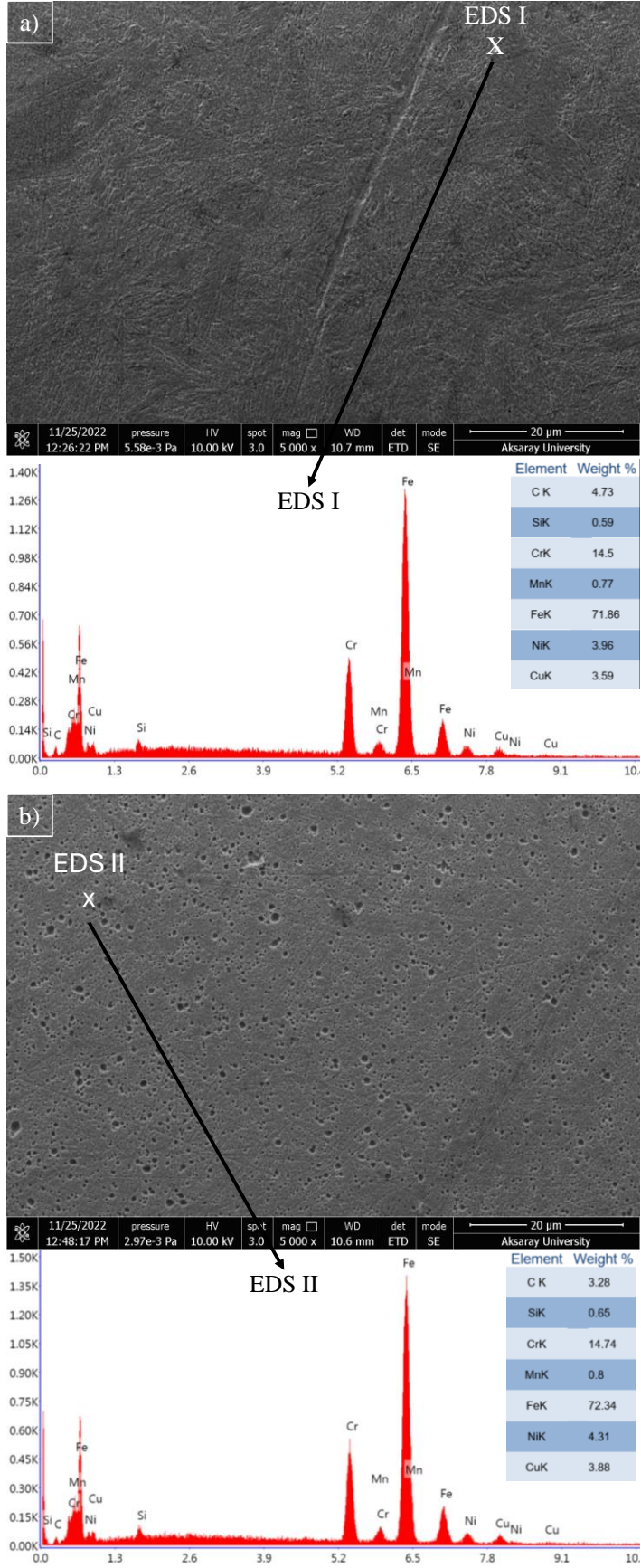
5.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

PH çelikleri, östenitik ve ferritik çeliklerin katı çözeltili ve pekleşme yoluyla mukavemet artışıdaki sınırlamaların ve yüksek karbonlu martensitik türlerin sınırlı süneklik ve tokluğunun oluşturduğu boşluğu doldurmak için iyi korozyon direnciyle yüksek mukavemet ve tokluk sağlayacak şekilde geliştirilmişlerdir. PH paslanmaz çelikleri, yaşlandırma ısıl işlemi sırasında çökeltiler oluşturan alüminyum, titanyum, niyobyum, vanadyum ve/veya nitrojen ilavesiyle yüksek mukavemet ve tokluk geliştirilmektedir [42]. Martensitik ve yarı östenitik olmak iki ana tip PH paslanmaz çelik kalitesi vardır. Yarı östenitik kaliteler esas olarak çözeltiyle tavllanmış durumda östenitiktir. İmalat işlemleri tamamlandıktan sonra, östeniti martensite dönüştüren östenit şartlandırma ısıl işlemi ve ardından çökeltme sertleştirilmesi ile martenzite dönüştürülebilirler. Martensitik tipler çözeltilde tavllanmış durumda martensitiktir yapıdadır ve üretimden sonra çökeltme sertleştirilmesi ile servis şartları elde edilir [43]. 17-4 PH paslanmaz çeliği, ağırlıkça yaklaşık %3 Cu içeren martensitik bir paslanmaz çeliktir ve iyi mekanik özellikleri ve yeterli korozyon direncinin dengeli birleşiminden dolayı kimya ve enerji santralleri için yapısal malzemeler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [44]. Martensit matrisinde bakırın çökeltilmesiyle mukavemeti artırılır. Çözelti ısıl işleminden sonra bu alaşım genellikle yaklaşık 580°C'de temperleme yoluyla çökeltmeyle sertleştirilir [45]. Eklemeli olarak üretilen parçalar, artık gerilmeleri azaltmak ve yapıyı homojenleştirmek için kullanımdan önce genellikle temperleme işlemine tabi tutulmaktadır. Temperleme işlemi, bir çeliğin ötektoid sıcaklığın altındaki bir sıcaklığa ısıtılması belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulması ve ardından havayla soğutulması aşamalarından oluşmaktadır [46].



Şekil 5.1. Temperleme işlemi sonrası 17-4 PH çelikten alınmış optik mikroskop görüntüleri: a) işlemsiz, b) 580 °C'de 1 saat, c) 580 °C'de 2 saat, d) 580 °C'de 3 saat.

Bu çalışmada, seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliğe çözültü ısı işleme uygulanmadan 580°C'de 1, 2 ve 3 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Şekil 5.1'de işlemsiz ve temperleme işlemi sonrası elde edilen mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.1 ve 5.2 (a)'da verilen mikroyapı optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde, SLM sonrası mikroyapıda ince taneli bir yapı görülürken birincil karbürler tespit edilmemiştir. Bu durum, birincil karbürlerin tamamen çözünmesine yol açan malzemenin tekrar tekrar eritilmesinin ve bunların çökmesini önleyen hızlı katılma ile ilişkilendirilmektedir [47]. Bununla birlikte, hızla katılan mikroyapı genellikle önemli kalıntı gerilimi içerir ve çeşitli işlem sonrası ısı işlemler genellikle kalıntı gerilimi gidermek için kullanılmaktadır. Temperleme işlemi sonrası numunelerin yapısında Fe'ce zengin (δ -ferrit) bölgeler ve tutarlı bakır çökeltilerinin oluşumu görülmektedir. Mikroyapı görüntüleri, Şekil 5.2'de verilen X-ışını spektroskopisi (EDS) analiz sonuçları ile incelendiğinde, temperleme işlemi sonrası bakır ve karbür çökeltilerinin daha homojen bir dağılım içinde olduğu görülmektedir. Taneler arasında kalan östenit temperleme sırasında martenzite dönüşmektedir.[48]. Temperleme işlemi sonrası küresel ve farklı boyutlarda mikro boşlukların olduğu da gözlenmiştir. Junker ve arkadaşları, X37CRMOV5-1 takım çeliğinin eklemeli imalatı için ısı işlem stratejilerinin araştırdıkları çalışmalarında, Austenitizasyon ve söndürme ile sertleşme, Austenitizasyon, söndürme ve üç kez temperleme ile geleneksel ısı işlem ve Austenitizasyon uygulanmadan üç kez temperleme işlemini karşılaştırmışlardır [49]. Austenitizasyon uygulanmadan temperleme işlemi ile ince taneli bir yapının oluşturulabileceğini ve geleneksel olarak üretilen malzemenin mekanik özelliklerine göre üç kez temperleme ısı işlemi stratejisi kullanıldığında malzemenin mekanik özelliklerinin daha iyi performans gösterdiğini ve takım çeliğinin ömrünü iyileştirme potansiyelinin yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Chao ve arkadaşları, SLM yöntemi ile üretilen 316L SS çeliğini çeşitli bekleme sürelerinde 400 ila 1400°C arasında ısı işlemlere tabi tutmuşlardır [50]. Sonuç olarak, 400 °C'de 2 saat bekletme süresi boyunca ısı işleminden sonra, mikroyapıda kayda değer bir değişikliğin olmadığını, artık gerilimde hafif bir değişiklik (248'den 191 MPa'ya) olduğu ve yüksek sıcaklıkta 1100 °C'de 5 dakika bekletme süresi boyunca ısı işleminden sonra, mikroyapıda dislokasyon yumaklarının kısmi yok olmasıyla östenit tane sınırlarında gevrekleşen σ fazının çökmesiyle artık gerilimin büyük ölçüde (248'den 18.9 MPa'ya) azaldığını bildirmişlerdir.



Şekil 5.2. 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana takım için EDS sonuçları.

5.2. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sertlik, aşınma direnci açısından önemli bir unsurdur. SLM yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliğinin sertliği üzerinde farklı temperleme sürelerinin etkilerini belirlemek için sertlik ölçümleri yapılmıştır. İşlemsiz ve farklı bekleme sürelerinde temperleme işlemi uygulanan takımların Vickers (Hv10) sertlik yöntemiyle ölçülen sertlik değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.1 incelendiğinde, geleneksel olarak üretilen malzemeye göre SLM yöntemi ile üretilen malzemenin sertliği daha düşüktür. SLM yöntemi ile üretilen numunelere farklı bekleme sürelerinde uygulanan temperleme işleminin sertliği hafif bir şekilde arttırdığı görülmektedir.

Çizelge 5.1. 17-4 PH çeliği numunelerin sertlik değerleri.

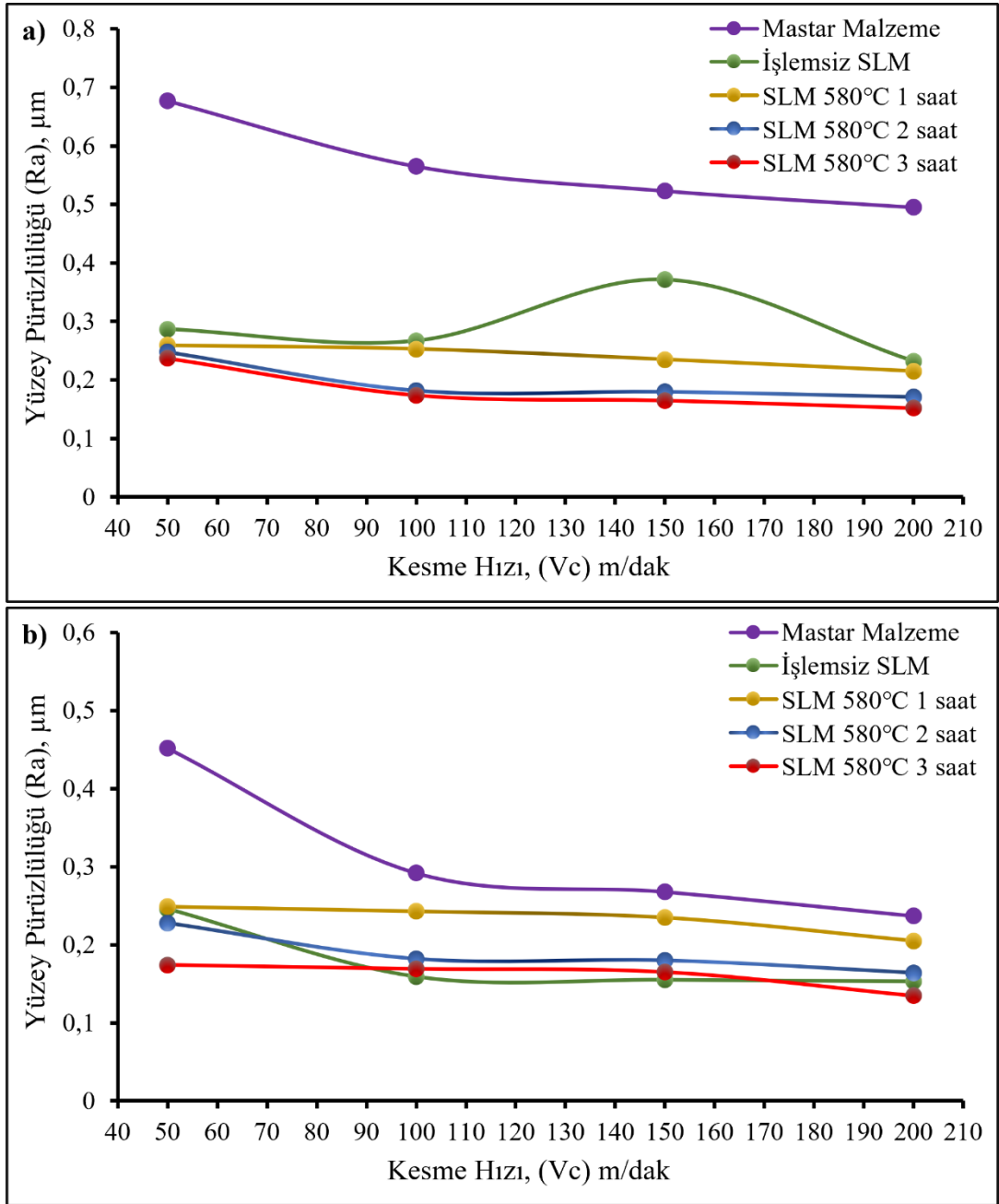
Numuneler	Sertlik (Hv10) ± standart sapma
Mastar Malzeme	426,50 ± 3
İşlemsiz SLM	305,02 ± 3
580 °C'de 1 saat	312,74 ± 2
580 °C'de 2 saat	327,80 ± 3
580 °C'de 3 saat	329,12 ± 2

580 °C'de 3 saat bekletme süresi boyunca temperleme işlemi sonrası, işlemsiz SLM numuneye göre sertliğin yaklaşık olarak %7,9 arttığı görülmektedir. Bu duruma temperleme işlemi sırasında ikincil sertleşmenin neden olduğu düşünülmektedir. SEM ve EDS analizlerinde görüldüğü gibi krom karbürlerin varlığı temperleme işlemi sırasında ikincil sertleşmeye neden olduğu için sertliğin arttığı düşünülmektedir. Bae ve arkadaşları, Lazer toz yataklı füzyon (LPBF) prosesi ile üretilen H13 takım çeliğinin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde temperleme süresi ve zamanının etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, ısı işlem uygulanmayan numunenin en yüksek sertlik ve çekme dayanımı değerlerine sahip olduğunu 1000 °C'de 1 saat çözeltiye alma sonrası 550 °C'de 2 saat temperleme işlemi uygulanan numunenin en yakın performansı gösterdiğini ve matris içerisinde dağılan M7C karbürünün mikroyapı değişiklikleri ve ikincil sertleşme üzerinde etkili olduğunu bildirmişlerdir [51].

5.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Önemli bir işlenebilirlik göstergesi olan yüzey pürüzlülüğü, bir yüzeyin şeklinin ideal formundan nasıl saptığını tanımlamanın bir bileşenidir; yüksek değerler daha pürüzlü yüzeylere karşılık gelirken, daha düşük değerler yüzeyin pürüzsüz olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, SLM yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliğinin frezelenmesi sonucu elde edilen işlenmiş alan üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde temperleme ısıl işleminin, kesme parametrelerinin ve soğutma ortamının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda SLM yöntemi ile üretilen numunelerin frezeleme deneyleri, kuru ve MQL işleme şartlarında, dört farklı kesme hızında (50, 100, 150 ve 200 m/dak), üç farklı ilerleme miktarında (0,06, 0,12 ve 0,18 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (0,6 mm) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3 yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızı, işleme ortamı ve temperleme işleminin etkisini göstermektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde, kesme hızındaki değişim dikkate alındığında, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri kuru işleme şartında 50 m/dak kesme hızında master malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numuneler için sırasıyla 0,677 0,287 0,259 0,248 ve 0,237 µm olarak ölçülmüştür. Aynı kesme hızında MQL destekli işleme kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri sırasıyla 0,452 0,246 0,249 0,228 ve 0,174 µm olarak ölçülmüştür. Master malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numunelerin kuru işleme şartında kesme hızının %100 arttırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %19,32 %7,43 %2,37 %36,26 ve %36,20 azaldığı, kesme hızının %300 arttırılmasıyla yapılan deneylerde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %36,76 %23,71 %20,46 %45,02 ve %55,32 azaldığı görülmüştür. Benzer MQL destekli işleme şartında kesme hızının %100 arttırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %54,79 %55,41 %2,45 %25,27 ve %2,95 azaldığı, kesme hızının %300 arttırılmasıyla yapılan deneylerde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %90,71 %60,78 %21,46 %39,32 ve %28,35 azaldığı görülmüştür. Bütün numuneler için her iki işleme ortamında kesme hızındaki artışla yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum kesme hızındaki artışa bağlı olarak kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın

artmasıyla takım-talaş temas yüzeyindeki akma bölgesinde yapışan malzemenin kayma dayanımının azalması ve buna bağlı olarak takım-talaş temas uzunluğunun azalması ile açıklanabilir [52-54]. Kara ve arkadaşları, 17-4 PH çeliğinin frezelenmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında, benzer şekilde, kesme hızının 70 m/dak'dan 140 m/dak'ya arttırılmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin yaklaşık olarak %24 azaldığını bildirmişlerdir [55].

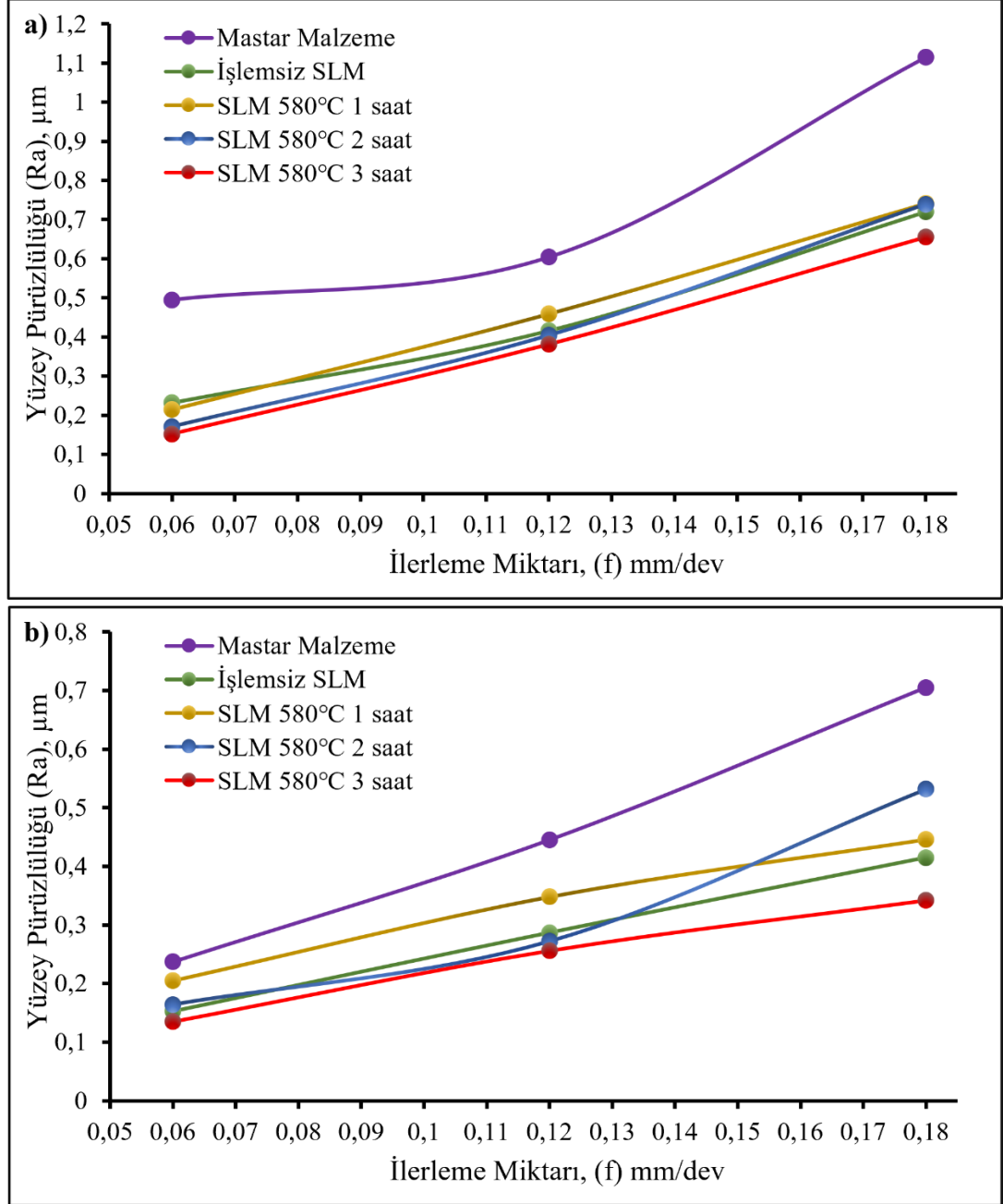


Şekil 5.3. Kesme hızına göre yüzey pürüzlülüğü değerinin dağılımı: a) kuru b) MQL destekli işleme.

Şekil 5.4 ilerleme miktarı ve kesme şartlarının göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 5.4 incelendiğinde, bütün numuneler için her iki işleme ortamında ilerleme miktarındaki artışla yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı gözlenmiştir. en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri kuru işleme şartında 0,06 mm/dev ilerleme miktarında mastar malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numuneler için sırasıyla 0,495 0,232 0,215 0,171 ve 0,152 µm olarak ölçülmüştür. Aynı ilerleme miktarında MQL destekli işleme kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri sırasıyla 0,237 0,153 0,205 0,164 ve 0,135 µm olarak ölçülmüştür. Mastar malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numunelerin kuru işleme şartında ilerleme miktarının 0,06 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e arttırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %22, %79, %113, %136 ve %150 arttığı, ilerleme miktarının 0,06 mm/dev'den 0,18 mm/dev'e arttırılması yapılan deneylerde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %125, %210, %244, %332 ve %330 arttığı görülmüştür. Benzer MQL destekli işleme şartında ilerleme miktarının 0,06 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e arttırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %87, %79, %70, %66 ve %89 arttığı, ilerleme miktarının 0,06 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e arttırılması yapılan deneylerde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %197, %171, %117, %224 ve %154 arttığı görülmüştür. İlerleme hızındaki artışa bağlı olarak birim zamanda kaldırılan talaş hacminin daha fazla olması sonucu yüzey pürüzlülük değerleri artmaktadır [56-59]. Özbek ve arkadaşları da benzer sonuçlara ulaşmış ve ilerleme hızının orta seviyelerde seçilebileceği sonucuna varmışlardır [60].

MQL işleme şartının yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde etkili bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Bütün deney numuneleri için MQL destekli işleme şartında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kuru işleme şartında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinden daha düşüktür. Her bir deney numunesi için gerçekleştirilen bütün ölçümlerin ortalamaları dikkate alındığında, kuru işleme şartına göre MQL destekli işleme şartında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yaklaşık olarak %86,45 daha az olduğu tespit edilmiştir. Kesme bölgesine soğutucu akışkanın iletilmesi ile yağlama fonksiyonunun artmasının bir sonucu olarak kesici takım-talaş ara yüzeyinde

sürtünmenin azalması yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde olumlu bir etkiye neden olmuştur [61].



Şekil 5.4. İlerleme miktarına göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı: a) kuru b) MQL destekli işleme.

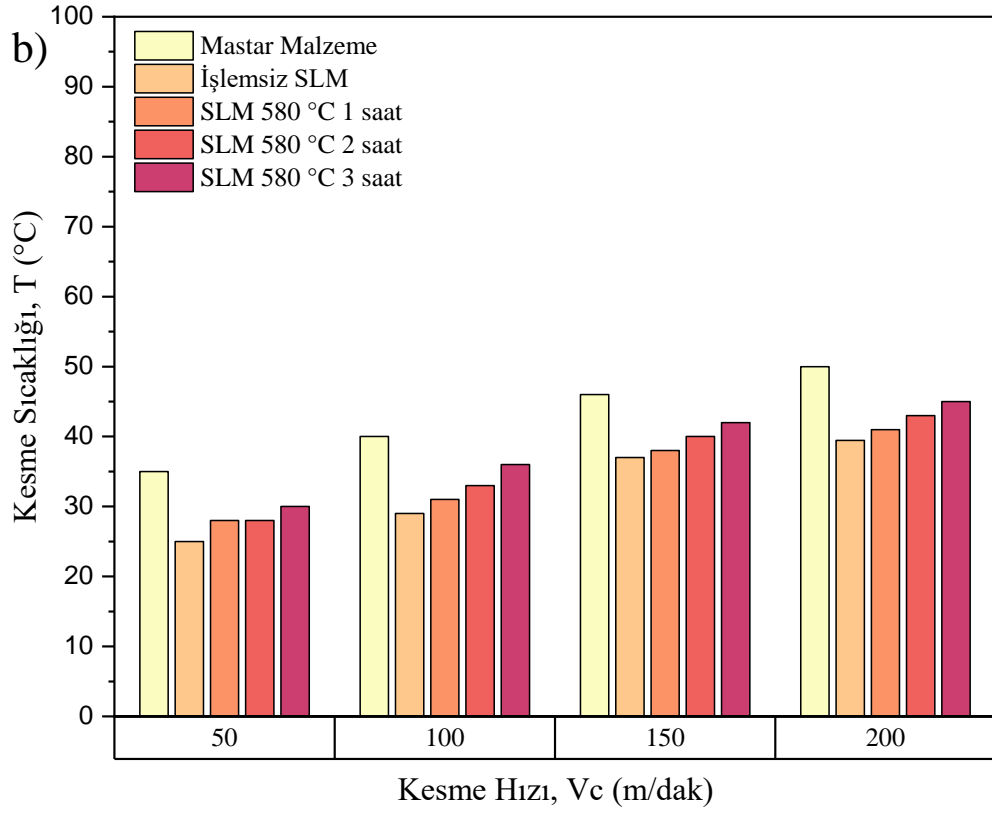
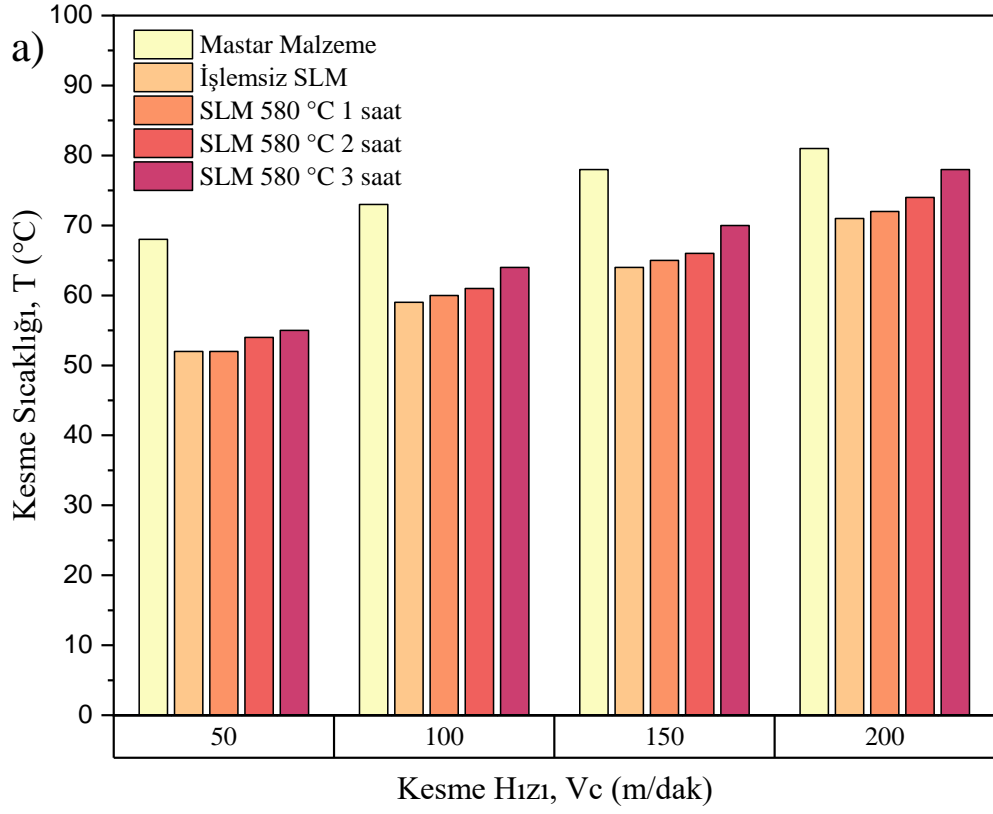
Benzer bir çalışmada, Sivaiah ve Chakradhar, farklı soğutma koşulları altında 17-4 PH paslanmaz çeliğin tornalanmasında kriyojenik soğutucunun kesme sıcaklığı, takım aşınması, yüzey bütünlüğü ve talaş morfolojisi üzerindeki etkisini inceledikleri

çalışmalarında, kuru işlemeyle kıyasla kriyojenik işlemede yüzey pürüzlülüğünün %27 oranında azaldığını bildirmişlerdir [62]. Öndin ve arkadaşları, bu durumu MQL tekniğinde kullanılan uçucu yağlayıcıların takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak daha iyi bir film tabaka oluşturması (penetrasyonu) ile açıklamışlardır [63].

Yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde deney numunelerine uygulanan temperleme ısı işleminin etkinliği kıyaslandığında, master malzemede (ticari olarak tedarik edilen) gerçekleştirilen deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) ile üretilen 17-4 PH çeliği numunelerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yaklaşık olarak %45 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. İşlemsiz SLM numunenin işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ile temperleme işlemi uygulanan SLM numunelerin işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin birbirine yakın olduğu ve ayrıca işleme şartları altında paralel eğilim gösterdiği görülmüştür.

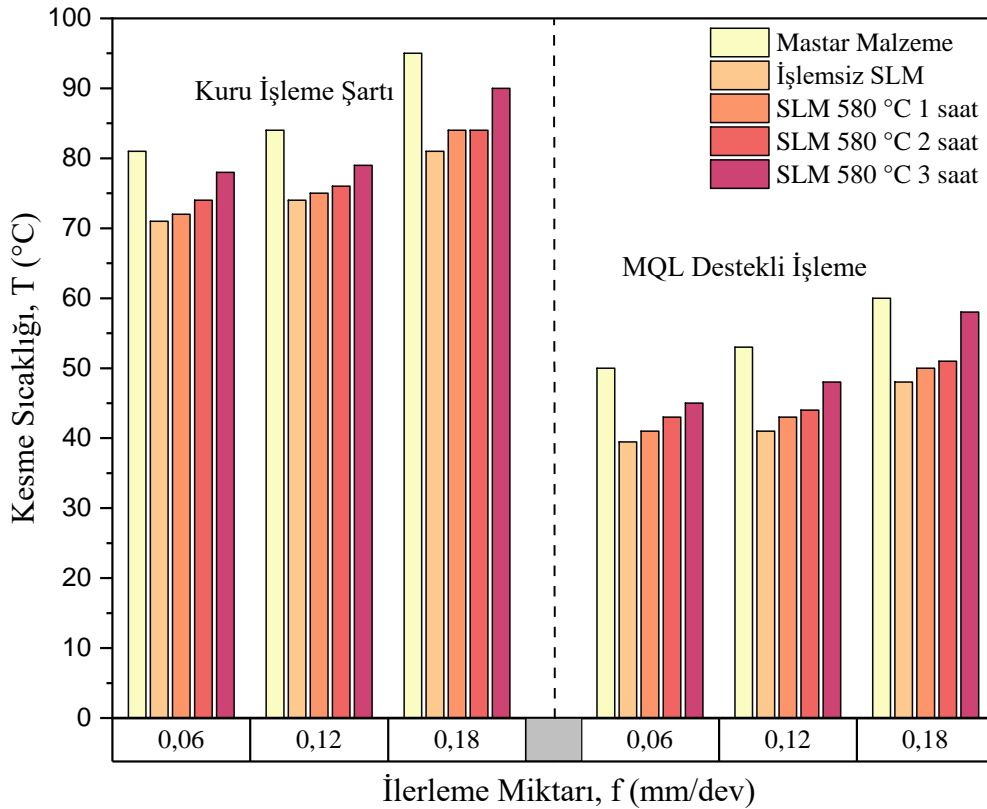
5.4. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 5.5 ve 5.6 kesme sıcaklığı üzerinde kesme hızı, ilerleme miktarı, soğutma yöntemi ve temperleme işleminin etkisini göstermektedir. Bütün deney numuneleri için kuru ve MQL destekli işleme şartlarında kesme sıcaklığı değerleri artan kesme hızıyla birlikte artış eğilimi göstermiştir. En düşük kesme sıcaklığı değeri kuru işleme şartında 50 m/dak kesme hızında master malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numuneler için sırasıyla 68, 52, 52, 54 ve 55 °C olarak ölçülmüştür. Aynı kesme hızında MQL destekli işleme kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri sırasıyla 35, 25, 28, 28 ve 30 °C olarak ölçülmüştür. Master malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numunelerin kuru işleme şartında kesme hızının %100 arttırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %19,32 %7,43 %2,37 %36,26 ve %36,20 arttığı, kesme hızının %300 arttırılmasıyla yapılan deneylerde ise kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %36,76 %23,71 %20,46 %45,02 ve %55,32 arttığı görülmüştür.



Şekil 5.5. Kesme hızına göre kesme sıcaklığı değerinin dağılımı: a) kuru b) MQL destekli işleme.

Benzer şekilde MQL destekli işleme şartında kesme hızının %100 artırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %54,79 %55,41 %2,45 %25,27 ve %2,95 arttığı, kesme hızının %300 artırılmasıyla yapılan deneylerde ise kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %90,71 %60,78 %21,46 %39,32 ve %28,35 arttığı görülmüştür. Benzer bir çalışmada, Sivaiah ve Chakradhar, kuru işleme ortamında 17-4 PH çeliğin tornalanmasında kesme hızının 25 ila 132 m/dak arasında artırılmasıyla kesme sıcaklığının %63-72 oranında arttığını bildirmiştir [64]. Benzer şekilde, Şekil 5.6'ya bakıldığında, kesme sıcaklığındaki artış, ilerleme hızındaki artıştan önemli ölçüde etkilenmiştir. Bu durumu kesme hızı ve ilerleme hızındaki artışla takım aşınması oluşumunun hızlanmasına neden olan gerinim oranı ve deformasyondaki artışla ilişkilendirilmiştir [65]. Şekil 5.7 verilen kesici takımların SEM aşınma görüntüleri bu durumu doğrulamaktadır.

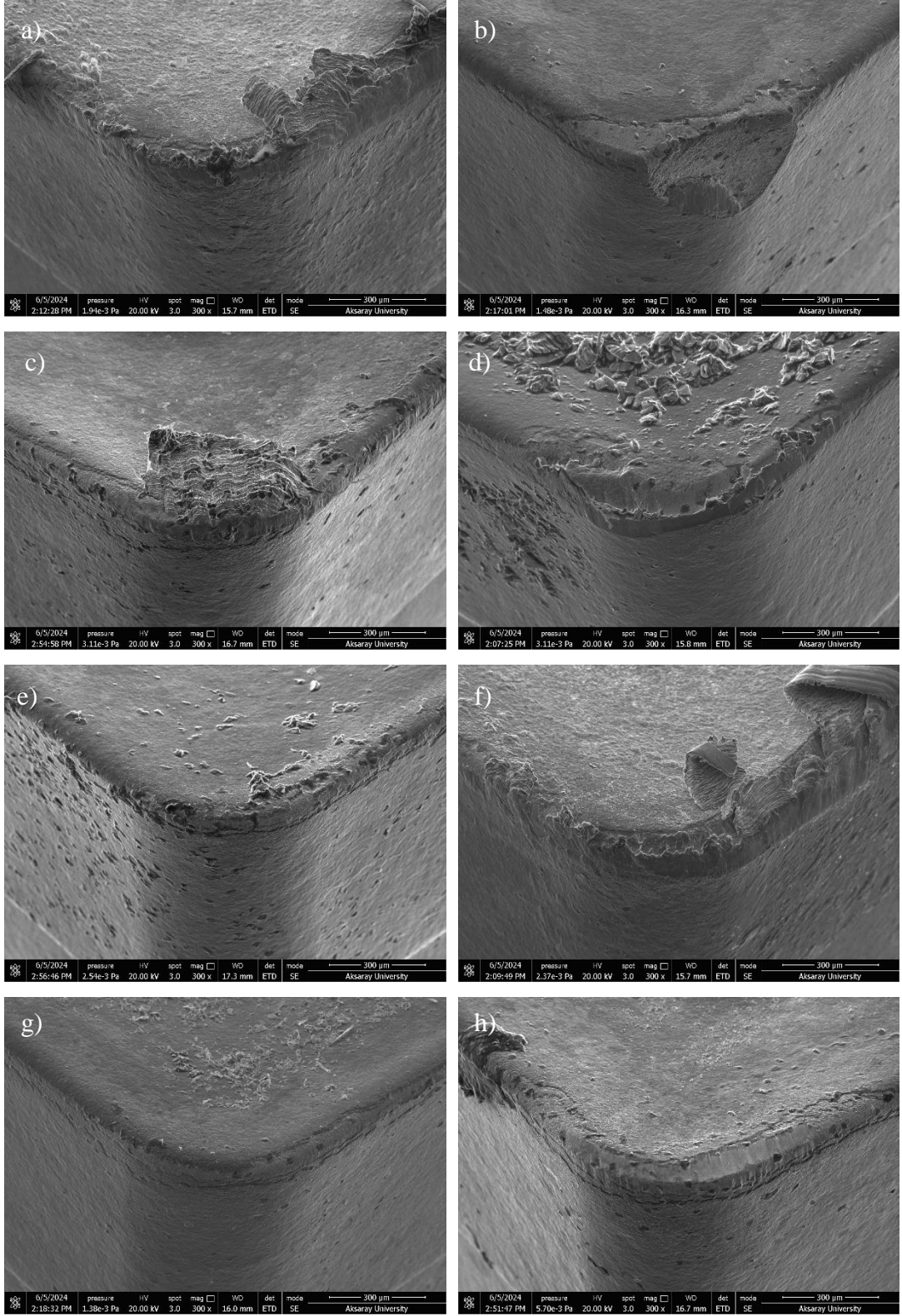


Şekil 5.6. İlerleme miktarına göre kesme sıcaklığı değerlerinin dağılımı.

Mastar malzeme ve 580 °C'de 3 saat temperlenen numuneler için en düşük ve en yüksek kesme hızı ve ilerleme miktarlarında kuru ve MQL kesme şartlarında kullanılan kesici takımlar üzerinde aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Bu

görüntülerden, abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu söylenebilir. Bu durum, iş parçası malzemesinin V, Mo ve Cr gibi güçlü karbür oluşturuvcu elementler içermesinden kaynaklanıyor olabilir. Şekil 5.7'ye göre, SEM resimlerinden kırılma, çentik aşınması, kenar ufalanması, yığılmış kenar (BUE), burun ve yan aşınma gibi aşınma türleri açıkça gözlemlenmiştir. Phafat ve arkadaşları tarafından AISI H13 çeliğinin MQL destekli işlenmesinde çentik aşınması, difüzyon ve talaşın ana hasar mekanizmaları olduğu bildirilmiştir [66]. Kesme hızı ve ilerleme miktarındaki artış ile kesici uçların yan ve talaş yüzeyindeki aşınma çukurlarının derinleştiği ve çentik ve krater aşınmasının takım aşınmasında önemli bir rol oynadığı söylenebilir.

Şekil 5.7. master malzeme için a) kuru işleme şartı 50 m/dak kesme hızı, b) kuru işleme şartı 200 m/dak kesme hızı, c) MQL işleme şartı 50 m/dak kesme hızı, d) MQL işleme şartı 200 m/dak kesme hızında kesici takımlarda elde edilen SEM görüntülerini, 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulana numune için e) kuru işleme şartı 50 m/dak kesme hızı, f) kuru işleme şartı 200 m/dak kesme hızı, g) MQL işleme şartı 50 m/dak kesme hızı, h) MQL işleme şartı 200 m/dak kesme hızında kesici takımlarda elde edilen SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 5.7 incelendiğinde, kuru işleme şartında elde edilen SEM görüntülerine göre MQL destekli işleme şartında elde edilen SEM görüntülerinde takım aşınmasının daha az olduğu görülmektedir. Kesme bölgesine soğutucu akışkanın iletilmesi ile yağlama fonksiyonunun artmasının bir sonucu olarak kesici takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmenin azalmasına bağlı olarak takım aşınması oluşumunu yavaşlatması olumlu bir etkiye neden olmuştur [63]. Bir diğer etken olarak da MQL soğutma sisteminde kesme bölgesine iletilen 8 bar soğutucu akışkanın soğutma kabiliyetini arttırması ile kesme sıcaklığının düşmesinin etkili olduğu düşünülmektedir.

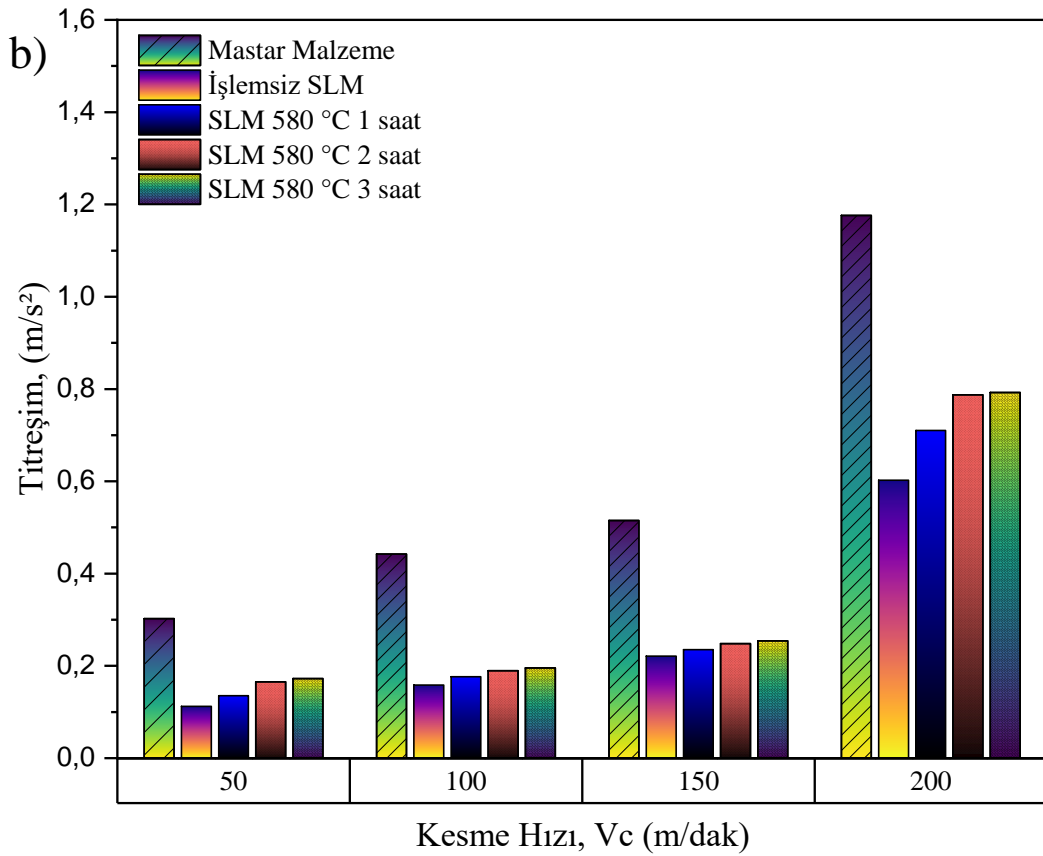
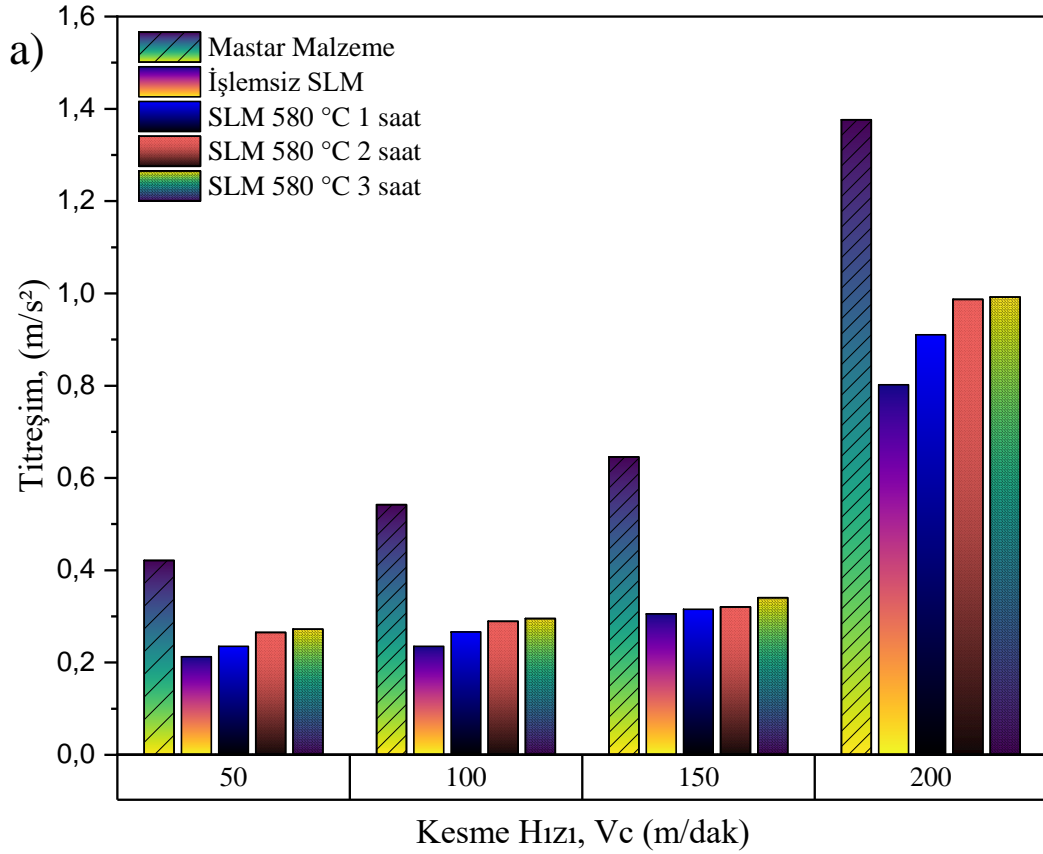


Şekil 5.7. Master malzeme ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numunelerin işlenmesi sonrası kesici takımların SEM görüntüleri.

5.4. TİTREŞİMİN DEĞERLENDİRİLMESİ

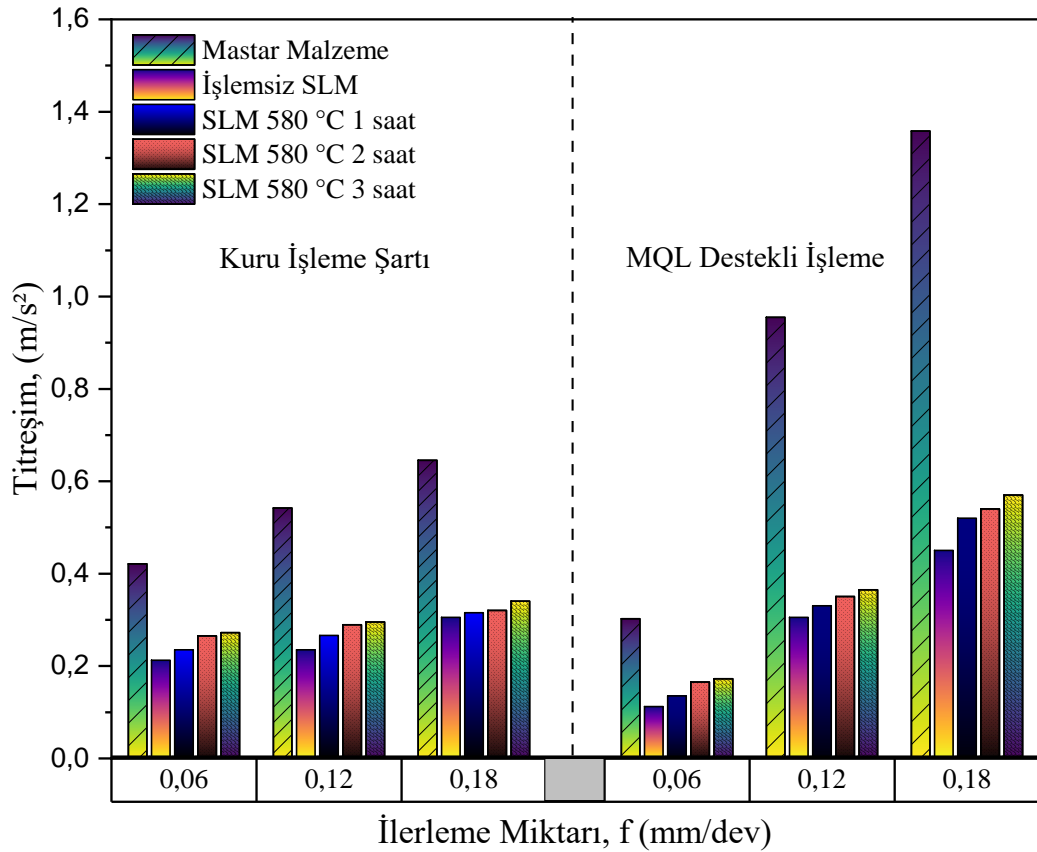
SLM yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliğinin frezelenmesinde işlem parametrelerinin titreşim (ivme genliği) üzerindeki ana etkileri Şekil 5.8 ve 5.9'da gösterilmiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde, en düşük titreşim değeri kuru işleme şartında 50 m/dak kesme hızında master malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numuneler için sırasıyla 0,421 0,212 0,235 0,265 ve 0,273 m/s² olarak ölçülmüştür. Aynı kesme hızında MQL destekli işleme kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise en düşük titreşim değeri sırasıyla 0,302 0,112 0,135 0,165 ve 0,172 m/s² olarak ölçülmüştür. Master malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numunelerin kuru işleme şartında kesme hızının %100 arttırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, titreşim değerlerinin sırasıyla %28,74 %10,84 %13,19 %9,05 ve %8,45 arttığı, kesme hızının %300 arttırılmasıyla yapılan deneylerde ise titreşim değerlerinin sırasıyla %226,84 %278,3 %287,23 %272,45 ve %264,7 arttığı görülmüştür. Benzer şekilde MQL destekli işleme şartında kesme hızının %100 arttırılması ile gerçekleştirilen deneylerde, titreşim değerlerinin sırasıyla %46,35 %41,07 %30,37 %14,54 ve %13,37 arttığı, kesme hızının %300 arttırılmasıyla yapılan deneylerde ise titreşim değerlerinin sırasıyla %289,4 %437,5 %425,92 %376,96 ve %360,46 arttığı görülmüştür. Kaplan ve arkadaşları, bu durumu kesici takım ile iş parçası arasında birim zamanda meydana gelen sürtünmenin artması ve boşta geçen zamanın azalması ile ilişkilendirmişlerdir [67]. Kesme hızındaki artışta olduğu gibi ilerleme miktarındaki artış ile titreşim değerlerinin arttığı görülmüştür. Titreşim değerlerinin artışı üzerinde kesme hızı ve ilerleme hızındaki artışla takım aşınması oluşumunun hızlanmasına neden olan gerinim oranı ve deformasyondaki artışın neden olacağı düşünülmektedir. Benzer bir çalışmada bu durum ilerleme miktarındaki artış ile takım tezgahındaki güç artışının kesme frekanslarını olumsuz etkilemesi ile ilişkilendirilmiştir [68].

Bütün deney numuneleri için MQL destekli işleme şartında ölçülen titreşim değerlerinin kuru işleme şartında ölçülen titreşim değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.8. Kesme hızına göre titreşim değerinin dağılımı: a) Kuru b) MQL destekli işleme.

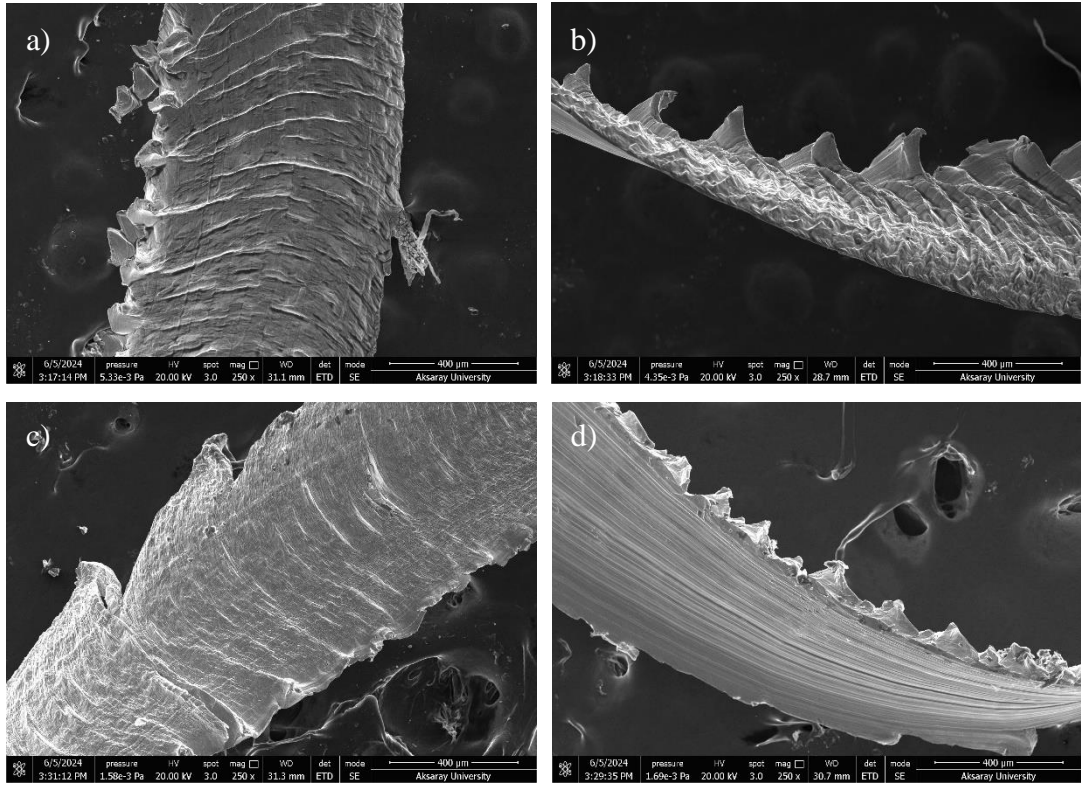
Deneysel ölçümler ile elde edilen titreşim değerleri üzerinde temperleme ısıl işleminin etkinliği göz önüne alındığında, master malzemede (ticari olarak tedarik edilen) gerçekleştirilen deneylerde ölçülen titreşim değerlerine göre seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) ile üretilen 17-4 PH çeliği numunelerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen titreşim değerlerinin yaklaşık olarak %38,7 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.1'e bakıldığında, SLM yöntemi ile üretilen işlemsiz 17-4 PH ve temperleme ısıl işlemleri uygulanan numunelerin sertliğine göre master malzemesinin sertliğinin yaklaşık olarak %36 daha fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla malzeme sertliğinin titreşim değerlerinin artışında etkili olduğu söylenebilir. İşlemsiz SLM numunenin işlenmesinde elde edilen titreşim değerleri ile temperleme işlemi uygulanan SLM numunelerin işlenmesinde elde edilen titreşim değerlerinin benzer eğilim gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. İlerleme miktarına göre titreşim değerlerinin dağılımı.

Her bir deney numunesi için gerçekleştirilen bütün ölçümlerin ortalamaları dikkate alındığında, kuru işleme şartına göre MQL destekli işleme şartında elde edilen titreşim

değerlerinin yaklaşık olarak %32,13 daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durum üzerinde kesme bölgesine soğutucu akışkanın iletilmesi ile yağlama fonksiyonunun artmasının bir sonucu olarak kesici takım ile iş parçası arasında birim zamanda meydana gelen sürtünmenin azalmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.9'da a) kuru dik b) kuru kesit ve c) MQL dik d) MQL kesit, MQL destekli işleme şartlarında 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numunenin 50 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesi sonrası elde edilen talaşların SEM görüntüleri verilmiştir. Bu SEM görüntüleri incelendiğinde kuru ve MQL destekli işleme şartlarında elde edilen talaşın yarı sürekli talaş tipine benzediği görülmektedir. Yarı sürekli talaş, testere dişi görünümlü ve genellikle titanyum alaşımları ve paslanmaz çelik gibi düşük termal iletkenliğe sahip malzemelerde oluşurlar. Testere dişi görünümlü talaş yüksek kayma şekil değişimi ve düşük kayma şekil değişiminin ardışık oluştuğunun bir göstergesidir. Bu duruma bağlı olarak kuru işleme şartına göre MQL destekli işleme şartında titreşim değerlerinin daha az olması MQL destekli işleme şartında elde edilen talaşın testere formunun daha küçük olması ile açıklanabilir.



Şekil 5.10. Master malzeme ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numuneler için talaş görüntüleri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

6.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliği numunelerin üzerinde temperleme ısıl işleminin etkileri araştırılmıştır. Ticari olarak üretilen 17-4 PH çeliği master malzeme olarak temin edilmiştir ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliği ve temperleme işlemi uygulanan numunelerin işlenebilirlik performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

Master malzemeye göre SLM yöntemi ile üretilen ve temperleme işlemi uygulanan numunelerin sertliğinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.

SLM yöntemi ile üretilen numunelere farklı bekleme sürelerinde uygulanan temperleme işleminin sertliği hafif bir şekilde arttırdığı görülmüştür. İşlemsiz SLM numunenin sertliğine göre 580 °C'de 3 saat bekletme süresi boyunca temperleme işlemi uygulanan numunenin sertliğinin yaklaşık olarak %7,9 arttığı görülmüştür.

MQL işleme şartının yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde etkili bir rol oynadığı ve kuru işleme şartına göre MQL destekli işleme şartında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yaklaşık olarak %86,45 daha az olduğu tespit edilmiştir.

Master malzemenin frezelenmesinde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) ile üretilen 17-4 PH çeliği numunelerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yaklaşık olarak %45 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

İşlemsiz SLM numunenin işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ile temperleme işlemi uygulanan SLM numunelerin işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin birbirine yakın olduğu ve ayrıca işleme şartları altında paralel eğilim gösterdiği görülmüştür

En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri MQL destekli işleme şartında 200 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numunenin işlenmesinde 0,237 µm olarak ölçülmüştür.

Bütün deney numuneleri için kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azalma trendine girdiği ancak ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artış trendine girdiği görülmüştür.

En düşük kesme sıcaklığı değeri MQL destekli işleme şartında 50 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında master malzeme, işlemsiz SLM, 580 °C'de 1 saat, 580 °C'de 2 saat ve 580 °C'de 3 saat temperleme işlemi uygulanan numuneler için sırasıyla 35, 25, 28, 28 ve 30 °C olarak ölçülmüştür.

SEM incelemesinde, kırılma, çentik aşınması, kenar ufalanması, yığılmış kenar (BUE), burun ve yan aşınma gibi aşınma türleri açıkça görülmüştür.

Kuru işleme şartında elde edilen SEM görüntülerine göre MQL destekli işleme şartında elde edilen SEM görüntülerinde takım aşınmasının daha az olduğu görülmüştür.

Bütün deney numuneleri için MQL destekli işleme şartında ölçülen titreşim değerlerinin kuru işleme şartında ölçülen titreşim değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Master malzemenin frezelenmesinde ölçülen titreşim değerlerine göre seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) ile üretilen 17-4 PH çeliği numunelerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen titreşim değerlerinin yaklaşık olarak %38,7 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

İşlemsiz SLM numunenin işlenmesinde elde edilen titreşim değerleri ile temperleme işlemi uygulanan SLM numunelerin işlenmesinde elde edilen titreşim değerlerinin benzer eğilim gösterdiği tespit edilmiştir.

Kuru işleme şartına göre MQL destekli işleme şartında elde edilen titreşim değerlerinin yaklaşık olarak %32,13 daha az olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Özsoy K., B. Duman B., “Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği.” Süleyman Demirel Üniversitesi, Derg. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.(2017).
- [2] Zhong Y. *et al.*, “Additive manufacturing of 316L stainless steel by electron beam melting for nuclear fusion applications,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 486, pp. 234–245, (2017).
- [3] Mahmoudi M., Elwany A., Yadollahi A, Thompson S.M., Bian L, and Shamsaei N., “Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel,” *Rapid Prototyp J*, vol. 23, no. 2, pp. 280–294, (2017).
- [4] Vunnam S., Saboo A., C. Sudbrack, and Starr T. L., “Effect of powder chemical composition on the as-built microstructure of 17-4 PH stainless steel processed by selective laser melting,” *Addit Manuf*, vol. 30, (2019).
- [5] Guennouni N. *et al.*, “Comparative study of the microstructure between a laser beam melted 17-4PH stainless steel and its conventional counterpart,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 823, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141718 (2021).
- [6] Sun Y., Hebert R. J., and Aindow M., “Effect of heat treatments on microstructural evolution of additively manufactured and wrought 17-4PH stainless steel,” *Mater Des*, vol. 156, pp. 429–440, (2018).
- [7] Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S. M., Elwany A., and Bian L., “Mechanical and Microstructural Properties Of Selective Laser 17-4 PH Stainless Steel”, *American Society of Mechanical Engineers*, (2015).
- [8] Sabooni S. *et al.*, “Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties,” *Addit Manuf*, vol. 46, (2021).
- [9] Kaynak Y. and Tascioglu E., “Finish machining-induced surface roughness, microhardness and XRD analysis of selective laser melted Inconel 718 alloy,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., pp. 500–504., (2018).
- [10] Irrinki H. *et al.*, “Effects of particle characteristics on the microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by laser-powder bed fusion,” *Powder Technol*, vol. 331, pp. 192–203, (2018).

- [11] Dilip J. J. S., Ram G. D. J., Starr T. L., and Stucker B., “Selective laser melting of HY100 steel: Process parameters, microstructure and mechanical properties,” *Addit Manuf*, vol. 13, pp. 49–60, (2017).
- [12] Nong X. D. and Zhou X. L., “Effect of scanning strategy on the microstructure, texture, and mechanical properties of 15-5PH stainless steel processed by selective laser melting,” *Mater Charact*, vol. 174, (2021).
- [13] Sivaiah P. and Chakradhar D., “Machinability studies on 17-4 PH stainless steel under cryogenic cooling environment,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 32, no. 15, pp. 1775–1788, (2017).
- [14] Leksycki K., Feldshtein E., Lisowicz J., Chudy R., and Mrugalski R., “Cutting forces and chip shaping when finish turning of 17-4 ph stainless steel under dry, wet, and mql machining conditions,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 9, pp. 1–15, (2020).
- [15] Basmaci G., Ay M., & Kirbaş İ., “Optimisation of Machining Parameters in Turning 17-4 Ph Stainless Steel Using the Grey-Based Taguchi Method,” *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 2017, no. 2, pp. 243–254, (2017).
- [16] Kalyon A., Ay M., “Experimental Determination of Machining Parameters of 17-4 Ph Stainless Steel in Cnc Turning,” (2011).
- [17] Li G., Xu WJin ., X., Liu L., Ding S., and Li C., “The machinability of stainless steel 316 L fabricated by selective laser melting: Typical cutting responses, white layer and evolution of chip morphology,” *J Mater Process Technol*, vol. 315, (2023).
- [18] Çetin Ş. and Kivak T., “Optimization of the machining parameters for the turning of 15-5 ph stainless steels using the taguchi method,” *Materiali in Tehnologije*, vol. 51, no. 1, pp. 133–140, (2017).
- [19] Silva T. E. F. *et al.*, “Comparison of the machinability of the 316L and 18Ni300 additively manufactured steels based on turning tests,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 235, no. 10, pp. 2207–2226, (2021).
- [20] Bai Y., Zhao C., Yang J., Hong R., Weng C., and Wang H., “Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment,” *J Mater Process Technol*, vol. 288, (2021).
- [21] Tamura S., Matsumura T., Ezura A., and Mori K., “Anisotropic Cutting Force Characteristics in Milling of Maraging Steel Processed Through Selective Laser Melting,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 144, no. 3, (2022).

- [22] Liu Z. *et al.*, “Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control,” *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 100. Chinese Society of Metals, pp. 224–236, (2022).
- [23] Aydın K., Karamolla M., “Katmanlı İmalat ile Üretilen ve Lazer Kaynağı ile Birleştirilen Ti6Al4V Malzemenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisi” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 8(4):1598-1608, (2019).
- [24] Aboulkhair N. T., Simonelli M., Parry L., Ashcroft I., Tuck C., and Hague R., “3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting,” *Progress in Materials Science*, vol. 106. Elsevier Ltd., (2019).
- [25] Karagöz İ., Bekdemir A. D., and Tuna Ö., “3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 9, no. 4, pp. 1186–1213, (2021).
- [26] internet: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-500/>
- [27] Cordero P. M., Mireles J., Ridwan S., and Wicker R. B., “Evaluation of monitoring methods for electron beam melting powder bed fusion additive manufacturing technology,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 2, no. 1–2, pp. 1–10, (2017).
- [28] internet:https://go.additive.ge.com/rs/706-JIU-273/images/GE%20Additive_EBM_White%20paper_FINAL.pdf.
- [29] Nandy J., Sarangi H., and Sahoo S., “A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling,” *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 6, no. 3. Springer, pp. 280–316, (2019).
- [30] Demiröz Ö. B. and Dilibal S., “Termoelektrik Modüller İçin Doğrudan Metal Lazer Sinterleme Eklemeli İmalat Yöntemi Kullanılarak Alüminyum Alaşımı Soğutucu Tasarımı ve Üretimi,” *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 5, no. 1, pp. (2021).
- [31] Dutta S. K., “Different Types and New Applications of Stainless Steel.”, *Head, Metallurgical & Materials Engg. Dept* (2018).
- [32] Joseph R., Davis and ASM International. *Handbook Committee., Stainless steels*. ASM International, (1994).
- [33] Michla J. R. J., Nagarajan R., Krishnasamy S., Siengchin S., Ismail S. O., and Prabhu T. R., “Conventional and Additively Manufactured Stainless Steels: A Review,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 74, no. 6. Springer, pp. 1261–1278, (2021).

- [34] internet: “Dubleks Paslanmaz Çelik.” <https://bircelik.com/tr/kategori/dubleks-paslanmaz-celik>, (2024).
- [35] internet: “630 (1.4542) PH 17-4 Paslanmaz Çelik.” <https://bircelik.com/tr/kategori/630-1-4542/>, (2024).
- [36] internet: “630 (1.4542) Paslanmaz Çelik Malzeme PH 17-4 Logo Metal.” <https://logometal.com.tr/630-1-4542/>, (2024).
- [37] Dhar N. R., Kamruzzaman M., and Ahmed M., “Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel,” *J Mater Process Technol*, vol. 172, no. 2, pp. 299–304, (2006).
- [38] Das A., Das S. R., Patel S. K., and Biswal B. B., “Effect of MQL and nanofluid on the machinability aspects of hardened alloy steel,” *Machining Science and Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 291–320, (2020).
- [39] internet: “E. V. Edilen Malzemeler Uygulamaları, "www.artikelakademi.com
- [40] Hashmi S., Batalha G. F., Tyne C. J. V., B. Yilbas, and Bassim N., “Comprehensive Materials processing Editor-In-Chief Health, Safety and Environmental Issues Volume.” (2014).
- [41] internet: “Temperleme ile Metallerin Dayanıklılığı Şekillendirmek - Akçelik.” <https://akcelik.com.tr/temperleme-menevisleme-ile-metallerin-dayanikligi-sekillendirmek/>
- [42] Murayama, M., Hono, K., & Katayama, Y. (1999). Microstructural evolution in a 17-4 PH stainless steel after aging at 400 C. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(2), 345-353.
- [43] Berns, H., & Theisen, W. (2008). *Ferrous materials: steel and cast iron*. Springer Science & Business Media.
- [44] Hsiao, C. N., Chiou, C. S., & Yang, J. R. (2002). Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel. *Materials Chemistry and Physics*, 74(2), 134-142.
- [45] Chandler, H. (Ed.). (1994). *Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels*. ASM international.
- [46] Krauss, G. (1990). *Steels: heat treatment and processing principles*, (2. Baskı). Ohio. ASM International, 43-240.
- [47] Krakhmalev, P., Yadroitsava, I., Fredriksson, G., & Yadroitsev, I. (2015). In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels. *Materials & Design*, 87, 380-385.
- [48] Berns, H., & Theisen, W. (2008). *Ferrous materials: steel and cast iron*. Springer Science & Business Media.

- [49] Junker, D., Hentschel, O., Schmidt, M., & Merklein, M. (2018). Investigation of heat treatment strategies for additively-manufactured tools of X37CrMoV5-1. *Metals*, 8(10), 854.
- [50] Chao, Q., Thomas, S., Birbilis, N., Cizek, P., Hodgson, P. D., & Fabijanic, D. (2021). The effect of post-processing heat treatment on the microstructure, residual stress and mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 821, 141611.
- [51] Bae, K., Moon, H. S., Park, Y., Jo, I., & Lee, J. (2022). Influence of Tempering Temperature and Time on Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured H13 Tool Steel. *Materials*, 15(23), 8329.
- [52] Çiftçi, İ., “Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools”, *Tribology International*, 39 (6): 565–569 (2006)
- [53] Akgün, M., Demir, H., Çiftçi, İ., “Mg₂Si partikül takviyeli magnezyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi.*, 21(3): 645-650 (2018).
- [54] Shaw, M. C., “Metal Cutting Principles”, Oxford University Press, Oxford, 1-20 (1989).
- [55] Kara, F., Bulan, N., Akgün, M., & Köklü, U. (2023). Multi-objective optimization of process parameters in milling of 17-4 PH stainless steel using taguchi-based gray relational analysis. *Engineered science*, 26, 961.
- [56] Akgün, M. (2022). Optimization of process parameters affecting cutting force, power consumption and surface roughness using taguchi-based gray relational analysis in turning AISI 1040 steel. *Surface Review and Letters*, 29(03), 2250029.
- [57] Akgün, M., Yurtkuran, H. and Ulaş, H. B., “Optimization of Cutting Parameters and Analysis of Effects of Artificial Aging on Machinability of AA7075 Alloy”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri. Dergisi*, 26 (1): 75-81 (2020).
- [58] Akgün, M., Özger, G., Ulaş, H. B. (2014). Döküm yöntemiyle üretilmiş az91 magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 30(5), 323-328.
- [59] Özlü, B., Demir, H., Türkmen, M. and Gündüz, S., “Investigation of Machinability of Cooled Microalloy Steel in Oil After the Hot Forging with Coated and Uncoated CBN Cutting Tools”, *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, 36 (4):. 1165-1174 (2018).
- [60] Özbek, N. A., Özbek, O., & Kara, F. (2021). Statistical analysis of the effect of the cutting tool coating type on sustainable machining parameters. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(10), 7783-7795.

- [61] Erden, M. A., Uzun, F. G., Akgün, M., & Gökçe, H. (2023). Influence of Ti and Nb addition on the microstructure, mechanical, and machinability properties of 316L stainless steel fabricated by powder metallurgy. *Materials Testing*, 65(8), 1237-1253.
- [62] Sivaiah, P., & Chakradhar, D. (2019). The effectiveness of a novel cryogenic cooling approach on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel material. *Silicon*, 11(1), 25-38.
- [63] Öndin, O., Kıvak, T., Sarıkaya, M., & Yıldırım, Ç. V. (2020). Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel. *Tribology International*, 148, 106323.
- [64] P. Sivaiah, D. Chakradhar, Machinability studies on 17-4 PH stainless steel under cryogenic cooling environment, *Materials and Manufacturing Processes*, 2017, 32, 1775-1788, doi: 10.1080/10426914.2017.1339317
- [65] N. Altan Özbek, O. Özbek, F. Kara, Statistical analysis of the effect of the cutting tool coating type on sustainable machining parameters, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30, 7783-7795, doi: 10.1007/s11665-021-06066-8.
- [66] N.G. Phafat, R.R. Deshmukh, and S.D. Deshmukh, Study of Cutting Parameters Effects in MQL-Employed Hard-Milling Process for AISI H13 for Tool Life, *Appl. Mech. Mater.*, 2013, 393, p 240–245. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.393.240>
- [67] Kaplan, Y., Motorcu, A. R., Nalbant, M., & Okay, Ş. (2015). The effects of process parameters on acceleration amplitude in the drilling of cold work tool steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 1387-1401.
- [68] Yılmaz V., “Frezeleme uygulamalarında işleme parametrelerinin sebep olduğu titreşimlerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2009)

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa YİĞİT, ilk ve orta öğrenimini Ankara ilinde ve lise öğrenimini İncirli Endüstri Meslek Lisesi Metal İşleri Bölümü'nde tamamlamıştır. 2007 yılında Gazi Üniversitesi Atatürk Meslek Yüksek Okulu Otomotiv Bölümünde öğrenime başlayıp 2009 yılında mezun olmuştur. 2016 yılında Dikey Geçiş Sınavı (DGS) ile Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne başlamış olduğu yüksek lisans programını 2021 yılında tamamlamıştır. Bu süre zarfında Ankara ilinde çeşitli savunma sanayi firmalarında Cad/Cam uzmanı olarak çalışmıştır. 2015 yılında TÜBİTAK SAGE' de Boyutsal Kalite Kontrol Birimi'nde, Kalite Kontrol Sorumlusu olarak göreve başlamış ve Aerodinamik Birim' inde Mekanik Tasarım Sorumlusu olarak devam etmektedir. 2021 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir.