



**NİKEL ESASLI INCONEL 718 SÜPER
ALAŞIMININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ
KULLANILARAK ÇIKTI PARAMETRELERİNİN
TAHMİN EDİLMESİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Maher Waleed Hamid HAMID

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Halil DEMİR
Doç. Dr. Barış ÖZLÜ**

**NİKEL ESASLI INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ
KULLANILARAK ÇIKTI PARAMETRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ**

Maher Waleed Hamid HAMID

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

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Halil DEMİR
Doç. Dr. Barış ÖZLÜ**

**KARABÜK
Haziran 2024**

Maher Waleed Hamid HAMID tarafından hazırlanan “NİKEL ESASLI INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ KULLANILARAK ÇIKTI PARAMETRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Halil DEMİR

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Barış ÖZLÜ

.....

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

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mahir AKGÜN (ASÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Serdar GÜLDİBİ (KBÜ)

.....

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.”

Maher Waleed Hamid HAMID

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NİKEL ESASLI INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ KULLANILARAK ÇIKTI PARAMETRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ

Maher Waleed Hamid HAMID

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Doç. Dr. Barış ÖZLÜ

Haziran 2024, 60 sayfa

Bu çalışmada, nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımın frezelenmesinde soğutma/yağlama şartlarının ve kesme parametrelerinin güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve titreşim üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca işleme parametreleri ve deney sonuçları kullanılarak üç farklı regresyon tabanlı makine öğrenme modeli (Lineer Regresyon (LR), Karar Ağacı Sınıflandırıcısı (KAS) ve Destek Vektör Makinesi (DVM)) kullanılarak tahmin edilmiştir. Deney tasarımı Taguchi L27 dizinine göre hazırlanmıştır. İşleme parametresi olarak, üç farklı soğutma/yağlama şartı (kuru, hava ve MQL), üç farklı kesme hızı (40 m/dak, 60 m/dak ve 80 m/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev) seçilmiştir. Sonuç olarak en düşük güç tüketimi MQL yağlama şartında, 40 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme

miktarında 0,76 kW olmuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü ve titreşim MQL yağlama şartında, 80 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında sırası ile 0,234 μm ve 1,91 m/s^2 ölçülmüştür. Ayrıca en düşük kesme sıcaklığı hava soğutma şartında, 40

m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında 31 °C ölçülmüştür. Yapılan çalışmada kesme hızının, kesme sıcaklığının, ve titreşimin kesme hızının artması ile arttığı görülmüştür. Ancak artan kesme hızı yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olmuştur. Artan ilerleme miktarı güç tüketiminin, yüzey pürüzlülüğünün, kesme sıcaklığının ve titreşimin artmasına sebep olmuştur. Kesme sıcaklığının azalması takım aşınması üzerinde olumlu bir etki göstermiştir. Ayrıca MQL yağlama şartı güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerinde olumlu etki göstererek değerlerin azalmasına neden olmuştur. Lineer Regresyon, Karar Ağacı Sınıflandırıcısı ve Destek Vektör Makinesi kullanılarak güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve titreşim için hata performans ölçütlerine ve elde edilen tahmini değerlere göre en iyi tahmini Destek Vektör Makinesi ile elde edilmiştir. Bunun için R-kare güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve titreşim için sırası ile %94, %98, %93 ve %90 olmuştur.

Anahtar Sözcükler : Inconel 718 Süper Alaşım, Frezeleme, Soğutma/Yağlama Şartları, Güç Tüketimi, Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Sıcaklığı, Takım Aşınması, Titreşim, Makine Öğrenimi.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EVALUATION OF THE MACHINABILITY OF NICKEL-BASED INCONEL 718 SUPER ALLOY AND PREDICTING THE OUTPUT PARAMETERS USING MACHINE LEARNING

Maher Waleed Hamid HAMID

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisors:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Doç. Dr. Barış ÖZLÜ

June 2024, 60 pages

In this study, the effects of cooling/lubrication conditions and cutting parameters on power consumption, surface roughness, cutting temperature, tool wear and vibration in milling nickel-based Inconel 718 super alloy were investigated. Additionally, processing parameters and experimental results were estimated using three different regression-based machine learning models (Linear Regression (LR), Decision Tree Classifier (DTC) and Support Vector Machine (SVM)). The experimental design was prepared according to the Taguchi L27 index. As machining parameters, three different cooling/lubrication conditions (dry, air and MQL), three different cutting speeds (40 m/min, 60 m/min and 80 m/min) and three different feed rates (0.06 mm/rev), 0.09 mm/rev and 0.12 mm/rev) were selected. As a result, the lowest power consumption was measured at 0.76 kW at MQL lubrication, 40 m/min cutting

speed and 0.06 mm/rev feed rate. As a result, the lowest power consumption was measured as 0.76 kW with MQL lubrication, at a cutting speed of 40 m/min and a feed rate of 0.06 mm/rev. The lowest surface roughness and vibration were measured as 0.234 μm and 1.91 m/s^2 , respectively, under MQL lubrication condition, 80 m/min cutting speed and 0.06 mm/rev feed rate. In addition, the lowest cutting temperature was measured as 31 °C under air cooling condition, at a cutting speed of 40 m/min and a feed rate of 0.06 mm/rev. In the study, it was observed that cutting speed, cutting temperature, and vibration increased with increasing cutting speed. However, increasing cutting speed caused the surface roughness to decrease. The increasing amount of feed caused an increase in power consumption, surface roughness, cutting temperature and vibration. The decrease in cutting temperature had a positive effect on tool wear. In addition, MQL lubrication condition had a positive effect on power consumption, surface roughness and vibration, causing the values to decrease. Using Linear Regression, Decision Tree Classifier and Support Vector Machine, the best prediction was obtained with the Support Vector Machine according to the error performance criteria and the estimated values obtained for power consumption, surface roughness, cutting temperature and vibration. For this, R-squared was 94%, 98%, 93% and 90% for power consumption, surface roughness, cutting temperature and vibration, respectively.

Key Word : Inconel 718 Super Alloy, Milling, Cooling/Lubrication Conditions, Power Consumption, Surface Roughness, Cutting Temperature, Tool Wear, Vibration, Machine Learning.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca tecrübesi ve bilgi birikimi ile yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Halil DEMİR’e ve Tez 2. Danışmanım Doç. Dr. Barış ÖZLÜ’ye yardımları için teşekkür ederim.

Bugüne kadar hayatımın her aşamasında olduğu gibi yüksek lisans aşamasında da desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	ii
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
SÜPER ALAŞIM MALZEMELER.....	3
2.1. SÜPER ALAŞIMLAR	3
2.2. NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLAR.....	4
2.3. DEMİR ESASLI SÜPER ALAŞIMLAR.....	4
2.4. KOBALT ESASLI SÜPER ALAŞIMLAR	5
2.5. INCONEL 718 SÜPER ALAŞIM.....	5
BÖLÜM 3	7
İŞLENEBİLİRLİK.....	7
3.1. TALAŞLI İMALAT MEKANİĞİ.....	7
3.2. YEŞİL ÜRETİM İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMI.....	7
3.3. FREZELEME	9
3.4. TALAŞLI İMALAT OPERASYONLARINDAKİ PARAMETRELER VE FORMÜLLER	10
3.4.1. Kesme Hızı (Vc)	10
3.4.2. İlerleme Miktarı (f).....	11
3.5. GÜÇ TÜKETİMİ	12

Sayfa

3.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	13
3.5. KESME SICAKLIĞI	15
3.5.1. Kesme Sıcaklığının İşleme Üzerine Etkisi	15
3.6. TAKIM AŞINMASI.....	16
3.7. TİTREŞİM.....	17
 BÖLÜM 4	19
MATERYAL VE YÖNTEM	19
4.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME	19
4.2. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA SİSTEMİ	19
4.3. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCU	21
4.4. DENEYLERDE KULLANILAN TAKIM TEZGÂHI	22
4.5. KESME SICAKLIĞI ÖLÇÜMLERİ	23
4.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMLERİ.....	24
4.7. GÜÇ TÜKETİMİNİN ÖLÇÜMLERİ.....	26
4.8. TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİ	27
4.9. TAKIM AŞINMASININ ÖLÇÜMÜ VE İNCELENMESİ	27
4.10. KESME PARAMETRELERİNİN HAZIRLANMASI.....	28
4.11. MAKİNE ÖĞRENİM UYGULAMALARI.....	29
4.11.1. Lineer Regresyon.....	29
4.11.2. Karar Ağacı Sınıflandırıcısı	29
4.11.3. Destek Vektör Makinesi	30
 BÖLÜM 5	32
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	32
5.1. GÜÇ TÜKETİMİ	32
5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	35
5.3. KESME SICAKLIĞI	38
5.4. TAKIM AŞINMASI.....	41
5.5. AŞINMIŞ KESİCİ TAKIMLARDA SEM İNCELEMESİ.....	42
5.6. TİTREŞİM.....	44
5.7. MAKİNE ÖĞRENİMİ UYGULAMALARI	47
5.7.1. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Güç Tüketimi Tahmini.....	47

Sayfa

5.7.2. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Yüzey Pürüzlülüğü Tahmini	48
5.7.3. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Kesme Sıcaklığı Tahmini.....	50
5.7.4. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Titreşim Tahmini	51
 BÖLÜM 6	 54
SONUÇLAR	54
6.1. SONUÇLAR	55
 KAYNAKLAR	 57
 ÖZGEÇMİŞ	 64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Süper alaşımların 100 saat süre boyunca 600-1200 °C arası gerilme-kopma davranışı.	3
Şekil 3.1 Sürdürülebilir işleme aşamaları.	8
Şekil 3.2. Talaş kaldırma işlemlerinin kullanım sıklığı.	10
Şekil 3.3. Frezelemede talaş kaldırma işlemi.	11
Şekil 3.4. Gutowski'den uyarlanan üretimde enerji.	13
Şekil 3.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için kullanılan koordinatlar.	14
Şekil 4.1. Werte StN 15 minimum miktarda yağlama sistemi.	20
Şekil 4.2. Hannsa YH 1600-A CNC freze tezgâhı.	22
Şekil 4.3. FLIR İ60 kızılötesi termal kamera.	23
Şekil 4.4. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlük cihazı.	24
Şekil 4.5. Lutron marka DW-6095-3 faz güç analizörü.	26
Şekil 4.6. Modal Shop K333D01-VM model dijital titreşim ölçer.	27
Şekil 4.7. Takım aşınma ölçülmesinde kullanılan a) dijital ve b) SEM mikroskopları.	28
Şekil 4.8. Karar ağacının genel yapısı.	30
Şekil 4.9. Destek vektör makinesinin grafiksel gösterimi.	31
Şekil 5.1. Inconel 718 alaşımının ferzelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı güç tüketimi değişimi.	34
Şekil 5.2. Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.	38
Şekil 5.3. Inconel 718 frzelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı kesme sıcaklığı değişimi.	40
Şekil 5.4. Inconel 718 frzelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı takım aşınması değişimi.	42
Şekil 5.5. Kesici takımlara ait SEM görüntüleri ve EDAX analizi.	44
Şekil 5.6. Inconel 718 frezelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı titreşim değişimi.	46
Şekil 5.7. Güç tüketimi için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.	48
Şekil 5.8. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.	50

Sayfa

Şekil 5.9. Kesme sıcaklığı için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.	51
Şekil 5.10. Titreşim için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.	53



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	AMS 5383'e göre standart IN718 alaşımının kimyasal kompozisyonu.	6
Çizelge 4.1.	Inconel 718 alaşımının kimyasal kompozisyonu	19
Çizelge 4.2.	Werte StN 15 teknik özellikleri.	20
Çizelge 4.3.	Mackerel Ms MQL yağının teknik özellikleri.	21
Çizelge 4.4.	Deneylerde kullanılan kesici takımın teknik özellikleri.	21
Çizelge 4.5.	Deneylerde kullanılan takım tutucusunun teknik özellikleri.	21
Çizelge 4.6.	YH 1600-A CNC tezgahının teknik özellikleri.	22
Çizelge 4.7.	Mitutoyo Surface SJ-210 yüzey pürüzlük cihazının teknik özellikleri.	25
Çizelge 4.8.	Taguchi L_{27} işleme parametreleri ve seviyeleri.	28
Çizelge 4.9.	Takım aşınması için Taguchi L_9 işleme parametreleri ve seviyeleri. ..	29
Çizelge 5.1.	Güç tüketimi için deney sonuçları	32
Çizelge 5.2.	Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları.	35
Çizelge 5.3.	Kesme sıcaklığı için deney sonuçları	38
Çizelge 5.4.	Kesme sıcaklığı için deney sonuçları.	45
Çizelge 5.5.	Güç tüketimi için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.	48
Çizelge 5.6.	Üç farklı performans göstergesi ile güç tüketimi için elde edilen test hataları.	48
Çizelge 5.7.	Yüzey pürüzlülüğü için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.	49
Çizelge 5.8.	Üç farklı performans göstergesi ile yüzey pürüzlülüğü için elde edilen test hataları.	49
Çizelge 5.9.	Kesme sıcaklığı için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.	51
Çizelge 5.10.	Üç farklı performans göstergesi ile kesme sıcaklığı için elde edilen test hataları.	51
Çizelge 5.11.	Titreşim değerleri için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.	52
Çizelge 5.12.	Üç farklı performans göstergesi ile titreşim için elde edilen test hataları.	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

f	: İlerleme hızı, (mm/dev)
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü, (μm)
Vc	: Kesme hızı, (m/dak)
fz	: Diş başına ilerleme (mm/dev)
Vf	: Tabla ilerlemesi (mm/dak)
Z	: Kesici takımdaki kesici diş sayısı (adet)
n	: Devir sayısı (dev/dak)
d	: Kesici takımın çapı (mm)

KISALTMALAR

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
ASTM	: Amerika Test ve Malzeme Birliği
LR	: Lineer Regresyon
KAS	: Karar Ağacı Sınıflandırıcısı
DVM	: Destek vektör makinesi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Inconel 718, ilk olarak 1950'lerin sonlarında Uluslararası Nikel Şirketi Eiselstein tarafından gaz türbini motorları için geliştirilen, yüksek performanslı Nikel-Demir-Krom bazlı bir süper alaşımdır [1]. Bu alaşım mekanik özelliklerinin büyük bir kısmını 650 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda koruyabilen, çöktirmeyle sertleşebilen bir nikel alaşımıdır. Inconel 718, mükemmel sürünme, yüksek mukavemet, iyi oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda korozyon direnci, diğer yüksek fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı havacılık, nükleer enerji, denizcilik, ve petrol alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [2-4]. Üstün korozyon direnci, sürünme direnci ve kayda değer yorulma direnci dahil olmak üzere olağanüstü mekanik avantajları, yüzey bozulmasına neden olan takım ömrünü kısaltma eğiliminde olan kesme mukavemetinin yanı sıra çekme mukavemetiyle de donatılmıştır [5-7]. Ayrıca bu metal alaşımlarının erime noktalarına yakın yüksek mukavemetli özelliklerini muhafaza etme kabiliyeti, işlenmesi zor malzemeler olarak sınıflandırılmalarına katkıda bulunmuştur. Bu özellik, işleme süreçlerini karmaşık hale getirerek gelişmiş işleme araçlarına ve tekniklerine olan ihtiyacı altını çiziyor [8].

Talaşlı imalat endüstrisinde süper alaşımların kuru kesme ortamlarında işlenmesi yüksek üretim maliyetine ve zayıf yüzey kalitesine neden oluyor. Geleneksel soğutma tekniği, kesilmesi zor malzemelerin işlenmesi sırasında kesme bölgesi sıcaklığını kontrol etmek için kullanılan bir teknik olmasına rağmen hem çevre hem de operatör sağlığı konusunda olumsuz etkileri var. Kesme sıvısı, talaşın bertaraf edilmesi, işleme doğruluğunun ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve takım ömrünün uzatılması için yaygın olarak kullanılır. Günümüzde küresel çevrenin korunması için kesme sıvısı tüketiminin azaltılması ve klor içermeyen kesme sıvılarının kullanılması gerekmektedir. Atık kesme yağlarının bertaraf maliyeti artıyor. Ayrıca kesme yağlarının kullanımına ilişkin düzenlemeler de yürütülmektedir. Bu nedenle çevresel ve ekonomik açıdan minimal miktarda yağlama (MQL) dikkat çekmekte ve yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. İmalat sektöründe MQL işlemede, takım ucuna basınçlı hava ile düşük miktarlarda bitkisel yağ veya biyolojik olarak parçalanabilen

sentetik ester püskürtülür. İmalat sektöründe yağ tüketimi yaklaşık 10-100 ml/saat aralığındadır. MQL işleme, çelikleri ve alüminyum alaşımlarını keserken takım ömrü ve yüzey kalitesi açısından geleneksel soğutma teknikleri ile neredeyse eşit veya genellikle daha iyidir. Son yıllarda paslanmaz çelikler, titanyum alaşımları, nikel bazlı süper alaşımlar vb. gibi işlenmesi zor malzemelerin işlenmesi için kesme yağlarının tüketiminin azaltılmasına yönelik bir talep vardır [7,9-13].

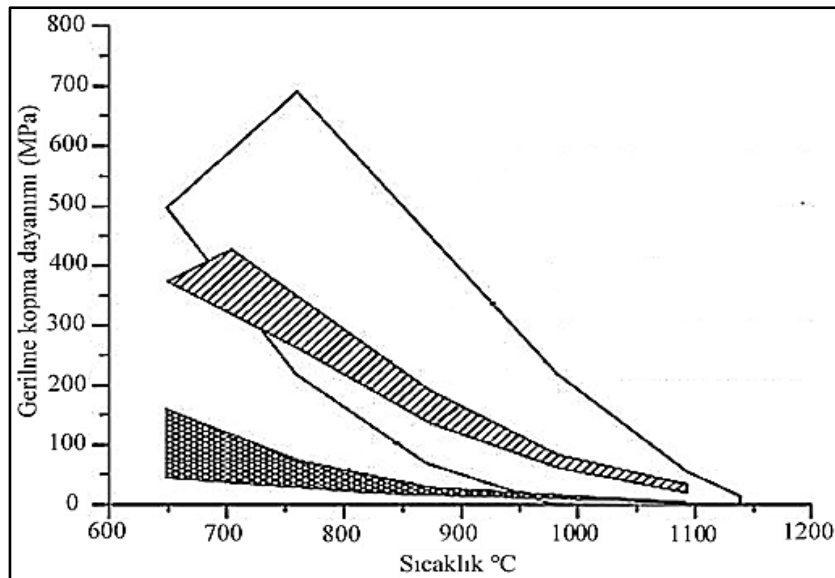
Bu nedenle bu çalışmada, nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımın frezelenmesinde soğutma/yağlama şartlarının ve kesme parametrelerinin güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve titreşim üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca işleme parametreleri ve deney sonuçları kullanılarak üç farklı regresyon tabanlı makine öğrenme modeli Lineer Regresyon (LR), Karar Ağacı Sınıflandırıcısı (KAS) ve Destek Vektör Makinesi (DVM) kullanılarak tahmin edilemeye çalışılmıştır.

BÖLÜM 2

SÜPER ALAŞIM MALZEMELER

2.1. SÜPER ALAŞIMLAR

Süper alaşımlar, çalışma sıcaklığı 540 °C'nin üzerinde olan Nikel bazlı, Nikel-Demir ve Nikel-Kobalt alaşımlar olarak adlandırılırlar [14,15]. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilecek malzemelerin bulunmaması nedeniyle üretilmiştir. Süper alaşımlar gaz türbini motorları, yanma odaları, nükleer reaktörler, uçak kaplamaları, konveyör bantları ve türbin kanatları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [16-18]. Süper alaşımlar mekanik özellikleri bakımından yüksek sürünme direnci, yorulma mukavemeti, oksidasyon, korozyon, aşınma direnci ve erime noktalarına yakın sıcaklıklara kadar çekme mukavemeti özellikleri sahiptir. Şekil 2.1'de süper alaşımların 600 ile 1200 °C arasındaki sıcaklıklarda 100 saatlik süre boyunca genel gerilim-kopma mukavemetlerini göstermektedir [19-22].



Şekil 2.1. Süper alaşımların 100 saat süre boyunca 600-1200 °C arası gerilme-kopma davranışı.

2.2. NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLAR

İleri mühendislik uygulamalarında üstün özelliklerinden dolayı nikel esaslı süper alaşımlar yaygın olarak tercih edilmektedir. Aynı zamanda mükemmel metalurjik stabilite ve yüksek koşullar altında bile özelliklerini korumaktadırlar. Ayrıca kaynak edilebilme özellikleri olduğundan farklı endüstriyel alanlarda da kullanılmaktadır. Ni bazlı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda hem oksidasyon direnci hem de sağlamlık gerektiren bileşenlerde yaygın kullanım alanı sahiptirler [23]. Bu uygulamalara türbinler, roketler, ısı eşanjörleri, dayanıklılığın ve performansın çok önemli olduğu diğer makine elemanlarını örnek verebiliriz. Bu alaşımların kimyasal kompozisyonu nikel (Ni), krom (Cr), demir (Fe), molibden (Mo), kobalt (Co), alüminyum (Al) ve tungsten (W) gibi elementlerden oluşur.

Inconel 718 alaşımının birinci elementi nikeldir. Alaşımın %50 ile %55'ini nikel elementi oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, süneklik ve oksidasyon direnci sağlar. Ayrıca kimyasal kompozisyonunda %17 ile %21 aralığında Cr elementi bulundurmaktadır. Alaşımın oksidasyona, korozyona ve yüksek sıcaklık dayanımına karşı direncine katkıda bulunur. Demir az miktarda bulunur. Alaşımdaki önemli bir elementtir çünkü korozyon direncinden ödün vermeden, yüksek sıcaklıklarda alaşıma daha yüksek mukavemet ve süneklik sağlar. Bu alaşım %2,8 ile %3,3 aralığında kimyasal kompozisyonunda molibden bulundurur. Bu element yüksek sıcaklıklarda alaşımın mukavemetini artırır. Nb ve Ti ise yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve stabilite sağlayan diğer kritik elementlerdir. Bu elementler ısıtılma işlem sırasında tane büyümesini engellemede yardımcı olur.

2.3. DEMİR ESASLI SÜPER ALAŞIMLAR

Nikel esaslı alaşımlara göre demir esaslı süper alaşımların dayanımı daha düşüktür. Yüksek mekanik dayanım gerektiren ve yüksek çalışma sıcaklıklarında demir esaslı süper alaşımlara göre nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar daha fazla tercih edilirler. 650 °C'ye kadar olan endüstriyel uygulamalarda demir esaslı süper alaşımlar kullanılmaktadırlar. Demir esaslı süper alaşımlar düşük sıcaklıklarda gerek duyulan

mekanik özelliklerde nikel esaslı ve kobalt esaslı süper alaşımlardan daha fazla seçilmektedir. Ayrıca bu alaşımın diğer süper alaşımlara göre maliyeti daha düşüktür. Bu alaşımlar kimyasal kompozisyonunda diğer süper alaşımlara göre daha fazla Fe (%15, %60) içermektedir. Ayrıca kimyasal kompozisyonunda %25 ile %45 oranlarında Ni, %15 ile %28 oranlarında Cr ile çok az miktarda olsa da %1 ile %6 arasında Mo veya W bulundurmaktadır. Bu alaşımlara katılan krom ile alaşımın oksidasyon direnci artırılmaktadır. Demir esaslı alaşımların çökelme ile sertleşmesi Al, Ti ve Nb elementleri ile kazandırılmaktadır. Endüstride gaz türbin motorlarında, türbin disklerinde, türbin kutularında ve katalitik konvertör gibi motor parçalarının imalatında demir esaslı süper alaşımlar kullanılmaktadır [24].

2.4. KOBALT ESASLI SÜPER ALAŞIMLAR

Bu alaşımlar adında da anlaşılacağı üzere kimyasal kompozisyonunda yüksek miktarda kobalt elementi bulundurmaktadır. Bu elemente ilaveten kimyasal kompozisyonunda önemli miktarda tungsten, nikel ve krom içermektedir. Ayrıca az miktarda olsa titanyum, niyobyum, tantal, molibden gibi elementleri de kimyasal kompozisyonunda bulundurmaktadır. Bu alaşımların hiç biri tam takı eriyik olmamaktadır. Kobalt esaslı süper alaşımlar tümü yapılarında karbür veya intermetalik bileşikler bulundurur. Bu özelliklerde yaşlanmaya ve oda sıcaklığında sünekliliğin azalmasına neden olmaktadır [25].

2.5. INCONEL 718 SÜPER ALAŞIM

Bu alaşımı Uluslararası Nikel Şirketi tarafından ilk olarak 1950’de nikel bazlı süper alaşımların zayıf kaynak kabiliyetini artırmak için geliştirmiştir. Bu alaşımlar yaşlandırma işlemi uygulandıkça sertleşebilen nikel bazlı bir süper alaşımdır. AMS 5383 standardına göre gösterilen Inconel 718 alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Inconel 718 alaşımı, yüksek basınçlı kompresör kanatları, diskleri, mahfazası, havacılık, nükleer enerji, petrol endüstrisi ve diğer yüksek sıcaklık parçalarının üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. Inconel 718 alaşımı mükemmel

yorulma ve sürünme direncinin, yüksek sıcaklık dayanımına ilaveten agresif ortamlarda iyi sıcak

Çizelge 2.1. AMS 5383'e göre standart IN718 alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Element	Ni	Cr	Nb	Fe	Mo	Ti	Al
Wt %	50-55	17-21	4,7-5,5	Denge	2,8-3,3	0,65-1,15	0,2-0,8
Element	Co	Mn	Si	C	S	Cu	B
Wt %	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
	1	0,35	0,35	0,08	0,015	0,3	0,006

sıcak korozyon ve oksidasyon direnci gibi olağanüstü özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinin yanı sıra kaynak özellikleri, özellikle kaynak sonrası çatlamaya karşı direnci ve yüksek sıcaklıklarda mekanik stabilitesi mükemmeldir. Bu özelliklere bağlı olarak bu alaşım 700 °C'ye kadar çalışma sıcaklıklarında uzun çalışma süreleri gerektiren birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [26-34].

BÖLÜM 3

İŞLENEBİLİRLİK

3.1. TALAŞLI İMALAT MEKANİĞİ

İşlenebilirliği malzeme kombinasyonunun çeşitliliği ve işleme parametreleri etkiler. Kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması kesme sıcaklığı, çapak oluşumu, talaş kontrolü ve diğer çıktı parametreleri ile işlenebilirlik terimi karakterize edilir. Herhangi bir malzemenin işlenebilirliği incelenirken okadar çok parametre ve durum kombinasyonu vardır ki, işlenebilirliğin araştırılması zor olabilir. Ayrıca işlenebilirlik araştırmaları, bir malzemenin işlenmesi sırasındaki zorlukların daha iyi anlaşılmasını sağlar. Buda bize, işlenebilirliği araştırılan malzemenin uzun vadede ürünün imalatı için yararlı bilgiler sağlamaktadır. Aşağıdaki verilen başlıklarla işleme süreçleri ve iş parçası malzemesinin işlenebilirliğini etkileyen faktörler hakkında temel bilgiler tanımlanmıştır.

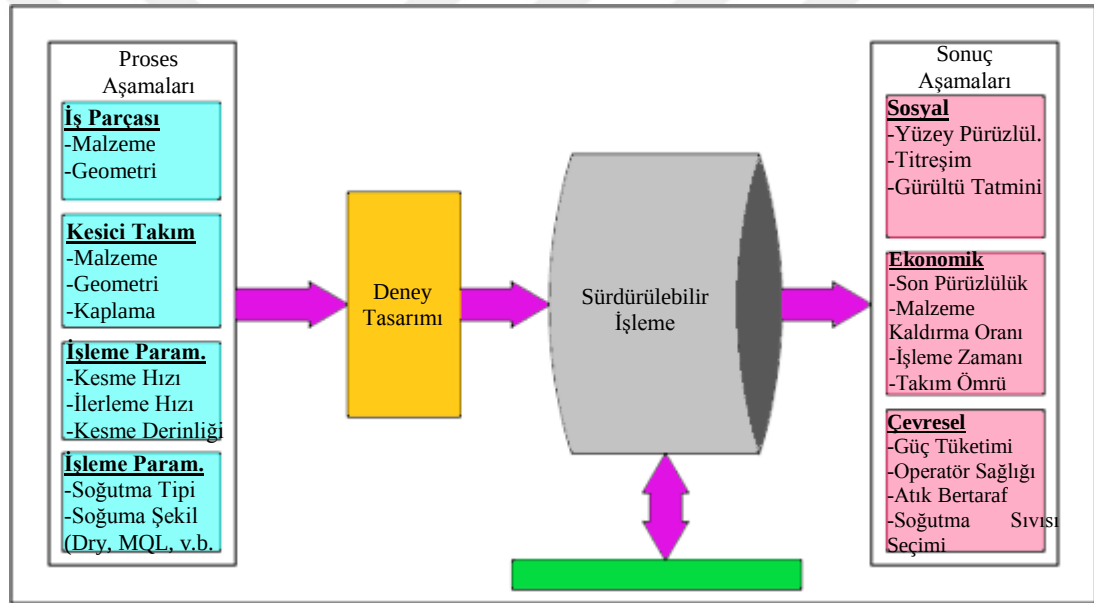
3.2. YEŞİL ÜRETİM İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMI

Günümüz dünyasında enerji talebinin katlanarak artması, fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi, elektrik fiyatlarının artması ve katı çevre normlarındaki hızlı değişim, araştırmacıları önemli bir konuya, yani sürdürülebilirliğe yöneltti. İmalat sektörü için enerji verimliliğinin iyileştirilmesine odaklanmak önemli bir konu haline geliyor. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak amacıyla yaygın olarak uygulanıyor olsa da toplam elektrik üretiminin yalnızca %11'ini oluşturuyor [35].

21. yüzyılda imalat sanayinde sürdürülebilirlik ve yeşil üretim konularının araştırılması gerekiyor. İş dünyasında sürdürülebilirlik, ürün veya üretim sürecinin çevre ve toplum üzerindeki etkisinin dengelenmesini içerir. Üretim sırasında

güvenlik, enerji kullanımının en aza indirilmesi ve karbondioksit emisyonlarının azaltılması çevre aktivizminin ön saflarında yer alıyor. Sonuç olarak, imalat sektöründeki işlemlerde

enerji verimliliği bakımından kritik bir gereksinimle karşı karşıyadır. İmalat sektöründe sürdürülebilirliğin üç temel ayağını ekonomi, çevre ve toplum birlikte oluşturmaktadır. Sürdürülebilirliğin üç temel ayağı güç, ekonomi, kaynakların korunması, atıkların en aza indirilmesi ve işlenmesi, insan sağlığına etkileri, proses tehlike kontrolü ve çevresel uyumluluk ile desteklenmektedir. Şekil 3.1’de sürdürülebilirliğin temellerini ve bunlara katkıda bulunan faktörleri içeren sürdürülebilir bir işleme modeli verilmiştir.



Şekil 3.1 Sürdürülebilir işleme aşamaları.

Sürdürülebilir üretim, Şekil 3.1’de verilen üretim aşamasında bu önemli faktörlere odaklanan süreçleri ve/veya teknolojiyi ifade eder. Akıllı malzemelerin, geliştirilmiş kompozit malzemelerin ve kaplamaların kullanımı da dahil olmak üzere birçok farklı sürdürülebilir üretim yöntemi vardır. Kompozit yöntemler, 3 boyutlu baskı yöntemleri, ekolojik açıdan sorumlu işleme, yalın üretim standartları, makineleşme, iş kaynak planlaması ve yaşam döngüsü değerlendirme sistemleri gibi ileri üretim süreçlerinin kullanılması ve yeniden kullanma ve geri dönüştürme. Bu stratejiler ve teknikler çeşitli bağlamlarda bulunabilir. Bu yaklaşımlar, sürdürülebilirliğin üç aşamayı iyileştirmeyi amaçlayan ana itici güçlerin gerçekleştirilebileceği temel

yollardır [36]. Ayrıca işleme girdileri, kesici uç geometrisi, kaplama bileşimi, iş parçası malzemesi, ürün şekli ve ilgili soğutma ile kullanılan yağlama tekniklerinin tümü, işleme operasyonlarının ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Aşağıdakiler, işleme süreci boyunca sürdürülebilirliğin iyileştirilmesine yol açabilecek bazı uygulanabilir yöntemler verilmiştir [37]:

- Enerji kullanımını azaltmak ve maliyet etkinliğini korumak için en uygun işleme ayarlarının seçilmesi.
- İşlemin etkinliğini korurken takım ömrünü artırmak ve yüzey kalitesini iyileştirmek için doğru kesici uç malzemelerini, geometrilerini ve kaplamalarını belirlemek.
- Sıvı maliyetlerini ve atıldığında veya geri dönüştürüldüğünde ekolojik etkiyi azaltmak için minimum miktarda yağlama (MQL) ve kriyojenik soğutma gibi gelişmiş yağlama/soğutma yöntemlerinin kullanılması.
- Üretim zincirini kısaltmak için ek son işlem operasyonlarına olan gereksinimi ortadan kaldırmak amacıyla hibrit üretim tekniklerinin kullanılması.

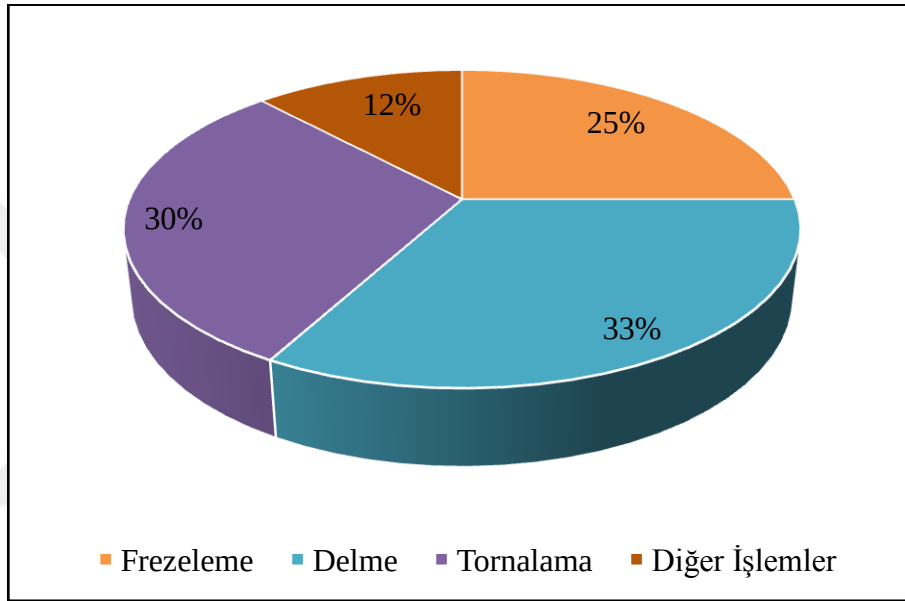
Talaşlı imalat MQL ortamının kullanılmasına ek olarak nanoakışkanlar, kesme bölgesinden ısıyı uzaklaştırılmasında daha etkili olmakta ve işlemede sürdürülebilirliğin sağlanmasına yardımcı olmaktadır [37].

3.3. FREZELEME

Geleneksel talaşlı imalat operasyonlarından biri olan frezeleme, kesici takımın dönerek doğrusal ilerleyen iş parçası üzerinden talaş kaldırması olarak tanımlanmaktadır. Freze tezgâhı adını kullanan kesici takımlardan almaktadır. Bu işlem çevresinde bir ve daha fazla kesici ağzın bulunduğu takımlarla gerçekleştirilir. Frezeleme operasyonları genellikle düz yüzeyli geometriye sahip şekillerin oluşturulmasında kullanılır. Ayrıca takım yolu ve takımın şekil ile istenen geometrilerde oluşturulur. Kullanılan kesici takımların her bir ağzın belirli bir kesme kapasitesi vardır. İşlenen ürünün pürüzlülük kalitesi yüksek olması, istenen doğrulukta ve istenen geometrinin oluşturulması esnasında imalat esnekliği bu operasyonun en büyük avantajlardan birisidir. Frezeleme operasyonu, genellikle

yüzeyi düz olan parçalar, köşesi dik olan parçalar ve dizayna bağlı kanal açma işlemlerinde çoğunlukla kalıpcılık sektöründe kullanılan bir işleme yöntemidir [38-40].

Talaşlı imalat operasyonları arasında frezeleme işleminin diğerlerine göre kullanım yoğunluğuna bakıldığında, %25 gibi yüksek bir tatbik edilme sıklığı olduğu Şekil 3.2’de gösterilmiştir [41].

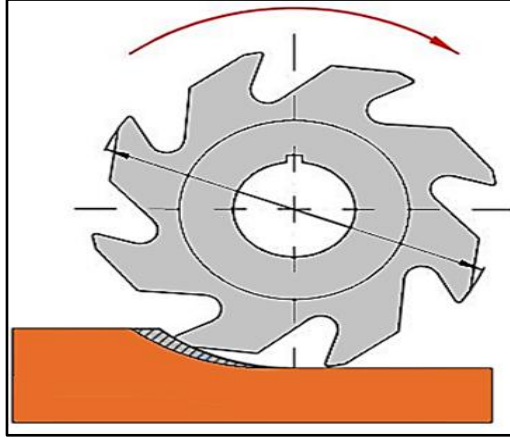


Şekil 3.2. Talaş kaldırma işlemlerinin kullanım sıklığı.

3.4. TALAŞLI İMALAT OPERASYONLARINDAKİ PARAMETRELER VE FORMÜLLER

3.4.1. Kesme Hızı (V_c)

İşleme sırasında iş parçası üzerinde kesicinin dakikada metre cinsinden aldığı mesafe olarak tanımlanmaktadır. Bu parametrenin değerleri, takım malzemesine, iş parçasına, operasyon yönüne, takım tezgâhının durumuna ve iş parçasının rijitliğine göre belirlenir. Bir operasyondaki talaş kaldırma işlemi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Frezelemede talaş kaldırma işlemi.

Kesme hızı aşağıdaki formüllerle tanımlanır.

$$V_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \quad (3.1)$$

V_c : Kesme hızı (m/dak)

n : Devir sayısı (dev/dak)

d : Kesici takımın çapı (mm)

3.4.2. İlerleme Miktarı (f)

Frezeleme operasyonlarında takımın tam bir turunda milimetre cinsinden aldığı yol olarak ifade edilmektedir. Kesme hızı aşağıdaki formüllerle tanımlanır.

$$f_z = \frac{V_f}{n \times Z} \quad (3.2)$$

$$V_f = f_z \times n \times Z \quad (3.3)$$

Z : Kesici takımdaki kesici diş sayısı (adet)

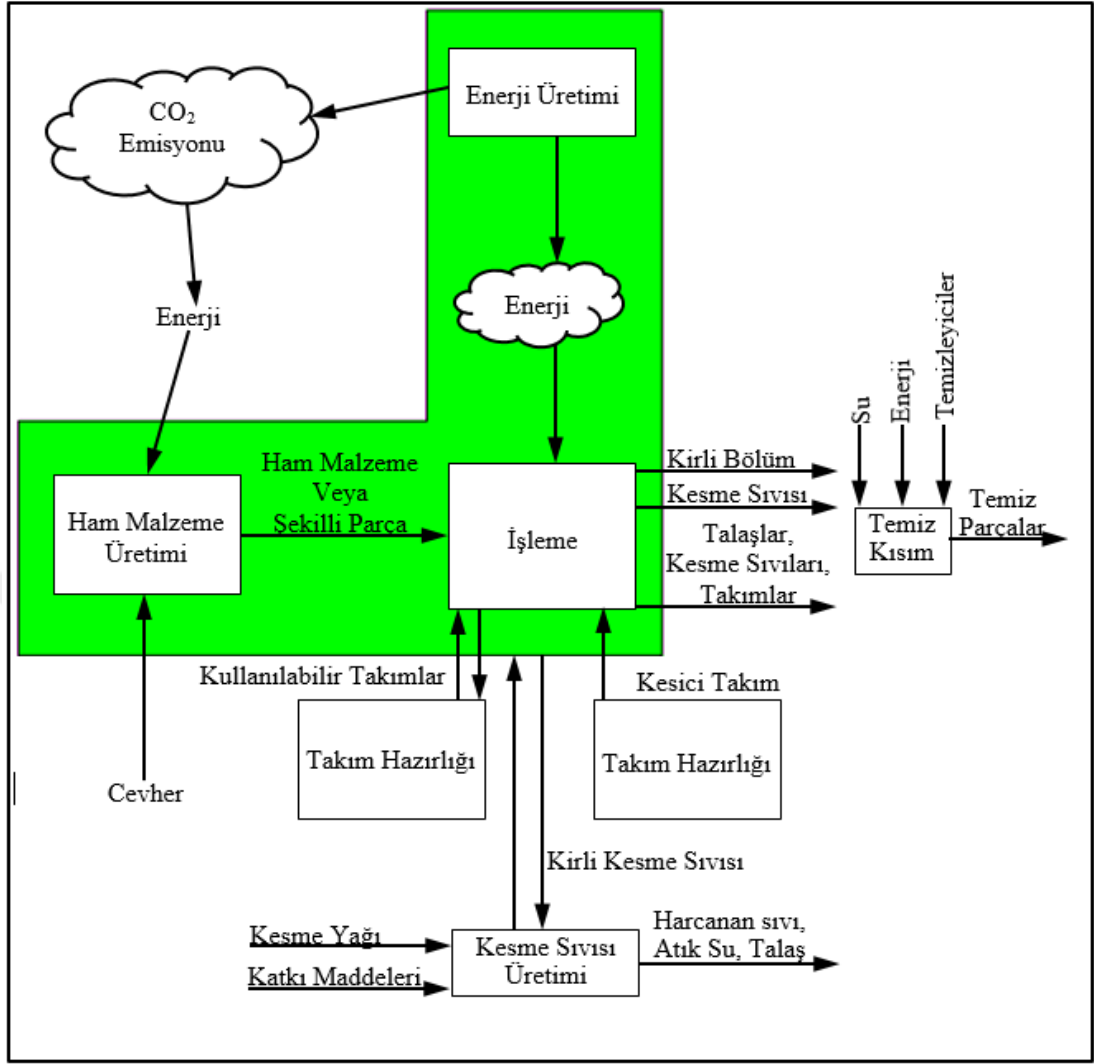
V_f : Tabla ilerlemesi (mm/dak)

fz: Diş başına ilerleme (mm/dev)

3.5. GÜÇ TÜKETİMİ

İmalat sektöründe mekanik işlemenin çoğu yaygın olarak kullanılmaktadır. Buda büyük bir enerji talebini temsil etmektedir [42], Şekil 3.4’de gösterildiği gibi, işleme sürecinin çevresel analizi için malzemelerin akış şemasını gösterilmiştir. Yeşille gösterilen bölge araştırma alanını gösterir. Enerji bütçesine ve CO₂ emisyonlarına ana katkı, işleme sürecinde kullanılan enerji ve iş parçası malzemelerinde yer alan enerjidir. İşleme süreci için gerekli olan enerji elektrik şebekesinden alınır. Farklı elektrik santrali kaynaklarından enerji (elektrik) üretilirken, işlemler nedeniyle CO₂ salındı.

Hammadde üretimi aynı zamanda üretilen ürün için toplam enerji tüketimine katkıda bulunur. Farklı türdeki hammaddelerin (çoğunlukla metaller) cevherden farklı ekstraksiyon ve saflaştırma teknikleri vardır ve dolayısıyla bu, malzemenin karbon ayak



Şekil 3.4. Gutowski'den uyarlanan üretimde enerji.

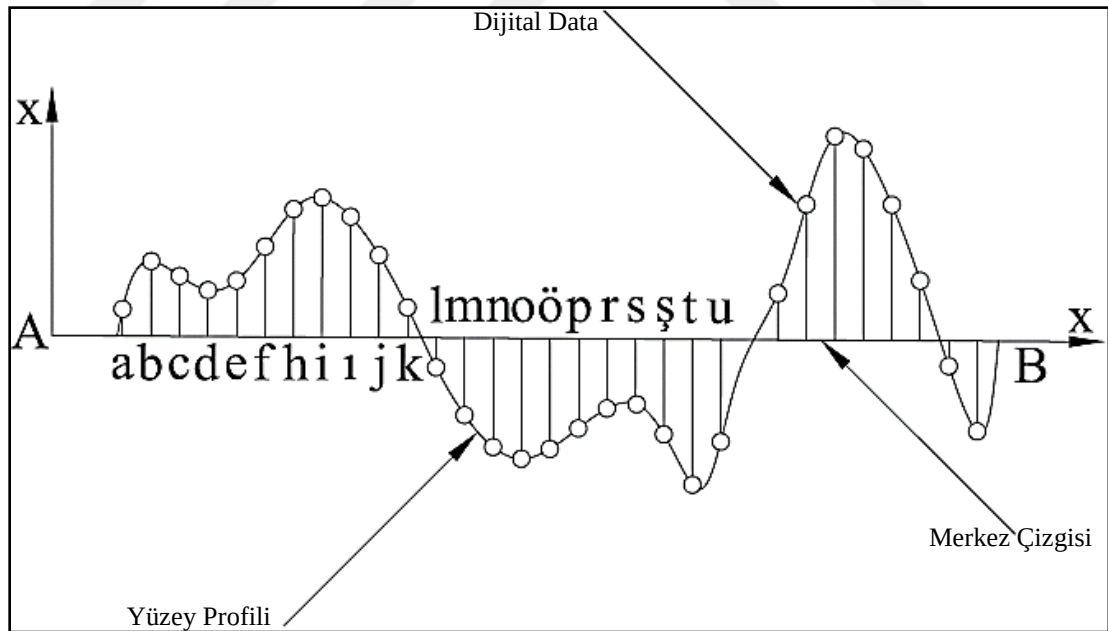
ayak izini etkiler. İmalat sektöründeki firmalar, işleme sırasında enerji tüketimini etkileyebilir ancak malzeme çıkarma konusunda bir seçeneğe sahip değildirler. Yine de ham maddeyi üretmek için ne kadar enerjiye ihtiyaç duyulduğuna ilişkin bilgi, imalatçı firmanın işlenmiş ürünün karbon ayak izini hesaplamasında faydalıdır. Karbon ayak izi, işleme prosesiyle ilişkili ayak izini ve prosesin girdilerinde yer alan dolaylı ayak izini içerir.

3.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

İşlenen parçalarda yüzey pürüzlülüğü, ürünün yüzey kalitesinin bir ölçütü ve ürün kalitesinin bir göstergesidir [43]. Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzeylerdeki küçük

Ra veya daha önce AO (Aritmetik Ortalama) veya MÇO (Merkez-Çizgi Ortalaması) olarak bilinen aritmetik ortalama değeri, bir dizi noktanın merkez çizgisinden veya referans çizgisinden sapmalarının aritmetik ortalamasıdır. Merkez çizgisi, merkezin üstündeki profilin altındaki alanların toplamı merkezin altındaki alanların toplamına eşit olacak şekildedir. Genel olarak yüzey pürüzlülüğü mikron (μm) cinsinden ifade edilir.

(3.4)



Şekil 3.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için kullanılan koordinatlar.

14

üzerindeki profilin altında kalan alanların toplamına eşittir. Buda bize yüzey pürüzlülüğünün çoğunlukla baskın faktör olan ilerleme hızına bağlı olduğunu göstermiştir [45]. Yüzey pürüzlülüğü genellikle Profilometre adı verilen cihazlar kullanılarak doğrudan ölçülür. Genel olarak yüzey pürüzlülüğü mikron (μm) cinsinden ifade edilir.

3.5. KESME SICAKLIĞI

Metalin kesilmesi sırasında kesici takım ile iş parçasının etkileşim alanının sıcaklığı yükselir. Sıcaklık sadece kesici takımın aşınma oranını değil aynı zamanda artık gerilim, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü gibi iş parçası yüzeyinin bütünlüğünü de etkiler. Kesme sıcaklığı, kesme işleminin mekanizmasını araştırmak için çok önemli faktörlerden biridir[46].

3.5.1. Kesme Sıcaklığının İşleme Üzerine Etkisi

Kesme bölgesinin dar ve kesme sıcaklığının geniş bir alanında meydana gelmesi, takımın aşınma oranıyla, iş parçası malzemesinin işlenebilirlik oranıyla, takımın stabilitesiyle ve işleme prosesinin diğer birçok özelliğiyle doğrudan ilişkilidir. Kesme kuvvetlerinin neredeyse tüm işi termal enerjiye dönüştürülür. Üretilen ısı kesme bölgesinden talaşlara, takıma, iş parçasına ve çevreye gider [46].

Takım aşınması üzerindeki etkisinin yanı sıra, kesme işleminde oluşan bu ısının aşağıdakiler üzerinde de etkisi vardır:

- İşleme sürecinin üretkenliği.
- İşlenmiş yüzey kalitesi.
- İşleme doğruluğu.
- Oksidasyon nedeniyle yüzey hasarı, hızlı korozyon.

Bu nedenle, takım ve iş parçası arasındaki kesme sıcaklığının seviyeleri ve dağılımlarının ölçümü ve bilgisi uygulama açısından büyük önem taşımaktadır [46]. Bu bilgiye dayanarak aşağıdakileri belirleyebiliriz:

- Optimum koşullar.
- Çalışma rejimleri.
- Kalite, üretkenlik ve süreç ekonomisi.
- Takım stabilitesi.

3.6. TAKIM AŞINMASI

Metal kesme veya geleneksel işleme işlemleri aynı zamanda geleneksel işleme işlemleri olarak da bilinir. Bu işlemler genellikle makine atölyelerinde veya takım odasında, silindirik veya düz bir işin, kama şekilli bir alet yardımıyla kaba bir iş malzemesi bloğu üzerinde istenilen şekil, boyut ve finiş işlenmesi için gerçekleştirilir. Kesici takım, talaş şeklinde bir metal tabakasının çıkarılmasını sağlayacak şekilde işe göre hareket edecek şekilde sınırlandırılmıştır. Bu işleme işlemleri, daha yaygın olarak takım tezgâhları olarak adlandırılan metal kesme makinelerinde, çeşitli tiplerde kesici takımlar (tek veya çok noktalı) kullanılarak gerçekleştirilir [47]. Bundan, kesici takımın giderek kullanıldıkça malzemesinin bir kısmını da kaybetmesinin kaçınılmaz olduğu sonucuna varabiliriz. Buna takım aşınması denir.

Takım aşınması, kesici takımların düzenli çalışması nedeniyle kademeli olarak bozulmasıdır. Etkilenen aletler arasında takım tezgâhlarında kullanılan uçlu takımlar, takım uçları ve matkap uçları bulunmaktadır. Takım aşınması aşağıdaki istenmeyen etkileri beraberinde getirir:

- Artan kesme kuvvetleri
- Artan kesme sıcaklıkları
- Kötü yüzey kalitesi
- Bitmiş parçanın doğruluğunda azalma
- Aletin kırılmasına yol açabilir
- Takım geometrisinde değişikliğe neden olur

Takım aşınmasının azaltılması, işleme sırasında yağlayıcılar ve soğutucular kullanılarak sağlanabilir. Bunlar sürtünmeyi ve sıcaklığı azaltır, böylece takım aşınmasını azaltır. Bununla birlikte, takım aşınmasının tamamen ortadan kaldırılması değil, yalnızca azaltmanın mümkün olması nedeniyle, işlemenin gerçekleşme şeklini ve dolayısıyla nihai ürünün kalitesini doğrudan etkilediği için takımı değiştirmemiz gereken bir zaman gelecektir. Kesici takımın değiştirilmesiyle ilgili olarak, zaman, maliyet ve kalite açısından maksimum faydayı elde etmek için kesici takımın ne zaman değiştirmemiz gerektiğine dair zamanı tahmin üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir.

3.7. TİTREŞİM

Takım tezgâhları bilinen bir şekilde üç tür titreşime maruz kalır: serbest, zorlanmış ve kendiliğinden uyarılan. Serbest titreşimler, kararlı sistem dürtü benzeri bir uyarımla dengesinden çıkarıldığında meydana gelir; sistem titreşir ve sonunda yapısal özelliklerine göre başlangıç pozisyonuna döner. Zorlanmış titreşimler, kararlı bir sisteme uygulanan dinamik kuvvetler nedeniyle meydana gelen titreşimlerdir. Genellikle bu tür kuvvetleri oluşturabilecek dört tür kaynak vardır:

- İş parçası malzemesindeki homojensizlikler, talaş yığılmasının kırılması veya talaş kesitindeki değişiklikler nedeniyle oluşanlar.
- Frezeleme gibi kesintili kesme işlemleri.
- Dönen ünitelerdeki dengesizlikler gibi iç kaynaklar.
- Takım tezgâhının temelinden iletilen dış parazitler.

Kendiliğinden uyarılan titreşim veya tırlama karmaşık bir olgudur ve takım tezgâhı yapısı kararsız bir duruma girdiğinde genellikle en az arzu edilen titreşim türüdür. Titreşim bir bütün olarak takım tezgâhının tasarımına, iş parçası malzemesine ve geometrisine ve işleme rejimlerine bağlıdır; bunun oluşması takım tezgâhının yapısındaki yetersiz sönümlemekten kaynaklanmaktadır [48]. Talaşlı imalat işlemlerindeki titreşimi ve özellikle tırlama olgusu, geçtiğimiz yüzyılda ve içinde bulunduğumuz yüzyılda pek çok araştırmacı tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmektedir.



BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME

Yapılan çalışmada iş parçası malzemesi olarak denizcilik, enerji santralleri, savunma ve havacılık endüstrileri gibi mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilen Inconel 718 kullanılmıştır. İş parçası Birçelik Paslanmaz Çelik Tic. A.Ş'den 150x30x30 mm ebatlarında temin edilmiştir. Inconel 718 alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Inconel 718 alaşımının kimyasal kompozisyonu.

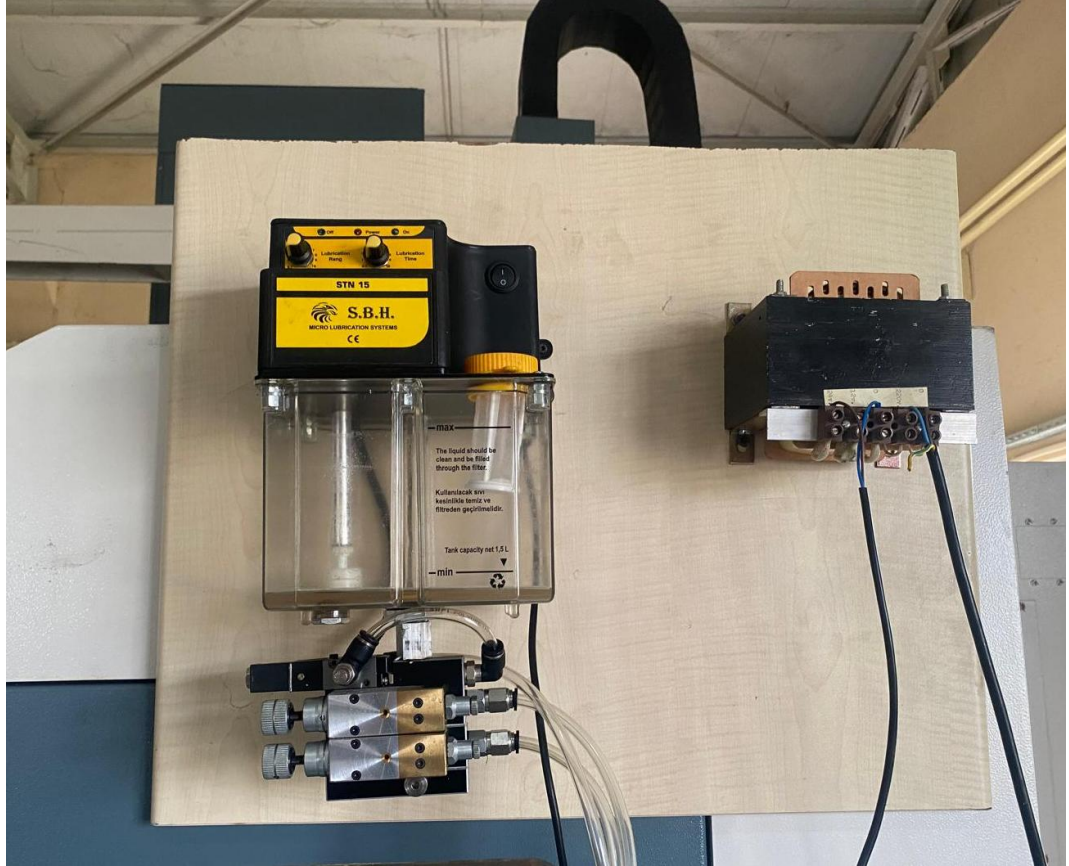
Elementler										
Ni	Co	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	B	C	Mn	Si
52,5	0,19	17,3	5,15	2,95	0,97	0,6	0,01	0,08	0,35	0,35

4.2. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA SİSTEMİ

Deneyler kuru, hava ve MQL işleme ortamlarında gerçekleştirildi. Kuru işleme ortamında yapılan işlemlerde herhangi bir kesme sıvısı veya soğutma sistemi kullanılmadan gerçekleştirildi. Hava ile soğutma işleminde CNC tezgâhının 6 bar basınca sahip hava soğutma sistemi kullanılmıştır. MQL soğutma/yağlama işleminde Şekil 4.1'de verilen Werte Mist firmasının ürettiği Werte StN 15 MQL sistemi kullanıldı. Sistemin teknik özellikleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Ayrıca sistemde Mackerel Ms MQL yağı kullanılmıştır. Üst düzey yağlama kabiliyetine haiz, itina ile seçilmiş paslanmayı gidermek ve verim artırıcı özelliği nedeniyle kuvvetlendirilmiş bio stabil yarı sentetik metal işleme sıvısıdır. Bio stabil mamul olmasından dolayı mikrobik canlıların artmasına olanak sağlamaz. Çok daha uzun süre ekipmanların korumasını sağlar. Çelik, paslanmaz metaller ve alüminyum alaşımlar işlenmesinde

yağlama özelliğinin iyi olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Mackerel Ms sıvı asıltı

yayılımına karşı iyi istikrar ile mukavemet, paslanmayı ve korozyona karşı muhafaza, bakteriyel ve mantarsı oluşumuna karşı iyi koruma, üst düzey soğutma özelliği, metale karşı üst düzey tutunma gücü, sürtünme ve aşınmayı azaltan yüksek yağlayıcılık özelliğine sahip olması gibi özelliklerinden dolayı endüstride çok yönlü kullanım alanına sahiptir. Mackerel Ms MQL yağının teknik özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Werte StN 15 minimum miktarda yağlama sistemi.

Çizelge 4.2. Werte StN 15 teknik özellikleri.

Özellik	Birim	Açıklama
Model	-	Werte StN 15
Kapasite	lt	1,5

Hava Basıncı	Bar	4/6
Çalışma Voltajı	V (AC/DC)	24
Yağ Miktarı Min	ml	0,0012
Yağ Miktarı Max	ml	0,028
Yağlama Aralığı	sn	0,1/10
Yağlama Süresi	sn	0,1/10

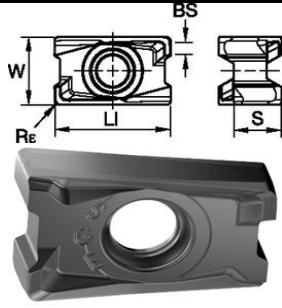
Çizelge 4.3. Mackerel Ms MQL yağının teknik özellikleri.

Özellik	Birim	Test Metodu	Açıklama
Görünüş	-	-	Berrak-kızıl kahve
Koku	-	-	Tipik
Yoğunluk	15 °C, kg/m ³	ASTM D 4052	1,070
Akma noktası	°C, max	ASTM D 97	-22
Kırılma İndisi	n20/D	ASTM D 1218	1,4222
Emülsiyon	5% deminarelize su	-	Geçer
pH		-	9,5
Emülsiyon Kararlılığı	24 saat	-	

4.3. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCU

Frezeleme deneylerinde, Kennametal tarafından üretilen LNGU15T608SRGE ISO kodlu CVD TiN/TiCN/Al₂O₃ kaplı karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kullanılan kesici takıma ait görsel görüntüler ve teknik bilgiler Çizelge 4.4’de verilmiştir. Deneylerde kesici takımın CNC tezgâhına bağlanmasında M4D025Z02B25LN15 (Kennametal) tutucu kullanılmıştır. Çizelge 4.5’de takım tutucuya ait teknik bilgiler sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Deneylerde kullanılan kesici takımın teknik özellikleri.

	Özellik	Açıklama
	Malzeme sınıflandırması	P/M/K/S
	ISO Katalog Numarası	LNGU15T608SRGE
	Kalite	KCPK30
	Kaplama	CVD TiN/TiCN/Al ₂ O ₃
	W	10 mm
	Rε	0.8 mm
	LI	17,01 mm
	BS	1,8 mm
	S	6,96 mm

Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan takım tutucusunun teknik özellikleri.

	Özellik	Açıklama
	ISO Katalog Numarası	M4D025Z02B25LN15

D1	25
L	89
D	25
L2	32

4.4. DENEYLERDE KULLANILAN TAKIM TEZGÂHI

Deneyler, Aksaray Üniversitesi Aksaray Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü laboratuvarlarında bulunan Hannsa marka YH 1600-A CNC freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. YH 1600-A CNC freze tezgahının görseli Şekil 4.2’de ve teknik özellikleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.2. Hannsa YH 1600-A CNC freze tezgâhı.

Çizelge 4.6. YH 1600-A CNC tezgahının teknik özellikleri.

Özellik	Birim	Açıklama
Model		YH 1600-A

Çalışma Alanı	mm	1800 x 840
X Eksen Hareketi	mm	1800
Y Eksen Hareketi	mm	810
Z Eksen Hareketi	mm	810
Hızlı Hareket (X,Y,Z)	m/dak	15/15/12
İş Mili Devri	rpm	6000

4.5. KESME SICAKLIĞI ÖLÇÜMLERİ

İşleme deneyleri sırasında kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın kontrolü takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada, Inconel 718 alaşımının farklı soğutma/yağlama ortamında ve farklı kesme parametrelerinde karbür takımla işlenmesinde kesme bölgesindeki sıcaklığın ölçülmesinde FLIR İ60 marka kızılötesi kamera kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan kızılötesi kamera -20 ~ 350 °C aralığında sıcaklık ölçüm aralığındadır. Cihaz ölçümler sırasında kesme bölgesine 250 mm uzaklıkta ve 45° açıyla konumlandırılmıştır. Çalışmada kullanılan Fluke Ti9 marka kızılötesi kameranın görseli Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. FLIR İ60 kızılötesi termal kamera.

4.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMLERİ

Frezeme deneyleri için hazırlanan her bir deney kombinasyonunda işlenen yüzeylerin pürüzlülük ölçümlerinde Mitutoyo marka Surface SJ-210 model yüzey pürüzlük cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri ISO 4288 standardına uygun yapılmıştır. Ölçümler işleme yönüne dik olacak şekilde 4 farklı noktadan alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan Mitutoyo marka Surface SJ-210 model yüzey pürüzlük cihazının görseli Şekil 4.4’de ve teknik özellikleri Çizelge 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.4. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlük cihazı.

Çizelge 4.7. Mitutoyo Surface SJ-210 yüzey pürüzlük cihazının teknik özellikleri.

Özellik	Birim	Açıklama
Model		Mitutoyo Surface SJ-210
Ölçme aralığı	µm	360
Ölçüm hızı	mm/sn	0,25/0,5/0,75
Dedektör ölçüm kuvveti	mN	0,75
Kalem ucu açısı	°	60
Prob ucu yarıçapı	µm	2
Örnekleme uzunluğu	mm	0,08 / 0,25 / 0,8 / 2,5
Pürüzlülük standardı		EN ISO / VDA / JIS / ANSI
Ağırlık	gr	500

4.7. GÜÇ TÜKETİMİNİN ÖLÇÜMLERİ

Güç tüketimi Inconel 718 iş parçasının işlenebilirliğini tanımlayan ve kesme işleminin etkinliğini ölçen bir parametredir. Bu nedenle işleme deneyleri sırasında CNC tezgâhının güç tüketimi ölçümünde Lutron marka DW-6095-3 model faz güç analizörü kullanılmıştır. Ölçümler Lutron marka DW-6095-3 model faz güç analizörünün pensleri tezgahın üç fazına bağlanmıştır. Talaş kaldırma işleminin başlangıcından bitişine kadar cihazın kayıt ettiği verilerin ortalamaları alınarak ortalama güç tüketimi hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan Lutron marka DW-6095-3 model faz güç analizörü Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.5. Lutron marka DW-6095-3 faz güç analizörü.

4.8. TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİ

İşleme deneyleri sırasında iş parçasında meydana gelen titreşimler Modal Shop K333D01-VM model dijital titreşim ölçer seti ile gerçekleştirilmiştir. Verilerin sağlıklı alınabilmesi için cihaz iş parçası üzerine sabitlenmiştir. Deneylerde kullanılan Modal Shop K333D01-VM model dijital titreşim ölçer Şekil 4.7’de verilmiştir.

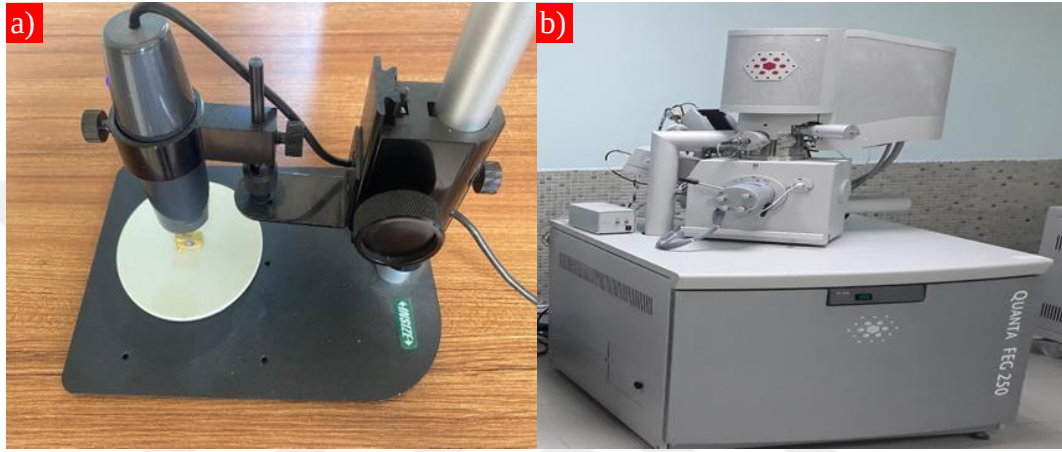


Şekil 4.6. Modal Shop K333D01-VM model dijital titreşim ölçer.

4.9. TAKIM AŞINMASININ ÖLÇÜMÜ VE İNCELENMESİ

Yapılan çalışmada, Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde soğutma/yağlama ortamının ve kesme parametrelerinin takım aşınmasına etkisini araştırmak için yanak aşınması (V_b) 0,3 mm alınmıştır. İşleme sonrası takım aşınması ölçümleri Aksaray Üniversitesi Aksaray Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü laboratuvarlarında bulunan Insize marka ISM-PM200SA

model dijital mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Dijital mikroskob 10x-200x büyütme ve 1600 x 1200 çözünürlüğe sahiptir. Ayrıca takım aşınma mekanizmalarını ayrıntı görüntülenmesin ve incelenmesinde Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Takım aşınma ölçülmesinde kullanılan dijital ve SEM mikroskoplarının görseli Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Takım aşınma ölçülmesinde kullanılan a) dijital ve b) SEM mikroskopları.

4.10. KESME PARAMETRELERİNİN HAZIRLANMASI

Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde enerji tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme sıcaklığı ve titreşim gibi çıktı parametreleri için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi için çalışmada kullanılacak deney tasarımı Taguchi L27 dizinine göre hazırlanmıştır. Her bir deney kombinasyonunda kesme derinliği 1 mm sabit tutulmuştur. Deneylerde kullanılacak olan kesme hızları ve ilerleme miktarları kesici takım üretici firma tavsiyelerine ve literatür taramasına göre seçilmiştir. Çalışmada kullanılacak Taguchi L₂₇ dizinine göre belirlenmiş işleme parametreleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Taguchi L₂₇ işleme parametreleri ve seviyeleri.

Semboller	Kesme Parametreleri	Birimler	Seviyeler		
			1	2	3
A	Yağlama/Soğutma Ortamı		Kuru	Hava	MQL
B	Kesme Hızı (Vc)	(m/dak)	40	60	80
C	İlerleme Miktarı (f)	(mm/dev)	0,06	0,09	0,12

Ayrıca takım aşınması deneyleri kesme derinliği (1 mm) ve ilerleme miktarını (0,12 mm/dev) sabit tutarak üç farklı yağlama/soğutma ortamında ve üç farklı kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Takım aşınması deneylerinde kullanılacak olan Taguchi L9 dizinine göre hazırlanmış işleme parametreleri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Takım aşınması için Taguchi L₉ işleme parametreleri ve seviyeleri.

Semboller	Kesme Parametreleri	Birimler	Seviyeler		
			1	2	3
A	Yağlama/Soğutma Ortamı		Kuru	Hava	MQL
B	Kesme Hızı (Vc)	(m/dak)	40	60	80
C	İlerleme Miktarı (f)	(mm/dev)	0,12		

4.11. MAKİNE ÖĞRENİM UYGULAMALARI

Yapılan çalışmada, makine öğrenmenin farklı algoritmaları ile kesme parametrelerine bağlı çıktı parametrelerinin tahmininde üç farklı makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. Kullanılan 3 farklı makine öğrenme algoritması aşağıda anlatılmıştır.

4.11.1. Lineer Regresyon

Lineer regresyon, bir problemin tahmine dayalı çözümünde kullanılan en basit makine öğrenme algoritmalarından birisidir. Bu algortmada bir bağımlı değişkenle bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki lineer bağlantıyı göstermektedir. Bu nedenle Lineer Regresyon olarak adlandırılmıştır. Lineer Regresyon denklemi Eşitlik 4.1’de verilmiştir.

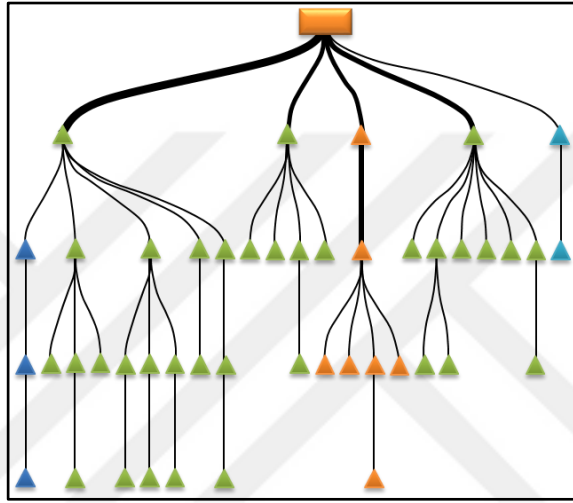
$$Y = a_0 + a_1X + \varepsilon$$

(4.1)

Eşitlik 4.1’de verilen Y bağımlı değişkeni, X bağımsız değişkeni, a_0 doğrunun kesişimi, a_1 doğrusal regresyon katsayısını ve ε rastgele hatayı ifade etmektedir.

4.11.2. Karar Ağacı Sınıflandırıcısı

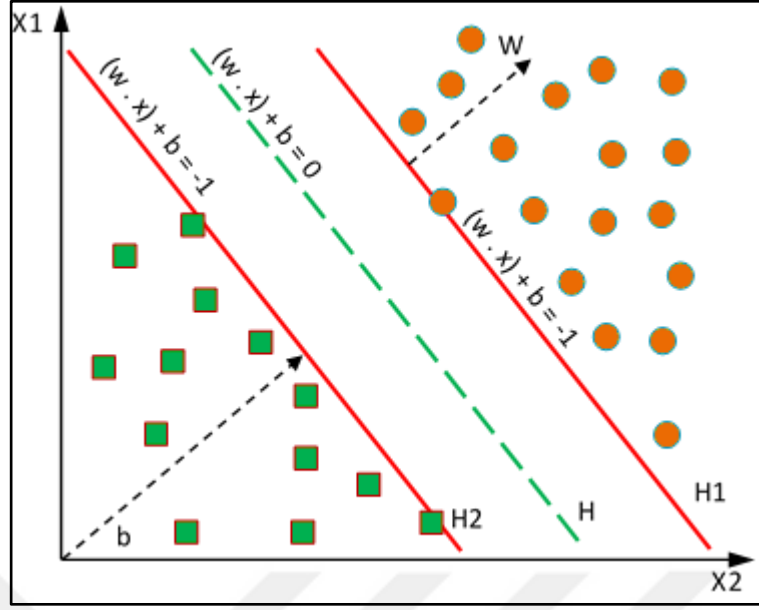
Denetimli öğrenme algoritmaları arasında en çok kullanılanlardan birisi ağaç tabanlı öğrenme algoritmalarıdır. Genel olarak ele alınan tüm problemlerin çözümünde kullanılabilir. Karar ağacı, çok sayıda kayıt içeren bir veri topluluğunu, bir dizi karar kuralı uygulayarak daha küçük kümelerle bölmek için kullanılan bir sınıflandırıcıdır. Yani basit karar verme adımları uygulanarak, büyük miktarlardaki verileri çok küçük veri gruplarına bölerek kullanılan bir yapıdır. Karar ağacının genel yapısı Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8. Karar ağacının genel yapısı.

4.11.3. Destek Vektör Makinesi

Makine öğrenme modelleri arasında yer alan destek vektör makine modeli Vapnik tarafından önerilmiştir [49]. Destek vektör makinesi ayrık değerlerin tahmini için kullanılır ve bir tür denetimli öğrenme algoritmasıdır. Destek vektör regresyonu, destek vektör makinesinin alanı altında yer alan bir tekniktir. Bu tekniğin temel amacı, Şekil 4.10'ta gösterildiği gibi maksimum sayıda noktaya sahip bir hiperdüzleme en uygun çizgiyi elde etmektir. Hiperdüzlemi çerçevelemek için destek vektör makinesinin uç noktaları seçilir ve bu uç noktalar destek vektörleri olarak adlandırılır, bu da tekniğin terminolojisini doğrular. Destek vektör regresyonu, sınır çizgisi ile hiperdüzlem arasındaki mesafe eşik değeri aralığına en iyi çizgiyi sığdırmayı amaçlar.



Şekil 4.9. Destek vektör makinesinin grafiksel gösterimi.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. GÜÇ TÜKETİMİ

Yapılan çalışmada, Inconel 718 alaşımının farklı soğutma/yağlama ortamlarında ve farklı kesme parametrelerinde işlenmesinin bir sonucu olarak güç tüketimindeki farklılıklar Şekil 5.1’de verilmiştir. Ayrıca 27 deney kombinasyonu sonucu ölçülen güç tüketimi değerleri Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

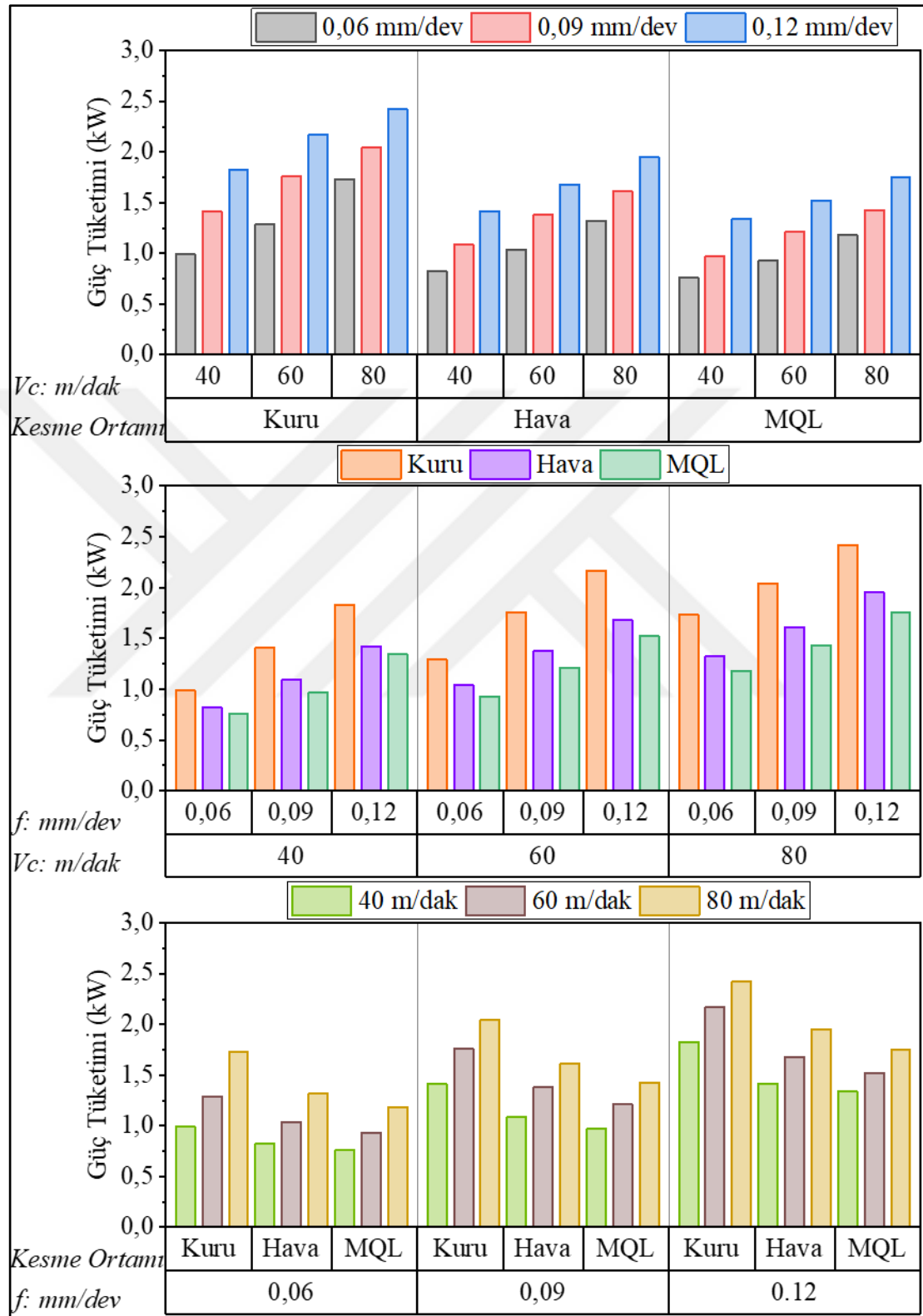
Çizelge 5.1. Güç tüketimi için deney sonuçları

Deney No	Soğutma/Yağlama Yöntemi	Kesme Hızı, Vc (m/dak)	İlerleme Miktarı, f (mm/dev)	Güç Tüketimi, P (kW)
1	Kuru	40	0,06	0,99
2	Kuru	40	0,09	1,41
3	Kuru	40	0,12	1,83
4	Kuru	60	0,06	1,29
5	Kuru	60	0,09	1,76
6	Kuru	60	0,12	2,17
7	Kuru	80	0,06	1,73
8	Kuru	80	0,09	2,04
9	Kuru	80	0,12	2,42
10	Hava	40	0,06	0,82
11	Hava	40	0,09	1,09
12	Hava	40	0,12	1,42
13	Hava	60	0,06	1,04
14	Hava	60	0,09	1,38
15	Hava	60	0,12	1,68
16	Hava	80	0,06	1,32
17	Hava	80	0,09	1,61
18	Hava	80	0,12	1,95
19	MQL	40	0,06	0,76
20	MQL	40	0,09	0,97
21	MQL	40	0,12	1,34
22	MQL	60	0,06	0,93
23	MQL	60	0,09	1,21
24	MQL	60	0,12	1,52
25	MQL	80	0,06	1,18
26	MQL	80	0,09	1,43
27	MQL	80	0,12	1,75

Yapılan çalışmada tüm yağlama/soğutma ortamında ve tüm kesme parametrelerinde güç tüketimi 0,76 kW ile 2,42 kW arasında değişim göstermiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde kuru kesme şartlarında 40 m/dak V_c 'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'lerde güç tüketimi sırası ile 0,99 kW, 1,41 kW ve 1,83 kW ölçülmüştür. V_c 'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'lerde güç tüketimi sırası ile %74,75, %44,7 ve %32,25 oranlarında arttığı görülmüştür. Hava soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak V_c 'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'lerde güç tüketimi sırası ile 0,82 kW, 1,09 kW ve 1,42 kW ölçülmüştür. V_c 'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'lerde güç tüketimi sırası ile %61, %47,7 ve %37,3 oranlarında artma olmuştur. MQL soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak V_c 'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'lerde güç tüketimi sırası ile 0,76 kW, 0,97 kW ve 1,34 kW ölçülmüştür. V_c 'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'lerde güç tüketimi sırası ile %55,3 %47,4 ve %30,6 oranlarında arttığı görülmüştür. Genel olarak Şekil 5.1 incelendiğinde V_c 'nin ve f 'in artması ile güç tüketiminin arttığı görülmüştür. V_c 'nin artırılması iş milini daha fazla dönmesine bununda daha fazla güç tüketimine neden olacağı bildirilmiştir [50-52]. f 'in güç tüketimine etkisi incelendiğinde f 'in artmasıyla birlikte güç tüketiminin de arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, f 'in artırılması eksen motorlarının daha hızlı hareket etmesine ve buna bağlı güç tüketiminin artmasına neden olacağı rapor edilmiştir. Ayrıca f 'in artışı ile talaş kesitinin ve kesme kuvvetinin artması güç tüketimindeki artışın diğer bir nedeni olarak ifade edilmiştir [53,54].

Şekil 5.1 bakıldığında kuru, hava ve MQL işleme şartlarında ortalama güç tüketimi sırası ile 1.74 kW, 1.37 kW ve 1.23 kW olarak hesaplanmıştır. Buna göre en yüksek güç tüketimi kuru kesme şartlarında ölçülürken, en düşük güç tüketiminin MQL işleme koşullarında ölçüldüğü görülmüştür. MQL işleme şartında daha az güç tüketimi, kullanılan yağlamanın kesici takım iş parçası arası sürtünmeyi yani teması azaltması işleme sırasında tüketilen gücünde azalmasına neden olacağı bildirilmiştir. Ayrıca MQL işleme koşulunda takım aşınmasının kuru işleme şartlarına göre daha az olacağından güç tüketimini de azaltacağı bildirilmiştir. Hava işleme şartında soğutmanın daha etkili olacağından işleme sırasında takımın kuru işleme şartlarına

göre takım aşınmasının daha az olacağından güç tüketiminin de azaldığı ifade edilmiştir [55-56].



Şekil 5.1. Inconel 718 alaşımının ferzelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı güç tüketimi değişimi.

5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Yüzey pürüzlülüğü, mühendislik uygulamalarında işlenmiş parçaların yüzey kalitesi, parçaların servis ömrü ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, Inconel 718 alaşımının farklı kesme parametrelerinde ve farklı soğutma/yağlama ortamlarında sunulan işleme deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 5.2’de sunulmuştur. Ayrıca deney sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları.

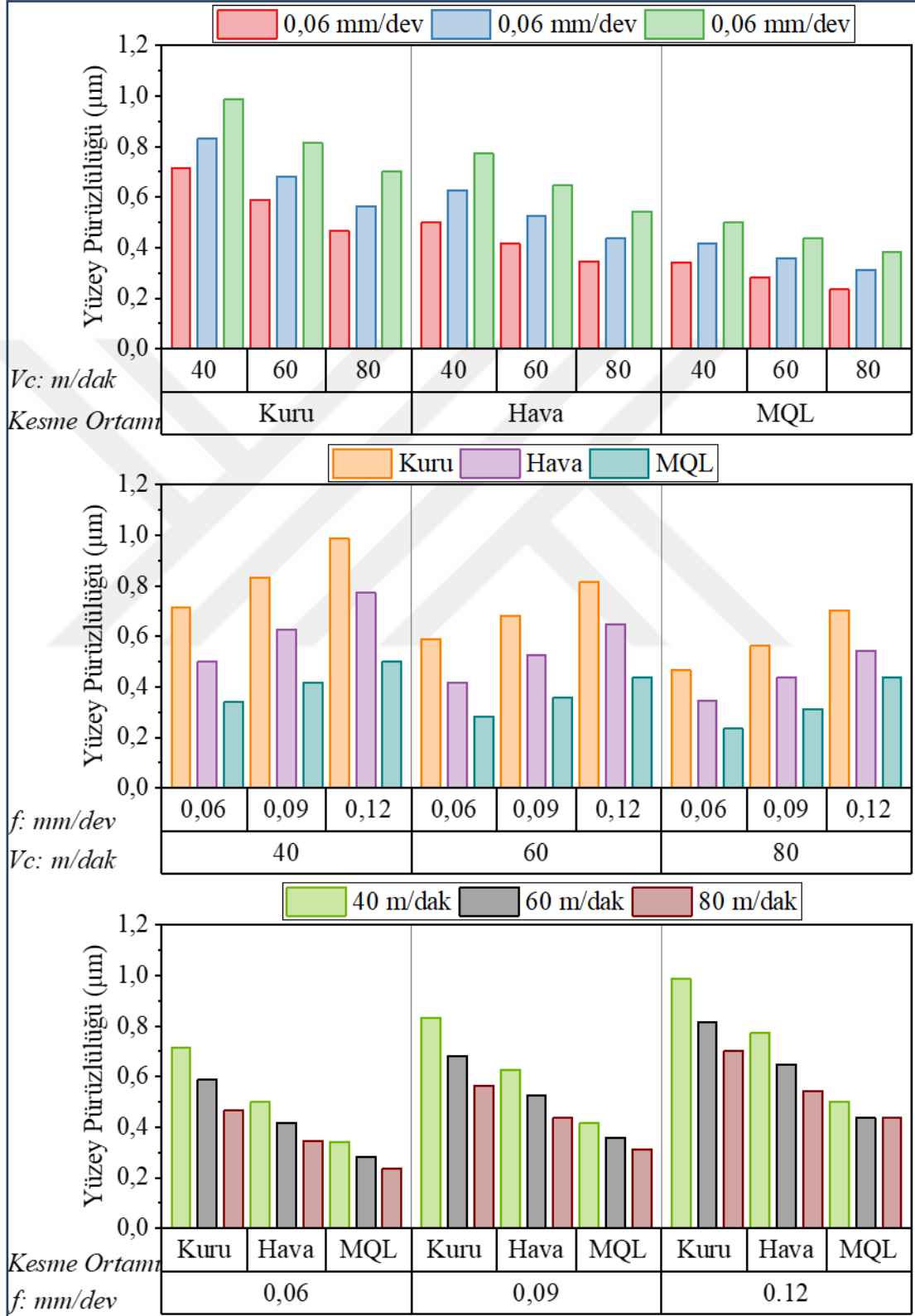
Deney No	Soğutma/Yağlama Yöntemi	Kesme Hızı, Vc (m/dak)	İlerleme Miktarı, f (mm/dev)	Yüzey Pürüzlülüğü, Ra (µm)
1	Kuru	40	0,06	0,714
2	Kuru	40	0,09	0,832
3	Kuru	40	0,12	0,987
4	Kuru	60	0,06	0,588
5	Kuru	60	0,09	0,682
6	Kuru	60	0,12	0,814
7	Kuru	80	0,06	0,466
8	Kuru	80	0,09	0,566
9	Kuru	80	0,12	0,701
10	Hava	40	0,06	0,499
11	Hava	40	0,09	0,628
12	Hava	40	0,12	0,772
13	Hava	60	0,06	0,416
14	Hava	60	0,09	0,527
15	Hava	60	0,12	0,647
16	Hava	80	0,06	0,347
17	Hava	80	0,09	0,436
18	Hava	80	0,12	0,544
19	MQL	40	0,06	0,342
20	MQL	40	0,09	0,417
21	MQL	40	0,12	0,501
22	MQL	60	0,06	0,283
23	MQL	60	0,09	0,357
24	MQL	60	0,12	0,436
25	MQL	80	0,06	0,234
26	MQL	80	0,09	0,311
27	MQL	80	0,12	0,384

Şekil 5.2 incelendiğinde Inconel 718 alaşımının farklı kesme parametrelerinde ve farklı soğutma/yağlama ortamlarında işlenmesi sonucu ortalama yüzey pürüzlülük

değerleri 0,234 μm ile 0,987 μm arasında değiştiği görülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri kuru işleme koşulunda 40 m/dak V_c 'de, 0,12 mm/dev f 'de 0,987 μm ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri MQL işleme koşulunda 80 m/dak V_c 'de, 0,06 mm/dev f 'de 0,234 μm olmuştur. Şekil 5.2 incelendiğinde kuru kesme şartlarında 40 m/dak V_c 'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'de yüzey pürüzlülüğü sırası ile 0,714 μm , 0,832 μm ve 0,987 μm ölçülmüştür. V_c 'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'de yüzey pürüzlülüğü sırası ile %35, %32 ve %29 oranlarında azaldığı görülmüştür. Hava soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak V_c 'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'de yüzey pürüzlülüğü sırası ile 0,499 μm , 0,628 μm ve 0,772 μm olmuştur. V_c 'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'de yüzey pürüzlülüğü sırası ile %30, %31 ve %29,5 oranlarında azalma olmuştur. MQL soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak V_c 'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'de yüzey pürüzlülüğü sırası ile 0,342 μm , 0,417 μm ve 0,501 μm ölçülmüştür. V_c 'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f 'de yüzey pürüzlülüğü sırası ile %32, %25 ve %13 oranlarında azaldığı izlenmiştir. Genel olarak Şekil 5.2 incelendiğinde f 'in artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Frezelenen parçanın yüzey pürüzlülüğünü belirleyen en etkin parametrelerden birinin f olduğu bilinmektedir. f 'in artması, ilerleme yönündeki yüzeydeki tepe ve vadi yükseklikleri arasındaki yüksekliği artmasına dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur [57]. Yapılan çalışmalarda V_c 'nin artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Genellikle sıcaklığın nispeten düşük ve sürtünmenin önemli ölçüde yüksek olduğu düşük V_c 'lerde, iş malzemesi takım yüzeyine yapışarak yığıntı talaş (BUE) oluşum eğilimi gösterir. Kesici takım kenarında oluşan BUE kesme derinliğini değiştirerek düşük yüzey pürüzlülüğüne ve boyutsal doğruluğa neden olacağı bildirilmiştir. Bu nedenle yüzey kalitesindeki artış, artan V_c ile birlikte azalan BUE eğilimi ile açıklanabilir [58].

Şekil 5.2 bakıldığında kuru, hava ve MQL işleme şartlarında ortalama yüzey pürüzlülüğü sırası ile 0,706 μm , 0,535 μm ve 0,369 μm olarak hesaplanmıştır. Beklendiği gibi en kötü yüzey pürüzlülüğü hava ve MQL işleme şartları ile karşılaştırmak için referans alınan kuru işleme şartında elde edilmiştir. MQL

sıvısındaki yağ parçacıkları takım-talaş ara yüzüne nüfuz ettiğinden kuru işleme şartına göre yüzey pürüzlülüğünde %47,76 oranında bir azalmanın olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Ayrıca işlenen yüzeyde ince bir yağ film tabakasının sürtünmeyi azaltması pürüzlülüğün de azalmasına neden olduğu bildirilmiştir [59]. Hava soğutma şartında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü kuru işleme şartına göre %24,16 oranında azalmıştır. Bunun nedeni işleme sırasında kesme bölgesinde oluşan kesme sıcaklığının azalmasına bağlı takım aşınmasının azalmasına atfedilebilir.

5.3. KESME SICAKLIĞI

Talaşlı imalat operasyonlarının kalitesini belirleyen en önemli çıktı parametrelerinden birisi kesme bölgesindeki sıcaklıktır. Bu nedenle Inconel 718 alaşımının farklı soğutma/yağlama ortamlarında ve farklı kesme parametrelerinde işlenmesinin bir sonucu olarak kesme sıcaklığındaki değişimler Şekil 5.3’de ve kesme sıcaklıkları değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Kesme sıcaklığı için deney sonuçları

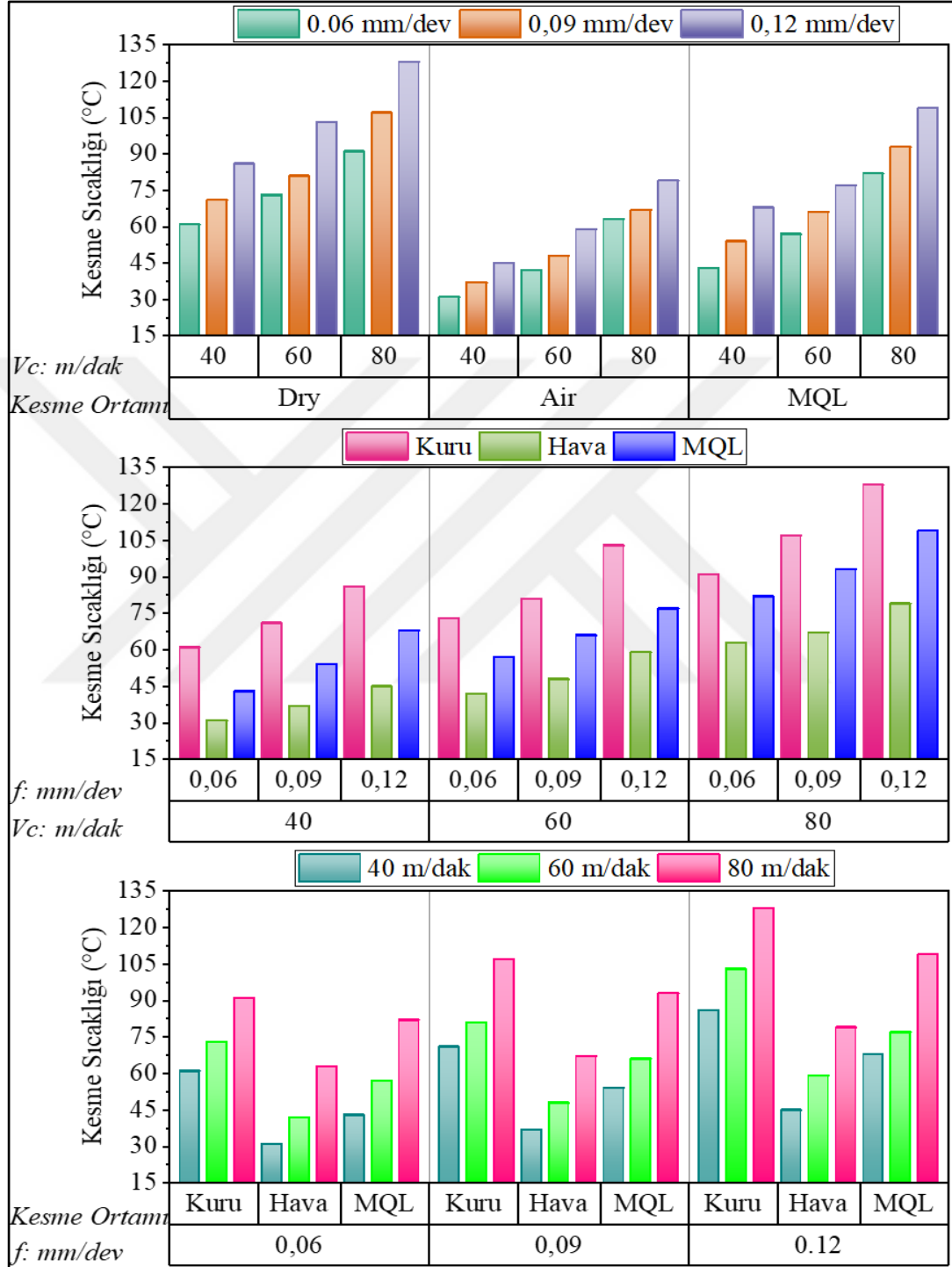
Deney No	Soğutma/Yağlama Yöntemi	Kesme Hızı, Vc (m/dak)	İlerleme Miktarı, f (mm/dev)	Kesme Sıcaklığı, T (°C)
1	Kuru	40	0,06	61
2	Kuru	40	0,09	71
3	Kuru	40	0,12	86
4	Kuru	60	0,06	73
5	Kuru	60	0,09	81
6	Kuru	60	0,12	103
7	Kuru	80	0,06	91
8	Kuru	80	0,09	107
9	Kuru	80	0,12	128
10	Hava	40	0,06	31
11	Hava	40	0,09	37
12	Hava	40	0,12	45
13	Hava	60	0,06	42
14	Hava	60	0,09	48
15	Hava	60	0,12	59
16	Hava	80	0,06	63
17	Hava	80	0,09	67
18	Hava	80	0,12	79
19	MQL	40	0,06	43
20	MQL	40	0,09	54
21	MQL	40	0,12	68
22	MQL	60	0,06	57
23	MQL	60	0,09	66

24	MQL	60	0,12	77
25	MQL	80	0,06	82
26	MQL	80	0,09	93
27	MQL	80	0,12	109

Yapılan çalışmada tüm yağlama/soğutma ortamında ve tüm kesme parametrelerinde kesme sıcaklığı 31 °C ile 128 °C arasında değişim göstermiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde kuru kesme şartlarında 40 m/dak Vc'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde kesme sıcaklığı sırası ile 61 °C, 71 °C ve 86 °C ölçülmüştür. Vc'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde kesme sıcaklığı ortalama %50 oranında artış olmuştur. Hava soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak Vc'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde kesme sıcaklığı sırası ile 31 °C, 37 °C ve 45 °C ölçülmüştür. Vc'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde kesme sıcaklığı sırası ile %103, %81 ve %76 oranlarında artma olmuştur. MQL soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak Vc'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde kesme sıcaklığı sırası ile 43 °C, 54 °C ve 68 °C ölçülmüştür. Vc'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde kesme sıcaklığı sırası ile %91, %72 ve %60 oranlarında arttığı görülmüştür. Genel olarak Şekil 5.3 incelendiğinde Vc'nin ve f'in artması ile kesme sıcaklığının arttığı görülmüştür. Vc'deki ve f'deki artışa bağlı iş parçası ve kesici takım arasındaki sürtünmenin artışına bağlı kesme sıcaklığındaki artış beklenen bir durumdur. Bu durum literatürde daha önce yapılan çalışmalarla örtüşmektedir [54,60].

Şekil 5.3 bakıldığında kuru, hava ve MQL işleme şartlarında ortalama kesme sıcaklığı sırası ile 89 °C, 52,3 °C ve 72,11 °C olarak hesaplanmıştır. Buna göre en düşük kesme sıcaklığı hava kesme şartlarında ölçülürken, bunu sırası ile MQL ve kuru işleme şartları takip etmiştir. Kesme sırasında kuru işleme şartlarında beklediği üzere en yüksek kesme sıcaklığı ölçülmüştür. Kuru işleme şartına göre MQL işleme şartlarında kesme sıcaklığı daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni MQL içerisindeki yağ parçacıkları takım/talaş ara yüzüne nüfuz ederek ince bir film oluşturarak kesme sıcaklığının azalmasına neden olur. Ayrıca kesme bölgesindeki talaşın uzaklaşmasına yardımcı olarak kesme bölgesindeki sıcaklığın azalmasına yardımcı olur [61]. En düşük kesme sıcaklığı hava soğutmalı kesme şartlarında ölçüldüğü görülmüştür. Bunun nedeni kesme bölgesine uygulanan yüksek basınçlı havanın hem kesme

bölgesinde oluşan talaşın etkin bir şekilde kesme bölgesinden uzaklaştırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

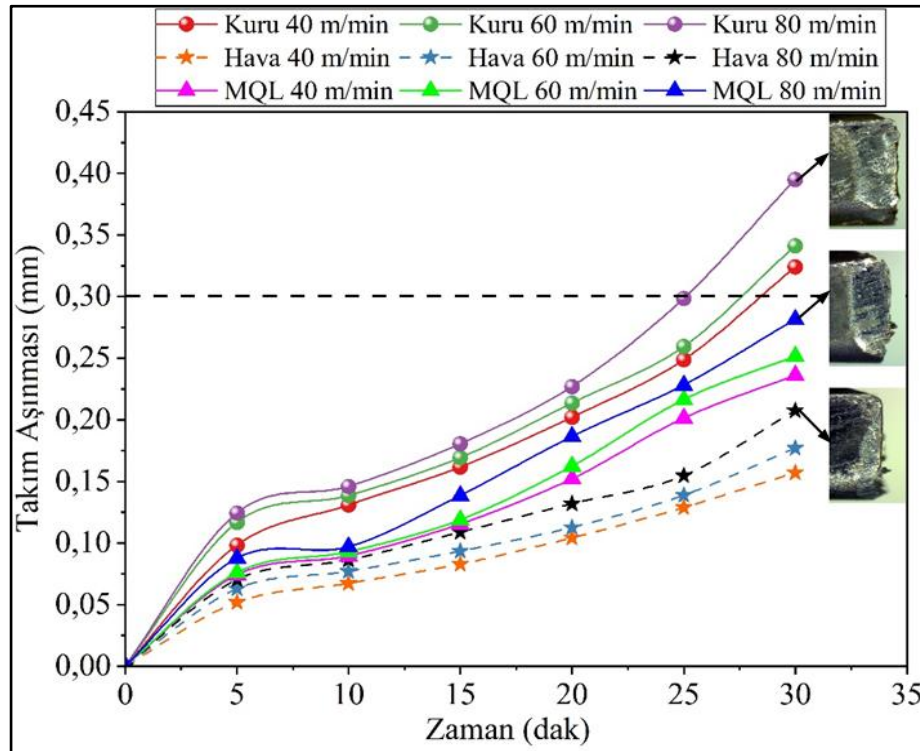


Şekil 5.3. Inconel 718 frzelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı kesme sıcaklığı değişimi.

5.4. TAKIM AŞINMASI

Bu bölümde Inconel 718 alaşımının üç farklı soğutma/yağlama ortamında, üç farklı V_c 'de, sabit f 'de ve kesme derinliğinde karbür takımla frezelenmesi sonucu elde edilen takım aşınması sonuçları Şekil 5.4'de ve takım aşınması değerleri Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Şekil 5.4 incelendiğinde Inconel 718 alaşımının işlenmesinde takım aşınması değerlerinin 0,052 mm ile 0,395 mm arasında değiştiği görülmektedir. En düşük takım aşınası değeri hava soğutmalı kesme ortamında ve 40 m/dak kesme hızında 0,052 mm iken en yüksek takım aşınma değeri kuru kesme ortamında ve 80 m/dak V_c 'de 0,395 mm ölçülmüştür. V_c 'nin artması ile takım aşınma miktarının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni iş parçası ve kesici takım arasındaki ısının artması takım aşınmasını tetiklemektedir. Ayrıca artan V_c ile kaldırılan talaş hacminin artması takım aşınmasını artıracak bildirilmiştir [62]. İşleme sırasında soğutma/yağlama ortamının takım aşınmasına etkisine bakıldığında daha öncede söylediğimiz gibi en yüksek takım aşınması



Şekil 5.4. Inconel 718 frzelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı takım aşınması değişimi.

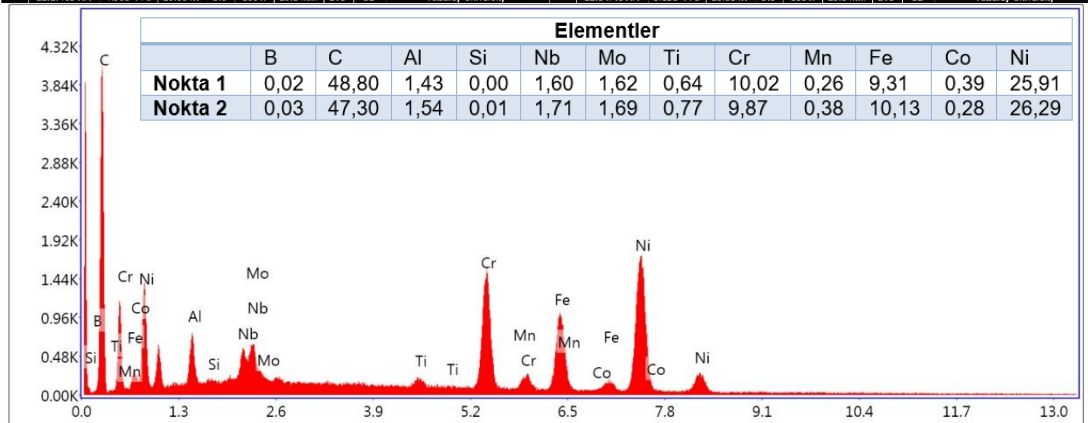
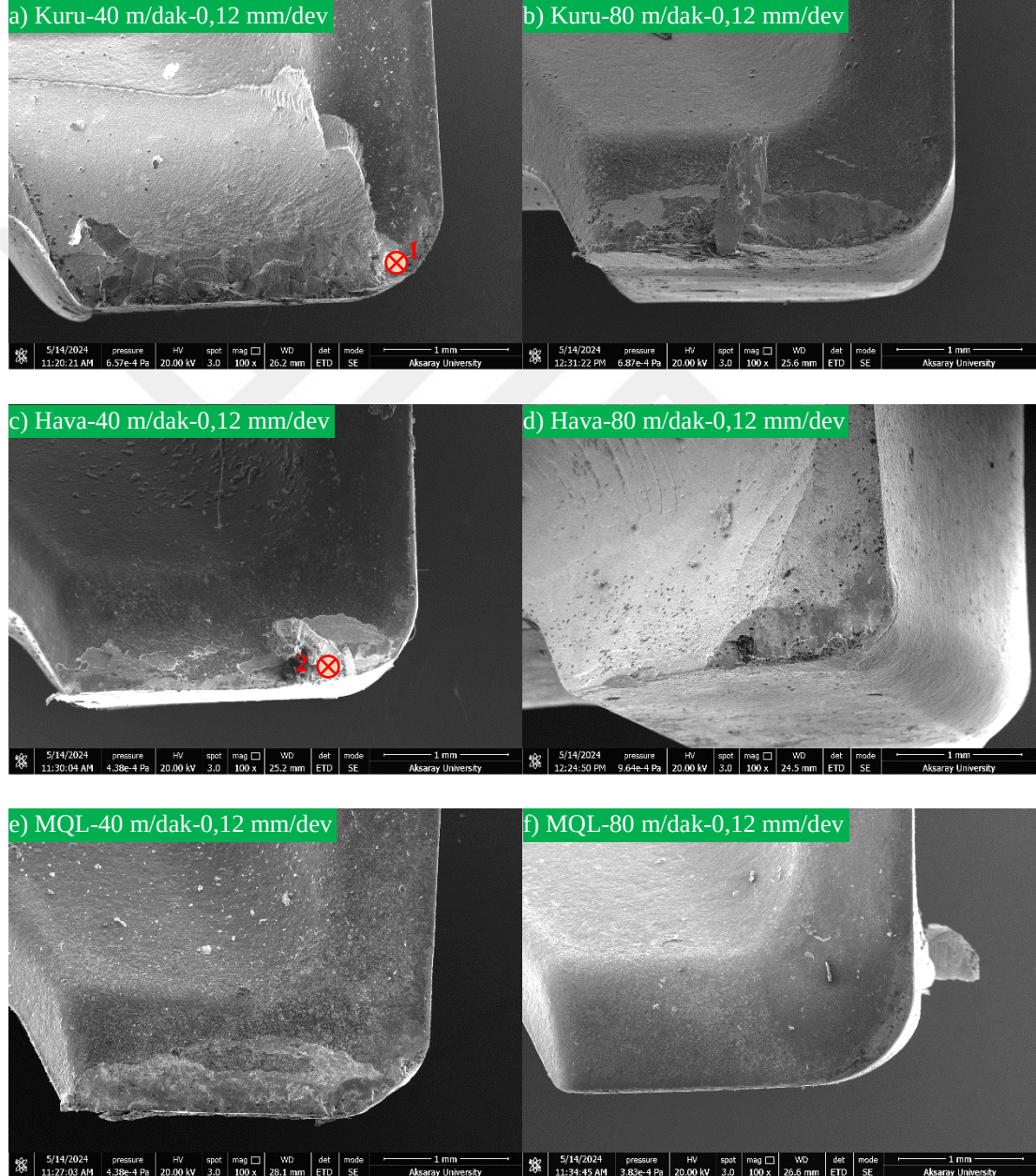
kuru işleme şartlarında ölçülürken en düşük takım aşınma değerleri hava soğutma ortamında gerçekleşmiştir. Bu durum kesme sıcaklığı ile de paralellik göstermektedir. Kesme bölgesinde oluşan aşırı kesme sıcaklığı ve takım iş parçası arası sürtünmenin artması takım aşınmasını etkileyen başlıca faktörlerdir. MQL kesme ortamında takım iş parçası arası oluşan yağ filmi sürtünmeyi azaltarak takım aşınmasını azalmasına neden olmuştur. Hava soğutmalı işlemlerde kesme bölgesine uygulanan yüksek basınçtaki hava kesme sıcaklığını düşürerek takım aşınmasının da azalmasına neden olmuştur [63].

5.5. AŞINMIŞ KESİCİ TAKIMLARDA SEM İNCELEMESİ

Kesici takımlardaki aşınmalar, işleme verimliliğini, üretilen ürünün kalitesini ve üretim maliyetlerini doğrudan etkileyen en önemli kalite özellikleridir. Talaşlı imalat operasyonlarında işleme parametrelerinin ve kesme koşullarının seçimi takım aşınması için dikkate alınması gereken en önemli faktörlerdir. Bu amaçla Inconel 718 alaşımının farklı soğutma/yağlama şartlarında ve farklı kesme parametrelerde yapılan deneyler sonucu kesici takımlarda olan aşınma mekanizmaları incelenmiştir. deneyler sonucu kesici takımlara ait SEM görüntüleri ve EDAX analiz sonuçları Şekil 5.5’de verilmiştir.

Şekil 5.5-a’da kuru kesme ortamında 40 m/dak Vc’de ve 0,12 mm/dev f’de yapılan deneyde kesici takımda aşınma, yapışma, çentik ve kırılma gibi aşınma mekanizmalarının olduğunu görülmektedir. Şekil 5.5-b’de Vc’nin 80 m/dak çıkarılması ile kesici takım üzerindeki kırılmanın ve çentik aşınmasının kaybolduğu görülmektedir. Ancak artan Vc ile birlikte aşınma ve yapışmaların devam ettiği görülmektedir. Şekil 5.5-c’de hava kesme ortamında 40 m/dak Vc’de ve 0,12 mm/dev f’de yapılan deneyde kesici takımda yapışma ve ufak kırılma gibi aşınma mekanizmalarının olduğunu görülmektedir. Şekil 5.5-d’de Vc’nin 80 m/dak çıkarılması ile kesici takım üzerinde genel olarak yapışmaların olduğu görülmüştür. Şekil 5.5-e’de MQL kesme ortamında 40 m/dak Vc’de ve 0,12 mm/dev f’de yapılan

deneyde kesici takımında genel olarak kesici takımın kalktığı görülmekte ve ufak kırılmaların olduğunu gözlemlenmiştir. Şekil 5.5-f’de Vc’nin 80 m/dak çıkarılması ile kesici takım üzerinde çok fazla aşınmanın olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 5.5- a- c’de kesici takım üzerinde yapılan SEM incelemeleri sonucu kesici takım üzerinde aşırı talaş yığılması (BUE) oluşumu meydana geldi görülmektedir. Yapışan malzemenin varlığı, Şekil 5.5’de verildiği gibi EDAX analiziyle doğrulandı.



Şekil 5.5. Kesici takımlara ait SEM görüntüleri ve EDAX analizi.

5.6. TİTREŞİM

Incanel 718 alaşımının farklı soğutma/yağlama ortamlarında ve farklı kesme parametrelerinde işlenmesinin bir sonucu olarak titreşim değerlerindeki değişim farklılıkları Şekil 5.6'de ve titreşim değerleri Çizelge 5.4'de verilmiştir.

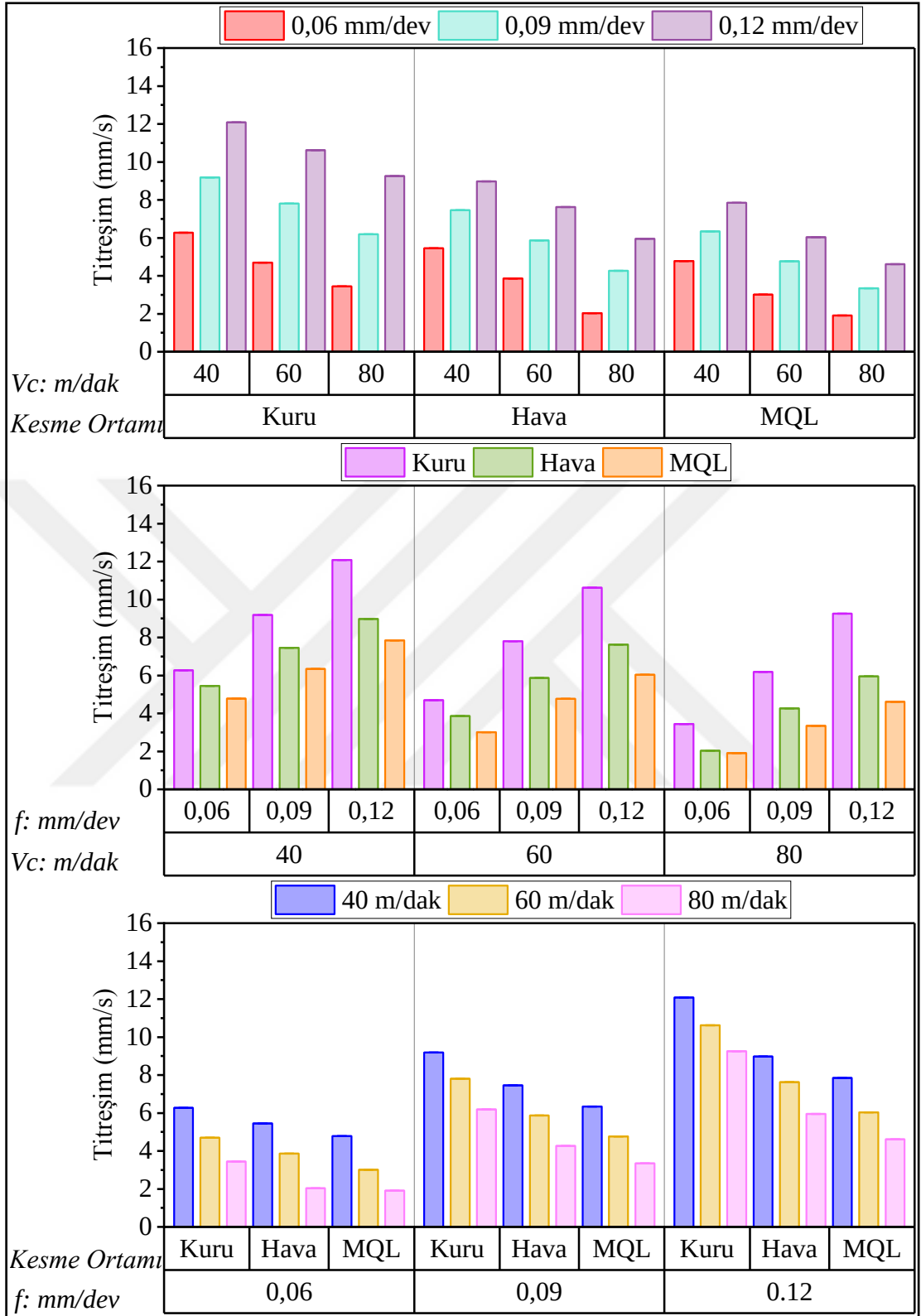
Şekil 5.6'da Incanel 718 alaşımının farklı soğutma/yağlama ortamlarında ve farklı kesme parametrelerinde işlenmesi sonucu titreşim değerlerinin 1,91 mm/s ve 12,08 mm/s arası değiştiği görülmüştür. Kuru kesme şartlarında 40 m/dak Vc'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde titreşim değerleri sırası ile 6,27 mm/s, 9,18 mm/s ve 12,08 mm/s ölçülmüştür. Vc'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde titreşim değerleri sırası ile %45,14, %32,57 ve %23,34 oranlarında azaldığı görülmüştür. Hava soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak Vc'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde titreşim değerleri sırası ile 5,445 mm/s, 7,46 mm/s ve 8,97 mm/s ölçülmüştür. Vc'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde titreşim değerleri sırası ile %52,6, %42,8 ve %33,7 oranlarında artma olmuştur. MQL soğutmalı kesme şartlarında 40 m/dak Vc'de 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde titreşim değerleri sırası ile 4,78 mm/s, 6,34 mm/s ve 7,84 mm/s ölçülmüştür. Vc'nin 80 m/dak kadar artırılması ile 0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev f'lerde titreşim değerleri sırası ile %60, %47,3 ve %41 oranlarında arttığı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucu f'in artmasına bağlı titreşim değerleri artarken Vc'nin artması ile titreşim değerlerinde tam aksine azalma görülmüştür. Artan ilerleme miktarı kesici takım üzerine gelen kesme kuvvetlerini artmasına bununda takım tutucuya etki eden yükün artmasına neden olmaktadır. Yükteki bu artışın daha fazla titreşime yol açması muhtemeldir. Vc'nin artırılması titreşimi değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Artan Vc ile kesme kuvvetlerinin

azalacağı literatürde bildirilmiştir. Bu sebeple azalan kesme kuvvetleri takım tutucuya etki eden yükün azalmasına neden olacaktır. Böylelikle titreşim değerleri azalacaktır. Ayrıca düşük motor gücü takım tezgâhının daha fazla zorlanmasına paralel titreşim değerinin artmasına neden olur [64-67].

Çizelge 5.4. Kesme sıcaklığı için deney sonuçları.

Deney No	Soğutma/Yağlama Yöntemi	Kesme Hızı, Vc (m/dak)	İlerleme Miktarı, f (mm/dev)	Titreşim, Vib (mm/s)
1	Kuru	40	0,06	6,27
2	Kuru	40	0,09	9,18
3	Kuru	40	0,12	12,08
4	Kuru	60	0,06	4,69
5	Kuru	60	0,09	7,81
6	Kuru	60	0,12	10,62
7	Kuru	80	0,06	3,44
8	Kuru	80	0,09	6,19
9	Kuru	80	0,12	9,26
10	Hava	40	0,06	5,445
11	Hava	40	0,09	7,46
12	Hava	40	0,12	8,97
13	Hava	60	0,06	3,86
14	Hava	60	0,09	5,87
15	Hava	60	0,12	7,63
16	Hava	80	0,06	2,036
17	Hava	80	0,09	4,27
18	Hava	80	0,12	5,95
19	MQL	40	0,06	4,78
20	MQL	40	0,09	6,34
21	MQL	40	0,12	7,84
22	MQL	60	0,06	3,01
23	MQL	60	0,09	4,76
24	MQL	60	0,12	6,04
25	MQL	80	0,06	1,91
26	MQL	80	0,09	3,34
27	MQL	80	0,12	4,62

Şekil 5.6'ya bakıldığında kuru, hava ve MQL işleme şartlarında ortalama titreşim değerleri sırası ile 7,727 mm/s, 5,721 mm/s ve 4,738 mm/s olarak hesaplanmıştır. Buna göre en yüksek titreşim değeri kuru kesme şartlarında ölçülürken, en düşük titreşim değerinin MQL işleme koşullarında ölçüldüğü görülmüştür. MQL işleme şartında kullanılan yağlamanın kesici takım iş parçası arası sürtünmeyi yani teması azaltması işleme sırasında titreşimi azaldığı görülmüştür [68].



Şekil 5.6. Inconel 718 frezelenmesinde soğutma/yağlama ve kesme parametrelerine bağlı titreşim değişimi.

5.7. MAKİNE ÖĞRENİMİ UYGULAMALARI

Yapılan frezeleme deneylerinden elde edilen güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve titreşim üç farklı regresyon tabanlı makine öğrenme modeli (Lineer Regresyon (LR), Karar Ağacı Sınıflandırıcısı (KAS) ve Destek Vektör Makinesi (DVM)) kullanılarak tahmin edildi. Model oluşturma ve değerlendirme için kullanılan toplam veri sayısı 27'dir. Girdi verilerinin üçte ikisi model oluşturma (eğitim) için rastgele seçildi. Model için girdi verilerinin üçte biri doğrulama testleri için kullanılmıştır. Güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve titreşim farklı modellerle tahmin edilmesinde üç farklı soğutma/yağlama ortamı, üç farklı V_c ve üç farklı f girdi parametresi olarak seçilmiştir. Girdi parametrelerinin birim farklılıklarında dolayı ortaya çıkabilecek hataları en aza indirebilmek için hem eğitim hem de test verilerini standart skala kullanmak için normalizasyonu yapılmıştır.

5.7.1. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Güç Tüketimi Tahmini

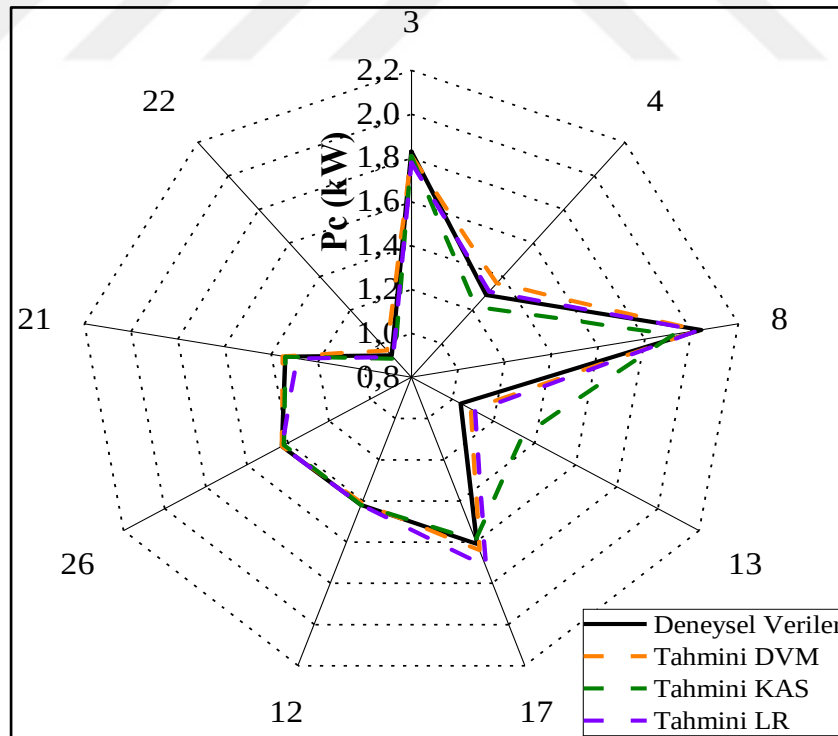
Yapılan çalışmada 27 deney kombinasyonunda elde edilen güç tüketimi değerleri eğitim ve test amaçlı kullanılmıştır. Güç tüketimi için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Tahmin edilen üç farklı modelin doğruluğunu değerlendirmek için üç performans göstergesi kullanılmıştır. Güç tüketimi için elde edilen test hataları Çizelge 5.6'da gösterilmektedir. Ayrıca deneysel verilerle üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerlerle elde edilen veriler Şekil 5.7'de verilmiştir. Çizelge 5.6 ve Şekil 5.7 incelendiğinde kullanılan hata performan ölçütlerine göre ve elde edilen tahmini değerlere göre güç tüketimi için en iyi tahmini DVM'de elde edilmiştir. Bunu sırası ile LR ve KAS makine öğrenme modelleri takip etmiştir. DVM ile tahmin edilen değerler deneysel değerlere daha yakındır, dolayısıyla DVM durumunda hatayı azaltır ve onu üç modelden arasında en iyi performans gösteren bir model haline getirir.

Çizelge 5.5. Güç tüketimi için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.

Deney Numarası	Deney Sonuçları	Makine Öğrenme Modelleri		
		DVM Tahmini	KAS Tahmini	LR Tahmini
3	1,83	1,81	1,81	1,78
4	1,29	1,36	1,22	1,31
8	2,04	2,03	1,92	2,03
13	1,04	1,09	1,34	1,11
17	1,61	1,64	1,59	1,72
12	1,42	1,41	1,42	1,42
26	1,43	1,43	1,42	1,43
21	1,34	1,35	1,34	1,29
22	0,93	0,96	0,91	0,92

Çizelge 5.6. Üç farklı performans göstergesi ile güç tüketimi için elde edilen test hataları.

Modeller	Performans Göstergeleri		
	R-squared	MSE	MAPE
DVM	0,94	0,0009	0,0189
KAS	0,81	0,0125	0,0508
LR	0,89	0,0025	0,0271



Şekil 5.7. Güç tüketimi için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.

5.7.2. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Yüzey Pürüzlülüğü Tahmini

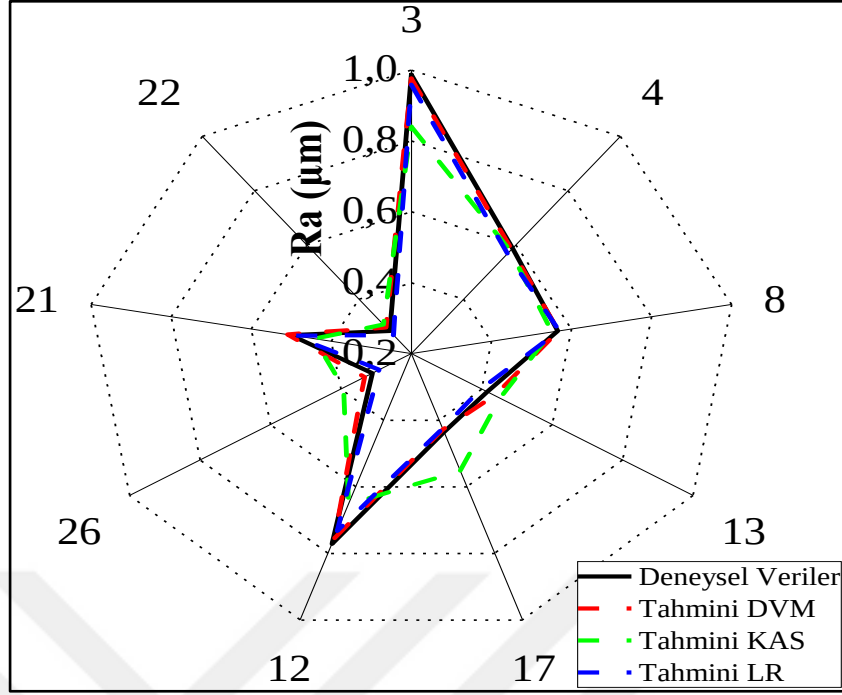
Farklı makine öğrenme algoritmaları ile üç farklı soğutma/yağlama ortamı, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarı girdi parametresi kullanılarak yüzey pürüzlülüğü tahmini Çizelge 5.7’de gösterilmektedir. Tahmin edilen üç farklı modelin doğruluğunu değerlendirmek için üç performans göstergesi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen test hataları Çizelge 5.8’de gösterilmektedir. Ayrıca deneysel verilerle üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerlerle elde edilen veriler Şekil 5.8’de verilmiştir. Çizelge 5.8 ve Şekil 5.8 incelendiğinde kullanılan hata performan ölçütlerine göre ve elde edilen tahmini değerlere göre yüzey pürüzlülüğü için en iyi tahmini DVM’de elde edilmiştir. Bunu sırası ile LR ve KAS makine öğrenme modelleri takip etmiştir. DVM ile tahmin edilen değerler deneysel değerlere daha yakındır, dolayısıyla DVM durumunda hatayı azaltır ve onu üç modelden arasında en iyi performans gösteren bir model haline getirir.

Çizelge 5.7. Yüzey pürüzlülüğü için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.

Deney Numarası	Deney Sonuçları	Makine Öğrenme Modelleri		
		DVM Tahmini	KAS Tahmini	LR Tahmini
3	0,987	0,976	0,840	0,959
4	0,588	0,584	0,579	0,568
8	0,566	0,568	0,551	0,570
13	0,416	0,437	0,452	0,398
17	0,436	0,428	0,552	0,425
12	0,772	0,755	0,652	0,733
26	0,311	0,333	0,393	0,292
21	0,501	0,509	0,444	0,496
22	0,283	0,297	0,307	0,268

Çizelge 5.8. Üç farklı performans göstergesi ile yüzey pürüzlülüğü için elde edilen test hataları.

Modeller	Performans Göstergeleri		
	R-squared	MSE	MAPE
DVM	0,98	0,0001	0,028
KAS	0,76	0,0088	0,157
LR	0,96	0,0004	0,034



Şekil 5.8. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.

5.7.3. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Kesme Sıcaklığı Tahmini

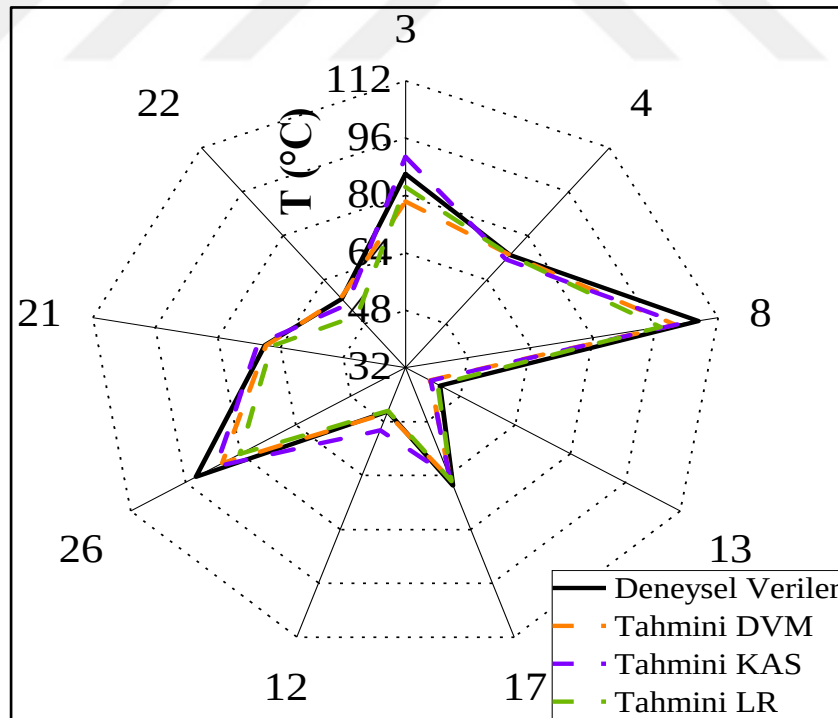
Inconel 718 alaşımının üç farklı soğutma/yağlama ortamı, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarında frezelenmesi sonucu elde edilen kesme sıcaklığı değerleri ve kesme parametreleri kullanılarak farklı makine öğrenme algoritmaları ile kesme sıcaklığı değerleri tahmini Çizelge 5.9’da gösterilmektedir. Üç performans göstergesi ile üç farklı modelle tahmin edilen kesme sıcaklığı için tahmin modellerinin doğruluğu gerçekleştirilmiştir. Kesme sıcaklığı için elde edilen test hataları Çizelge 5.10’de gösterilmektedir. Ayrıca deneysel verilerle üç farklı tahmin modeli ile elde edilen veriler Şekil 5.9’da verilmiştir. Çizelge 5.10 ve Şekil 5.9 incelendiğinde kullanılan hata performans ölçütlerine göre ve elde edilen tahmini değerlere göre kesme sıcaklığı için en iyi tahmini DVM’de elde edilmiştir. Bunu sırası ile LR ve KAS makine öğrenme modelleri takip etmiştir. DVM ile tahmin edilen değerler deneysel değerlere daha yakındır, dolayısıyla DVM durumunda hatayı azaltır ve onu üç modelden arasında en iyi performans gösteren bir model haline getirir.

Çizelge 5.9. Kesme sıcaklığı için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.

Deney Numarası	Deney Sonuçları	Makine Öğrenme Modelleri		
		DVM Tahmini	KAS Tahmini	LR Tahmini
3	86	78,36	90,80	82,36
4	73	73,00	71,38	72,89
8	107	100,96	102,33	97,25
13	42	39,16	39,38	41,39
17	67	65,12	64,22	65,75
12	45	45,52	50,60	44,86
26	93	85,28	87,11	80,25
21	68	67,68	69,80	66,36
22	57	57,32	54,88	50,89

Çizelge 5.10. Üç farklı performans göstergesi ile kesme sıcaklığı için elde edilen test hataları.

Modeller	Performans Göstergeleri		
	R-squared	MSE	MAPE
DVM	0,93	18,49	0,038
KAS	0,80	15,09	0,053
LR	0,88	34,75	0,048



Şekil 5.9. Kesme sıcaklığı için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.

5.7.4. Farklı Makine Öğrenimi Modelleriyle Titreşim Tahmini

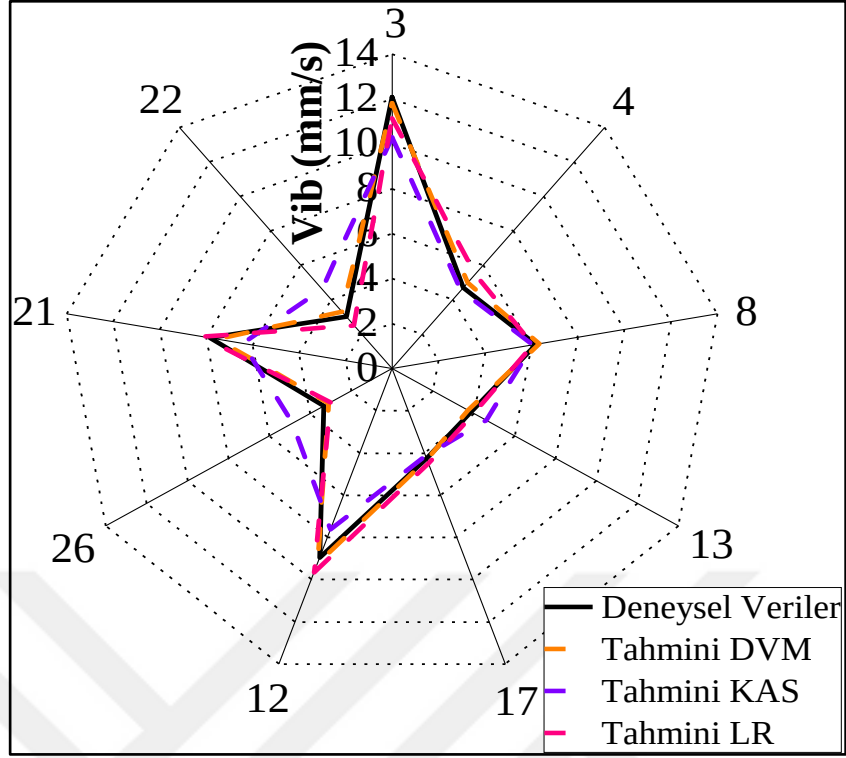
Farklı makine öğrenme algoritmaları ile üç farklı soğutma/yağlama ortamı, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarı girdi parametresi kullanılarak titreşim değerlerinin tahmini Çizelge 5.11’de gösterilmektedir. Tahmin edilen üç farklı modelin doğruluğunu değerlendirmek için üç performans göstergesi kullanılmıştır. Titreşim değerleri için elde edilen test hataları Çizelge 5.12’de gösterilmektedir. Ayrıca deneysel verilerle üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerlerle elde edilen veriler Şekil 6.10’da verilmiştir. Çizelge 5.12 ve Şekil 6.10 incelendiğinde kullanılan hata performans ölçütlerine göre ve elde edilen tahmini değerlere göre titreşim için en iyi tahmini DVM’de elde edilmiştir. Bunu sırası ile LR ve KAS makine öğrenme modelleri takip etmiştir. DVM ile tahmin edilen değerler deneysel değerlere daha yakındır, dolayısıyla DVM durumunda hatayı azaltır ve onu üç modelden arasında en iyi performans gösteren bir model haline getirir.

Çizelge 5.11. Titreşim değerleri için üç farklı tahmin modeli ile elde edilen değerler.

Deney Numarası	Deney Sonuçları	Makine Öğrenme Modelleri		
		DVM Tahmini	KAS Tahmini	LR Tahmini
3	86	12,08	11,82	10,29
4	73	4,69	4,98	4,54
8	107	6,19	6,34	6,07
13	42	3,86	3,72	4,61
17	67	4,27	4,31	4,14
12	45	8,97	9,25	7,62
26	93	3,34	3,11	4,86
21	68	7,84	7,52	6,43
22	57	3,01	3,31	4,61

Çizelge 5.12. Üç farklı performans göstergesi ile titreşim için elde edilen test hataları.

Modeller	Performans Göstergeleri		
	R-squared	MSE	MAPE
DVM	0.90	0.057	0.043
KAS	0.76	1.386	0.193
LR	0.88	0.281	0.081



Şekil 5.10. Titreşim için deney sonuçları ve üç farklı makine öğrenimi modelinden tahmin edilen değer.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Karbür takımla Inconel 718 alaşımının üç farklı soğutma/yağlama ortamının (Kuru, Hava ve MQL), üç farklı kesme hızının (40 m/dak, 60 m/dak ve 80 m/dak) ve üç farklı ilerleme miktarının (0,06 mm/dev, 0,09 mm/dev ve 0,12 mm/dev) güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve titreşim üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca üç farklı soğutma/sağlama ortamının (Kuru, Hava ve MQL), üç farklı kesme hızının (40 m/dak, 60 m/dak ve 80 m/dak) ve sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) takım aşınması ve SEM incelemeleri yapılmıştır. Deneyler sonucu yapılan değerlendirmelerden elde edilen bulgular maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Kesme hızının ve ilerleme miktarının artması güç tüketiminin artmasına neden olmuştur. Ayrıca güç tüketimi kuru, hava ve MQL soğutma/yağlama ortamında verilen sıraya göre azalmıştır. Bu bağlamda en düşük güç tüketimi MQL kesme ortamında, 40 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında 0,76 kW olmuştur.
- Kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olurken ilerleme miktarının artırılması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü kuru, hava ve MQL soğutma/yağlama ortamında verilen sıraya göre azalmıştır. Bu sonuçlara göre en düşük yüzey pürüzlülüğü MQL kesme ortamında, 80 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında 0,234 μ m ölçülmüştür.
- Inconel 718 işlenmesinde kesme sıcaklığı kesme hızının ve ilerleme miktarının azaltılmasına paralel azaldığı görülmüştür. Ayrıca kesme sıcaklığı kuru, MQL ve hava soğutma/yağlama ortamında verilen sıraya göre azalmıştır. En düşük kesme sıcaklığı hava kesme ortamında, 40 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında 31 °C'ye ulaşılmıştır.

- Inconel 718 işlenmesinde titreşim değerleri kesme hızının artması ile azalırken ilerleme miktarının artışına bağlı azaldığı görülmüştür. Ayrıca titreşim değerleri kuru, hava ve MQL soğutma/yağlama ortamında verilen sıraya göre azalmıştır. Bu bağlamda en düşük titreşim değeri MQL kesme ortamında, 80 m/dak kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme miktarında 1,91 mm/sn olduğu görülmüştür.
- Yapılan çalışmada kesme hızının artması takım aşınmasının artmasına neden olmuştur. Ayrıca soğutma/yağlama ortamı bakımından sırası ile hava, MQL ve kuru kesme ortamlarında en düşük takım aşınmaları görülmüştür. en düşük takım aşınma değeri hava kesme ortamında ve 40 m/dak kesme hızında 0,052 mm ölçülmüştür.
- Yapılan deney sonucu elde edilen verilere göre R-squared, MSE ve MAPE değerleri dikkate alındığında güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve titreşim tahmininde DVM modeli KAS ve LR modellerinden daha iyi performans gösterdiğini görülmüştür.
- Güç tüketiminin DVM modeli ile tahmin performansına ilişkin olarak R-squared, MSE ve MAPE değerleri sırasıyla 0,94, 0,0009 ve 0,0189 olup KAS ve LR modelleri ile karşılaştırıldığında en düşük değerlere ulaşılmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü DVM modeli ile tahmin performansına ilişkin olarak R-squared, MSE ve MAPE değerleri sırasıyla 0,98, 0,0001 ve 0,028 olup KAS ve LR modelleri ile karşılaştırıldığında en düşük değerlere ulaşılmıştır.
- Kesme sıcaklığı DVM modeli ile tahmin performansına ilişkin olarak R-squared, MSE ve MAPE değerleri sırasıyla 0,93, 18,49 ve 0,038 olup KAS ve LR modelleri ile karşılaştırıldığında en düşük değerlere ulaşılmıştır.
- Titreşim değerleri DVM modeli ile tahmin performansına ilişkin olarak R-squared, MSE ve MAPE değerleri sırasıyla 0,90, 0,057 ve 0,043 olup KAS ve LR modelleri göre ile karşılaştırıldığında en düşük değerlere ulaşılmıştır.

6.1. SONUÇLAR

- Güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve titreşim üzerine kesici takım kaplamasının etkileri araştırılabilir.

- Kesme kuvveti üzerine soğutma/yağlama koşullarının ve kesme parametrelerinin etkileri incelenebilir.
- Güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve titreşim üzerine MQL sıvısına katılan farklı yağlayıcılık özelliğini artıran nano partiküllerin etkileri incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] T. Sonar, V., Balasubramanian, S. Malarvizhi, T. Venkateswaran, D. Sivakumar “An overview on welding of Inconel 718 alloy-Effect of welding processes on microstructural evolution and mechanical properties of joints”, *Materials Characterization*, (174): 110997 (2021).
- [2] A. De Bartolomeis, S. T. Newman, I. S. Jawahir, D. Biermann, A. Shokrani “Future research directions in the machining of Inconel 718”, *Journal of Materials Processing Technology*, (297): 117260 (2021).
- [3] Y. Zhang, L. Lan, Y. Zhao “Effect of precipitated phases on the mechanical properties and fracture mechanisms of Inconel 718 alloy”, *Materials Science and Engineering: A*, (864): 144598 (2023).
- [4] R. Ran, Y. Wang, Y. X. Zhang, F. Fang, H. S. Wang, G. Yuan, G. D. Wang “Microstructure, precipitates and mechanical properties of Inconel 718 alloy produced by two-stage cold rolling method”, *Materials Science and Engineering: A*, (793): 139860 (2020).
- [5] B. C. Behera, H. Alemayehu, S. Ghosh, P. V. Rao “A comparative study of recent lubri-coolant strategies for turning of Ni-based superalloy”, *Journal of Manufacturing Processes*, (30): 541-552 (2017).
- [6] D. Hongbo, W. Gaochao “Effect of deformation process on superplasticity of Inconel 718 alloy”, *Rare Metal Materials and Engineering*, (44): 298-302 (2015).
- [7] D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki, D. Larrouquère, V. Zerrouki, J. Vigneau “A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy”, *International journal of machine tools and manufacture*, (44): 439-456 (2004).
- [8] E. O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, *Journal of materials processing technology*, (134): 233-253 (2003).
- [9] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, T. Wakabayashi “Dry machining and minimum quantity lubrication”, *CIRP annals*, (53): 511-537 (2004).
- [10] T. Obikawa, Y. Kamata, J. Shinozuka “High-speed grooving with applying MQL”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, (46): 1854-1861 (2006).

- [11] N. R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed “Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel”, *Journal of materials processing technology*, (172): 299-304 (2006).
- [12] Attanasio, M. Gelfi, C. Giardini, C. Remino, “Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear”, *Wear*, (260): 333-338 (2006).
- [13] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. Miranda, N. L. Coppini, “Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminium-silicon alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, (122): 127-138 (2002).
- [14] M. J. Donachie, S. J. Donachie “Superalloys: a technical guide”, *ASM international*, (2002).
- [15] J. R. Davis “Nickel, cobalt, and their alloys”, *ASM international*, (2000).
- [16] R. C. Reed “The superalloys: fundamentals and applications”, *Cambridge university press*, (2008).
- [17] B. Geddes, H. Leon, X. Huang, “Superalloys: alloying and performance”, *ASM International*, (2010).
- [18] J. K. Tien “Superalloys, supercomposites and superceramics”, *Elsevier*, (2012).
- [19] N. Volz, C. H. Zenk, R. Cherukuri, T. Kalfhaus, M. Weiser, S. K. Makineni, M. Göken “Thermophysical and mechanical properties of advanced single crystalline Co-base superalloys”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, (49): 4099-4109 (2018).
- [20] A. Kracke, A. Allvac, “Superalloys, the most successful alloy system of modern times-past, present and future”, *In Proceedings of the 7th International Symposium on Superalloy*, (718): 13-50 (2010).
- [21] M. M. De Oliveira, A. A. Couto, G. F. Almeida, D. A. Reis, N. B. De Lima, R. Baldan, “Mechanical behavior of inconel 625 at elevated temperatures”, *Metals*, (9): 301 (2019).
- [22] A. P. Mouritz “Introduction to aerospace materials”, *Elsevier*, (2012).
- [23] A. N. Jinoop, C. P. Paul, K. S. Bindra “Laser-assisted directed energy deposition of nickel super alloys: A review”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, (233): 2376-2400 (2019).
- [24] E. S. Atmaca “Inconel 718 Süperalaşımının PVD Yöntemi ile AlTiN ve CrN Kaplanması ve Karakterize Edilmesi”, *Gazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, 1-157 (2015).

- [25] C. M. Kuo, Y. T. Yang, H. Y. Bor, C. N. Wei, C. C. Tai “Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy”, ***Materials Science and Engineering: A***, (510-511): 289-294 (2009).
- [26] J. P. Choi, G. H. Shin, S. Yang, D. Y. Yang, J. S. Lee, M. Brochu, J. H. Yu “Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting”, ***Powder Technology***, (310): 60-66 (2017).
- [27] X. Y. Xu, W. Hong, Y. E. Zhang, J. W. Chang, X. U. Yao, G. A. Sun, Y. K. GAO “Characterization of residual stresses and microstructural features in an Inconel 718 forged compressor disc”, ***Transactions of Nonferrous Metals Society of China***, (29): 569-578 (2019).
- [28] W. Huang, J. Yang, H. Yang, G. Jing, Z. Wang, X. Zeng “Heat treatment of Inconel 718 produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties”, ***Materials Science and Engineering: A***, (750): 98-107 (2019).
- [29] X. You, Y. Tan, S. Shi, J. M. Yang, Y. Wang, J. Li, Q. You “Effect of solution heat treatment on the precipitation behavior and strengthening mechanisms of electron beam smelted Inconel 718 superalloy”, ***Materials Science and Engineering: A***, (689): 257-268 (2017).
- [30] W. dong Song, M. lei Hu, H. sheng Zhang, Y. Xi Jin “Effects of different heat treatments on the dynamic shear response and shear localization in Inconel 718 alloy”, ***Materials Science and Engineering: A***, (725): 76-87 (2018).
- [31] A. Thomas, M. El-Wahabi, J. M. Cabrera, J. M. Prado “High temperature deformation of Inconel 718”, ***Journal of Materials Processing Technology***, (177): 469-472 (2006).
- [32] S. Holland, X. Wang, J. Chen, W. Cai, F. Yan, L. Li “Multiscale characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 fabricated by selective laser melting”, ***Journal of Alloys and Compounds***, (784): 182-194 (2019).
- [33] W. M. Tucho, P. Cuvillier, A. Sjolyst-Kverneland, V. Hansen “Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment”, ***Materials Science and Engineering: A***, (689): 220-232 (2017).
- [34] S. Yan, Q. Wang, X. Chen, C. Zhang, G. Cui “Fabrication of highly compact Inconel 718 alloy by spark plasma sintering and solution treatment followed by aging”, ***Vacuum***, (163): 194-203 (2019).

- [35] J.R. Duflou, J.W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, K. Kellens “Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach”, *CIRP Annals* (61): 587-609 (2012).
- [36] F. Pusavec, J. Kopac, “Achieving and implementation of sustainability principles in machining processes”, *Advances in Production Engineering Management*, (4): 151-160 (2009).
- [37] R. Srikant, M. Prasad, M. Amrita, A. Sitaramaraju, P.V. Krishna “Nanofluids as a potential solution for Minimum Quantity Lubrication: A review”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, (228): 3-20 (2014).
- [38] J. P. Davim, P. Reis “Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-Experimental and statistical study”, *Materials Design*, (24): 315-324 (2003).
- [39] G. Boothroyd “Fundamentals of metal machining and machine tools international student ed. 5th Printing”, *McGraw-Hill*, ISBN 0-07-085057-7, New York (1981).
- [40] F. Günan “Hastelloy C276 alaşımının frezelenmesinde minimum miktarda yağlamanın yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin araştırılması,” *Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi*, 1-104 (2019).
- [41] H. K. Tönshoff, W. Spintig, W. König, A. Neises “Machining of holes developments in drilling technology,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, (43): 551-561 (1994).
- [42] J. Dahmus, T. Gutowski “An environmental analysis of machining”, *In ASME international mechanical engineering congress and exposition*, (47136): 643-652 (2004).
- [43] S. Neseli, S. Yaldiz, E. Turkes “Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology”, *Measurement*, (44): 80-587 (2011).
- [44] M.S.B. Halim “Tool Wear Characterization of Carbide Cutting Tool Insert in a Single Point Turning Operation of AISI D2 Steel”, *B.Tech. thesis, Department of Manufacturing Engineering, Universiti Teknikal Malaysia Mekala* (2008),
- [45] Y. Sahin, A. R. Motorcu “Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, (26): 84-90 (2008).

- [46] P. B. Nedic, M. D. Eric "Cutting Temperature Measurement and Material Machinability", ***Journal of Production Engineering, Faculty of Engineering, University of Kragujevac***, (2016)
- [47] R. Singh "Metal Cutting," in ***Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology, New Delhi, New Age International Private Limited***, 397-398 (2006).
- [48] D. A. Stephenson, J. S. Agapiou "Metal cutting theory and practice", ***CRC press***. (2018).
- [49] K. P. Soman, R. Loganathan, V. Ajay V "Machine learning with SVM and other kernel methods", ***PHI Learning Pvt. Ltd., Delhi, India***, 1-10 (2009)
- [50] M. A. Mahboob Ali, A. I. Azmi, A. N. Mohd Khalil, K. W. Leong "Experimental study on minimal nanolubrication with surfactant in the turning of titanium alloys", ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, (92): 117-127 (2017).
- [51] A. T. Abbas, S. Anwar, E. Abdelnasser, M. Luqman, J. E. A. Qudeiri, A. Elkaseer "Effect of different cooling strategies on surface quality and power consumption in finishing end milling of stainless steel 316", ***Materials***, (14), 903 (2021).
- [52] M., Akgün, B., Özlü, F. Kara, "Effect of PVD-TiN and CVD-Al₂O₃ coatings on cutting force, surface roughness, cutting power, and temperature in hard turning of AISI H13 steel", ***Journal of Materials Engineering and Performance***, (32): 1390-1401 (2023).
- [53] E. Suneesh, M. Sivapragash "Parameter optimisation to combine low energy consumption with high surface integrity in turning Mg/Al₂O₃ hybrid composites under dry and MQL conditions", ***Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering***, (41): 1-23 (2019).
- [54] E. Salur, M. Kuntoğlu, A. Aslan, D. Y. Pimenov "The effects of MQL and dry environments on tool wear, cutting temperature, and power consumption during end milling of AISI 1040 steel", ***Metals***, (11): 1674 (2021).
- [55] M. A. ul Haq, S. Hussain, M. A. Ali, M. U. Farooq, N. A. Mufti, C. I. Pruncu, A. Wasim "Evaluating the effects of nano-fluids based MQL milling of IN718 associated to sustainable productions", ***Journal of Cleaner Production***, (310): 127463 (2021).
- [56] A. Race, I. Zwierzak, J. Secker, J. Walsh, J. Carrell, T. Slatter, A. Maurotto "Environmentally sustainable cooling strategies in milling of SA516: Effects on surface integrity of dry, flood and MQL machining", ***Journal of Cleaner Production***, (288): 125580 (2021).

- [57] A. Çiçek, E. Ekici, T. Kıvak, F. Kara, N. Uçak “Performance of multilayer coated and cryo-treated uncoated tools in machining of AISI H13 tool steel-part 2: HSS end mills”, **Journal of Materials Engineering and Performance**, (30): 3446-3457 (2021).
- [58] A. Çiçek, E. Ekici, T. Kıvak, F. Kara, N. Uçak “Performance of multilayer coated and cryo-treated uncoated tools in machining of AISI H13 tool steel-part 1: tungsten carbide end mills”, **Journal of Materials Engineering and Performance**, (30): 3436-3445 (2021).
- [59] Ş. Şirin, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak “Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL”, **Tribology International**, (153): 106673 (2021).
- [60] A. Thakur, S. Gangopadhyay, K. P. Maity, S. K. Sahoo “Evaluation on effectiveness of CVD and PVD coated tools during dry machining of Incoloy 825”, **Tribology Transactions**, (59): 1048-1058 (2016).
- [61] Y. Kaynak, A. Gharibi, M. Ozkutuk “Experimental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553 alloy: the influence of cryogenic, MQL, and high pressure coolant supply”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, (94): 1411-1428 (2018).
- [62] V. T. G. Naves, M. B. Da Silva, F. J. Da Silva “Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel”, **Wear**, (302): 1201-1208 (2013).
- [63] L. Kong, J. Sun, Y. Bao “Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids”, **Rsc Advances**, (7): 12599-12609 (2017).
- [64] A. Şahinoğlu, A. Güllü, I. Ciftci “Analysis of surface roughness, sound level, vibration and current when machining AISI 1040 steel”, **Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences**, (37):, 423-437 (2019).
- [65] B. Özlü “Sleipner soğuk iş takım çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş şekli üzerine etkisinin incelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, (36): 1241-1252 (2021).
- [66] B. Özlü, H. Demir, M. Türkmen, S. Gündüz “Examining the machinability of 38MnVS6 microalloyed steel, cooled in different mediums after hot forging with the coated carbide and ceramic tool”, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, (235): 6228-6239 (2021).
- [67] B. Özlü “Evaluation Of energy consumption, cutting force, surface roughness and vibration In machining toolox 44 steel using taguchi-based gray relational analysis”, **Surface Review and Letters**, (29): 225010. (2022).

- [68] M. Emami, A. Karimipour “Theoretical and experimental study of the chatter vibration in wet and MQL machining conditions in turning process”, ***Precision Engineering***, (72): 41-58 (2021).



ÖZGEÇMİŞ

Maher Waleed Hamid HAMID ilk, orta ve lise eğitimini Ambar ilinde tamamlamıştır. 2022 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir.

