

**MOLİBDEN VE ALAŞIMLARININ  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**2018  
DOKTORA TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Hüseyin GÖKÇE**

# **MOLİBDEN VE ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Hüseyin GÖKÇE**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Eylül 2018**

Hüseyin GÖKÇE tarafından hazırlanan “MOLİBDEN VE ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ

Tez Danışmanı, ÇAKÜ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 03/09/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

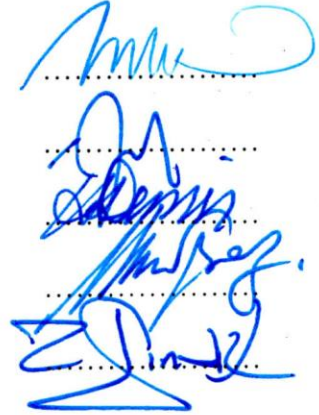
Başkan : Prof. Dr. İhsan KORKUT (GÜ)

Üye : Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ (ÇAKÜ)

Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Tayfun FINDIK (GÜ)



..... / ..... / .....

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





*“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.”*

Hüseyin GÖKÇE

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **MOLİBDEN VE ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Hüseyin GÖKÇE**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ**

**Eylül 2018, 136 sayfa**

Saf molibden, titanyum – zirkonyum – molibden (TZM) ve molibden – hafniyum – karbon (MHC) alaşımları endüstride yoğun olarak kullanılan başlıca molibden esaslı malzemelerdir. Bu malzemeler savunma ve havacılık sanayileri başta olmak üzere pek çok farklı sektörde kullanılmaktadır. Talaş miktarı düşük olan son işleme operasyonları, kaliteli parça üretimi gerekliliğinden dolayı kritik imalat süreçlerindedir. Yüksek yüzey kalitesi ve boyut tamlığı gereksiniminden dolayı, son işlemeyi etkileyen parametrelerin önceden belirlenmesi ve optimize edilmesi önemlidir. Bu nedenle kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kesici takım malzemesi ve geometrisi gibi kesme parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, üç farklı molibden alaşımının frezelemesi işleminde oluşan kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için uygun kesici takım ve kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deney parametreleri Taguchi L16 dikey dizini kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen esas kesme

kuvveti ( $F_c$ ) ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) üzerinde kesme parametrelerinin önem seviyelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Sinyal/Gürültü oranları kullanılarak elde edilen kontrol faktörlerinin optimum değerleri esas kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için farklı seviyelerde bulunmuştur. Kesme kuvvetleri için en önemli parametrenin ilerleme miktarı, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin ise kesme hızı olduğu ANOVA ile belirlenmiştir. Artan kesme hızı ile genel olarak yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma görülmüştür. Her malzeme gurubunda belirlenen optimum kesme koşullarında kesici takım aşınması deneyleri de yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi kullanılarak talaş kaldırma sürecinde oluşan kesme kuvvetleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucu hesaplanan ve ölçülen kesme kuvvetleri karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Molibden ve alaşımları, işlenebilirlik, Taguchi metodu, sonlu elemanlar analizi.

**Bilim Kodu** : 914.3.028

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF MOLYBDENUM AND ITS ALLOYS**

**Hüseyin GÖKÇE**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ**

**September 2018, 136 pages**

Pure molybdenum, titanium – zirconium – molybdenum (TZM) and molybdenum – hafnium – carbon (MHC) are among the most industrially used molybdenum based materials. Although there are many applications areas of these materials, they are mainly used in defence and aerospace industries. Finishing cuts are among the critical production operations because of the requirements of high quality parts. Due to the necessities of high surface quality and high dimensional accuracy, it is important to determine and optimise finishing cut parameters beforehand. Therefore, it is necessary to determine the machining parameters such as cutting speed, feed rate, depth of cut and cutting tool material and geometry.

In this study, it is aimed to determine the optimum cutting tools and cutting parameters in terms of average surface roughness ( $R_a$ ) and cutting forces in milling of three different molybdenum based materials. The milling test design was

accomplished using Taguchi's L16 orthogonal arrays. An analysis of variance (ANOVA) was also employed to determine the level of the effect of control factors for the main cutting force ( $F_c$ ) and average surface roughness ( $R_a$ ). By using the Signal/Noise ratios, the optimum values of the control factors were found to be at different levels for the cutting forces and average surface roughness. The ANOVA analysis showed that the feed rate was the most significant parameter for the cutting forces while the cutting speed was the most significant parameter for the surface roughness. Increasing cutting speed resulted in decreased surface roughness values. Tool wear tests were also carried out at the optimum levels determined for each workpiece material. By using finite element analysis, the cutting forces were tried to be determined. The calculated and measured cutting forces were compared and it was seen that the both results were in agreement.

**Key Word** : Molybdenum and its alloys, machinability, Taguchi method, finite element analysis.

**Science Code** : 914.3.028



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her sürecinde değerli yardımlarını, fedakârlıklarını ve zamanını esirgemeyen, tecrübesiyle beni yönlendiren ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren kıymetli hocam Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında destek ve yardımlarını esirgemeyen meslektaştan öte kardeşim Dr. Harun GÖKÇE başta olmak üzere Karabük Kamu Üniversite Sanayi İşbirliği (KUSİ) Temsilcisi Prof. Dr. Halil DEMİR hocamın sanayinin problemlerini çözmeye yönelik çalışmalara yönlendirmesinden dolayı teşekkür ederim. Sertlik ölçüm testleri, mikroskop görüntülerinin alınması ve işlenebilirlik deneylerinin yapılmasında yardımlarını ve zamanını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Dr. Öğr. Üyesi Tayfun FINDIK, Arş. Gör. Dr. Gültekin UZUN ve Arş. Gör. İrem Burcu ALGAN'a, SEM görüntülerinin alınmasında emeği geçen Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Arş. Gör. Yüksel AKINAY'a ve Çankırı Karatekin Üniversitesi Meslek Yüksekokulu mesai arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından KBÜ-BAP-15/2-DR-002 kodlu proje ile desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemediğim yanımda olan anneme, babama ve kardeşlerime tüm kalbimle teşekkür ederim. Yapılan bu çalışmanın her aşamasında sabır ve desteği ile yanımda yer alan eşim Emine ve kıymetli oğlum Abdullah Emir'e en kalbi şükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	5
REFRAKTER METALLER .....	5
2.1. REFRAKTER METALLERE GİRİŞ.....	5
2.2. TUNGSTEN (VOLFRAM) (W).....	6
2.3. TANTAL (Ta) .....	7
2.4. NİOBYUM (KOLONBİYUM) (Nb).....	7
2.5. RENYUM (Re).....	8
2.6. MOLİBDEN (Mo).....	8
2.6.1. Molibden Alaşımları.....	9
2.6.2. Ticari Saflıktaki Molibden.....	11
2.6.3. Titanyum – Zirkonyum – Molibden (TZM) Alaşımı.....	12
2.6.4. Molibden – Hafniyum – Karbon (MHC) Alaşımı .....	13
BÖLÜM 3 .....	14
TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK .....	14

## **Sayfa**

3.1. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ.....	14
3.1.1. Talaşlı İmalat İşlemlerinde Değişkenler (Parametreler).....	16
3.1.2. Kesme Hızı (VC).....	17
3.1.3. İlerleme Hızı (F).....	17
3.1.4. Talaş Derinliği (a).....	18
3.2. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİNDE KESME KUVVETLERİ.....	19
3.3. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİNDE ISI VE SICAKLIK.....	20
3.4. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİNDE KULLANILAN KESİCİ TAKIMLAR.....	21
3.4.1. Kesici Takım Geometrisi.....	23
3.4.2. Kesici Takım Malzemeleri.....	25
3.4.2.1. Yüksek Hız Çeliği (HSS).....	26
3.4.2.2. Sementit Karbür (WC).....	26
3.4.2.3. Sermet.....	29
3.4.2.4. Kaplamalı Sementit Karbür.....	29
3.4.2.5. Seramik.....	30
3.4.2.6. Kübik Bor Nitrür (CBN, PCBN).....	31
3.4.2.7. Elmas.....	31
3.4.3. Takım Aşınması ve Takım Ömrü.....	32
3.4.3.1. Takım Aşınması.....	32
3.4.3.2. Takım Ömrü.....	35
3.5. YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ.....	35
3.6. İŞLENEBİLİRLİK.....	38
BÖLÜM 4.....	45
TAGUCHI METODU VE OPTİMİZASYON.....	45
4.1. TAGUCHI METODU.....	45
4.1.1. Sistem Tasarımı.....	46
4.1.2. Parametre Tasarımı.....	46
4.1.3. Tolerans Tasarımı.....	47
4.2. TAGUCHI METODUNDA DENEY TASARIMI.....	47
4.3. TAGUCHI METODU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	50
BÖLÜM 5.....	52
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	52
5.1. TEMEL SAYISAL METODLAR.....	52

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (SEA) YAKLAŞIMI.....	53
5.3. ANALİZ TİPİ .....	56
5.4. MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	56
5.5. MODEL GEOMETRİSİ VE MESH .....	57
5.6. SINIR ŞARTLARI VE YÜKLERİN UYGULANMASI.....	59
5.7. SEA TALAŞLI İMALATTA KULLANIMI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ....	60
BÖLÜM 6 .....	63
MATERYAL VE YÖNTEM.....	63
6.1. MALZEME .....	63
6.1.1. Metalografik İnceleme.....	64
6.1.2. Sertlik Ölçümleri .....	65
6.1.3. XRF Analizi.....	66
6.1.4. Optik Mikroskop İncelemeleri.....	66
6.1.5. SEM ve EDX Analizleri .....	68
6.2. İŞLEME DENEYLERİ .....	69
6.2.1. Kesici Takımlar, Takım Tutucular ve Takımcı Mikroskobu.....	70
6.2.2. Takım Tezgahı, Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı ve Dinamometre .....	71
6.3. TAGUCHI METODU VE OPTİMİZASYONUN UYGULANIŞI.....	74
6.4. TERSİNE MÜHENDİSLİK İLE KESİCİ TAKIMIN MODELLENMESİ .....	76
6.4.1. Kesici Takım Modelinin Hazırlanması.....	76
6.4.2. Tarama Verilerinin Oluşturulması .....	76
6.4.3. 3B Modelin İnşa Edilmesi .....	77
6.5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULANIŞI.....	80
BÖLÜM 7 .....	91
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	91
7.1. KESME KUVVETLERİ .....	93
7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ .....	102
7.3. TAKIM AŞINMASI.....	110
7.4. SEA VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI .....	120
BÖLÜM 8 .....	124
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	124

	<b><u>Sayfa</u></b>
KAYNAKLAR .....	127
ÖZGEÇMİŞ .....	136



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	Amraam 120 ve 9x roket nozülü a) nozül tasarımı ve b) resmi. ....	9
Şekil 2.2.	a) Bir nozülün yapısı ve b) molibdenden üretilmiş bir nozüldeki alüminyum oksit tabakası .....	10
Şekil 2.3.	Molibden alaşımlarının çekme dayanımlarının sıcaklıkla değişimi .....	13
Şekil 3.1.	Freze tezgahı ve kısımları a) yatay başlık ve b) dikey başlık.....	15
Şekil 3.2.	Frezeleme çeşitleri a) çevresel frezeleme ve b) alın frezeleme.....	16
Şekil 3.3.	Frezeleme işleminde a) talaş derinliği ve b) ilerleme hızı. ....	19
Şekil 3.4.	Frezeleme işlemi esnasında oluşan a) kesme kuvvetleri ve b) bileşke kuvvet .....	20
Şekil 3.5.	Kesme bölgesi ısı oluşumu .....	21
Şekil 3.6.	Sağ yan kesici takım geometrisi .....	23
Şekil 3.7.	Bir kesici takımda oluşan aşınmalar .....	34
Şekil 3.8.	Yüzey profili ve merkez çizgisi .....	37
Şekil 5.1.	Daire çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması .....	54
Şekil 5.2.	Ağ yapısı kurulmuş bir milde eleman ve düğüm noktaları. ....	55
Şekil 5.3.	Gerilim – uzama grafiği. ....	57
Şekil 5.4.	Mesh sıklığının sonuçlar üzerindeki etkisi .....	58
Şekil 5.5.	Mesh oluşturma türleri. ....	59
Şekil 5.6.	Değişken mesh yapıları a) bütün yüzeyde eşit, b) bir kenarda sık ve c) köşede sık ve farklı geometride.....	59
Şekil 6.1.	a) Bakalite alma cihazı ve b) bakalite alınmış deney numuneleri. ....	64
Şekil 6.2.	XRF cihazı.....	66
Şekil 6.3.	Optik mikroskop düzeneği. ....	67
Şekil 6.4.	Numunelerinin mikroyapıları a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	67
Şekil 6.5.	Deney numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	69
Şekil 6.6.	a) Alın frezeleme ve b) yanal frezeleme. ....	72
Şekil 6.7.	Kesme kuvvetleri deney düzeneği.....	73
Şekil 6.8.	Deneyde kullanılan dinamometre ve amplifierin teknik özellikleri.....	73

## Sayfa

Şekil 6.9. Dynoware yazılımı ile elde edilen kesme kuvvetleri grafiği.....	74
Şekil 6.10. Tarama süreci görüntüsü. ....	77
Şekil 6.11. Nokta bulutu veri görüntüsü.....	78
Şekil 6.12. Ağ örgü model görüntüsü.....	78
Şekil 6.13. Bölgesel tanımlanmış ağ örgüsü model görüntüsü. ....	79
Şekil 6.14. Tanımlanmış temel yüzey elemanlarının oluşturulması.....	79
Şekil 6.15. 3B model görüntüsü. ....	80
Şekil 6.16. SEA giriş ve çıkış parametreleri .....	80
Şekil 6.17. DeForm – 3D ana ekranı. ....	81
Şekil 6.18. DeForm – 3D birim sistemi ayarlama. ....	82
Şekil 6.19. 3D cutting sekmesi. ....	83
Şekil 6.20. Probleme isim tanımlama.....	83
Şekil 6.21. Birim sistemi seçme arayüzü.....	84
Şekil 6.22. Frezeleme operasyonunu seçimi. ....	85
Şekil 6.23. Frezeleme ayarları. ....	86
Şekil 6.24. İş parçası ve kesici takım hareketleri. ....	86
Şekil 6.25. Kesici takım seçim ekranı. ....	87
Şekil 6.26. Kesici takım konumlandırma ekranı. ....	88
Şekil 6.27. Kesici takım mesh örgüsü. ....	88
Şekil 6.28. İş parçası tasarlama ve konumlandırma. ....	89
Şekil 6.29. İş parçası mesh örgüsü. ....	89
Şekil 6.30. Analiz ayarları ekranı. ....	90
Şekil 7.1. Kesme kuvvetlerinin S/N oranları için ana etki grafikleri a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	94
Şekil 7.2. Kesme hızı – ilerleme miktarı etkileşiminin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.....	95
Şekil 7.3. İlerleme miktarına bağlı kesme kuvvetlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	96
Şekil 7.4. Kesici takımda meydana gelen yapışma a) saf molibden ve b) TZM. ....	97
Şekil 7.5. Kesme hızına bağlı kesme kuvvetlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	101
Şekil 7.6. Saf molibdenin işlenmesinde ölçülen kesme kuvveti grafiği.....	102

Şekil 7.7. Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranları için ana etki grafikleri a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	103
Şekil 7.8. Kesme hızı – ilerleme miktarı etkileşiminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	104
Şekil 7.9. Kesme hızına bağlı yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	105
Şekil 7.10. Saf molibdenin VP15TF kesici takım ile işlenmesi sonucu takım üzerindeki yapışma miktarı a) $V_c$ :75 m/dak b) $V_c$ :150 m/dak ....	107
Şekil 7.11. İlerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC. ....	109
Şekil 7.12. Yan yüzey aşınma değeri. ....	111
Şekil 7.13. Saf molibdenin işlenmesinde oluşan yan yüzey aşınması. ....	112
Şekil 7.14. Kesici takımda oluşan krater aşınması a) TZM ve b) MHC. ....	112
Şekil 7.15. TZM ve MHC işlenmesinde oluşan krater aşınma değeri. ....	113
Şekil 7.16. Saf molibden işlenmesinde kesici takımda oluşan aşınmanın a) SEM görüntüsü ve b) EDX analizi. ....	114
Şekil 7.17. TZM alaşımı işlenmesinde oluşan yan yüzey aşınması. ....	115
Şekil 7.18. MHC alaşımı işlenmesinde oluşan yan yüzey aşınması. ....	115
Şekil 7.19. TZM alaşımı işlenmesinde kesici takımda oluşan aşınmanın a) SEM görüntüsü b) EDX analizi (titanyum) ve c) EDX analizi (molibden). ....	116
Şekil 7.20. MHC alaşımı işlenmesinde kesici takımda oluşan aşınmanın a) SEM görüntüsü ve b) EDX analizi (titanyum) c) EDX analizi (molibden). ....	117
Şekil 7.21. TZM alaşımının işlenmesinde oluşan yapışmanın EDX analizi. ....	118
Şekil 7.22. MHC alaşımının işlenmesinde oluşan yapışmanın EDX analizi. ....	119
Şekil 7.23. MHC alaşımının işlenmesinde oluşan yapışma ve büyüklüğü. ....	120
Şekil 7.24. SEA sonucu elde edilen kesme kuvveti grafikleri. ....	121
Şekil 7.25. Deneysel ve SEA sonucu elde edilen sonuçların karşılaştırması. ....	122
Şekil 7.26. Analiz sürecinde oluşan talaş geometrisi. ....	123
Şekil 7.27. Saf molibden talaşları. ....	123



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Refrakter metallerin bazı uygulama alanları .....	6
Çizelge 2.2. Refrakter metaller ile diğer metallerin karşılaştırılması .....	6
Çizelge 2.3. Sinterlenmiş molibden, AISI 1045 ve Inconel 718 malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması .....	12
Çizelge 3.1. Karbür takımlar için ANSI C – kalite sistemi .....	28
Çizelge 3.2. Karbür takımlar için ISO kalite sistemi .....	28
Çizelge 4.1. Taguchi'nin parametre tasarımı deney örneği .....	48
Çizelge 4.2. Taguchi dikey dizini seçim tablosu .....	49
Çizelge 5.1. Mesh üretiminde kullanılan bazı eleman çeşitleri. ....	58
Çizelge 6.1. İş parçalarının çeşitli özellikleri.....	63
Çizelge 6.2. Sertlik ölçüm değerleri.....	65
Çizelge 6.3. Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi.....	66
Çizelge 6.4. Kesici takımlar ve takım tutucuların teknik özellikleri. ....	70
Çizelge 6.5. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.....	74
Çizelge 6.6. Taguchi L16 dikey dizini.....	75
Çizelge 6.7. SEA için kullanılan hız değerleri.....	85
Çizelge 7.1. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.....	91
Çizelge 7.2. L16 dikey dizinine göre deney sonuçları ve S/N oranları.....	92
Çizelge 7.3. Kesme kuvvetlerinin ortalama S/N oranları için kontrol faktörlerinin önem sırası. ....	94
Çizelge 7.4. Kesme kuvvetlerinin S/N oranlarına göre ANOVA sonuçları.....	98
Çizelge 7.5. Kesme kuvvetleri için doğrulama deneyi sonucu ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması. ....	100
Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülüğünün ortalama S/N oranları ve kontrol faktörlerinin önem sırası. ....	103
Çizelge 7.7. Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranlarına göre ANOVA sonuçları. ....	106
Çizelge 7.8. Yüzey pürüzlülüğü için doğrulama deneyi sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması. ....	108

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 7.9. Yan yüzey aşınma miktarı .....	111
Çizelge 7.10. Krater aşınması miktarı.....	113
Çizelge 7.11. Deneyler sonucu elde edilen kesme kuvvetleri.....	121



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $V_c$  : kesme hızı  
 $D$  : kesici takım çapı  
 $n$  : devir sayısı  
 $F$  : ilerleme hızı  
 $f_z$  : diş başı ilerleme miktarı  
 $f$  : ilerleme miktarı  
 $z$  : kesici takım diş sayısı  
 $a$  : talaş derinliği  
 $a_c$  : talaş kalınlığı  
 $F_c$  : esas kesme kuvveti  
 $F_f$  : ilerleme kuvveti  
 $F_r$  : radyal kuvvet  
 $F_R$  : bileşke kuvvet  
 $\gamma$  : boşluk açısı  
 $\theta$  : kama açısı  
 $\alpha$  : talaş açısı  
 $r$  : kesici takım uç yarıçapı  
 $R_a$  : ortalama yüzey pürüzlülük değeri  
 $\sigma$  : gerilim  
 $\varepsilon$  : uzama % (gerinim)  
 $E$  : elastikiyet modülü  
 $CI$  : güven aralığı  
 $\eta_{eff}$  : deney tekrar sayısı  
 $v_e$  : hata varyansı

## KISALTMALAR

TZM	: Titanyum – Zirkonyum – Molibden
MHC	: Molibden – Hafniyum – Karbon
ANOVA	: Varyans Analizi
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
BHN	: Brinell Sertlik Değeri
AISI	: Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
ASTM	: Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
DIN	: Alman Endüstri Normları (Deutch Industrie Normen)
EN	: Avrupa Normu
TS	: Türk Standardı
PCD	: Çok Kristalli Elmas
CBN	: Kübik Bor Nitrür
WC	: Wolfram (Sementit) Karbür
IMOA	: Uluslararası Molibden Birliği
XRF	: X – ışını Floresan Spektrometresi
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
EDX	: Enerji Dağılımlı X – ışını Spektrometresi
Kt	: Kesici Takım
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	: Bilgisayar Destekli İmalat
RE	: Tersine Mühendislik
STL	: 3 Boyutlu Dosya Formatı
SD	: Serbestlik Derecesi
KT	: Kareler Toplamı
KO	: Kareler Ortalaması

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

İleri mühendislik uygulamalarında kullanılan ve refrakter metallere olan molibden, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek elastiklik modülü, ısı şoklarına karşı yüksek direnç, iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir [1,2]. Birçok yapısal uygulamada bileşenler sıcaklık değişimlerine büzülerek veya genişerek tepki gösterirler. Bu durum, karmaşık geometrideki bileşenlerin istenmeyen ısı gerilme ve yüklere maruz kalmasına ve ömürlerinin kısılmasına neden olur [3]. Molibden yüksek ergime noktası, yüksek ısı iletkenliği, yüksek elastiklik modülü ve düşük ısı genişeme katsayısı ile karakterize edilir [4]. Havacılık, savunma, nükleer ve elektronik sanayilerindeki gelişmelerle beraber, oda sıcaklığında yüksek mekanik özellikler sağlama ve artan sıcaklık koşullarında bu özelliklerini önemli ölçüde koruması nedeniyle molibden talebinde artışlar yaşanmaktadır. Molibdene çok küçük miktarlarda titanyum ve zirkonyum ilavesi ile meydana gelen TZM, 1200 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sürünme direnci sağlar [5]. Molibden esaslı alaşımlardan olan TZM nükleer enerji ve havacılık sistemleri için bilinen en iyi alaşımlardan biridir [6]. Molibden esaslı diğer bir malzeme olan MHC alaşımı yüksek sürünme direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı ile bilinir. MHC alaşımının yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik davranışı, yapısındaki hafniyum karbürlerden kaynaklanır [7]. MHC alaşımı izotermal dövme kalıplarında ve sıcak metal ekstrüzyon kalıplarında kalıp malzemesi olarak kullanılır. Son zamanlarda X – ray tüplerinde de kullanılmaktadır [8].

Molibden, roket endüstrisinde, nozüller gibi yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların üretilmesinde çok önemli bir yer tutar. Roketlerin yönlendirme ve destek kanatlarında, ısı/radyasyon kanallarında, ısı emiciler, türbin tekerlekleri ve pompalar gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan yapısal parçaların üretiminde önemli rol oynar. Molibden alaşımları, sıcak sertlikleri, yüksek yeniden kristalleşme sıcaklıkları ve

termal döngüden sonra mekanik özelliklerini koruyabilmeleri nedeniyle havacılık ve uzay sanayisinde kullanımları uygundur [9].

Molibden ve molibden esaslı alaşımlar, üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı işlenmesi genellikle güç malzemelerdir. Saf molibdenin işlenmesini etkileyen en önemli özellik tane yapısıdır. Molibden başlangıçta nispeten kolay işlenir ancak ilk işlemeden sonra işleme zorlaşmaya başlar. Molibden işlenirken kırılma eğilimine girer. İş parçası sıkıca bağlanmalı, kesici takım rijit bir şekilde desteklenmeli ve takım tezgâhı yeterince güçlü olmalıdır [2]. Molibden ve alaşımlarının işlenmesi diğer metal ve alaşımlarının işlenmesi sürecine benzer. Çok basit parçalardan, çok karmaşık parçalara kadar istenilen ölçü ve toleranslarda işlem yapmak mümkündür. Elde edilen yüzeyin kalitesi, yüksek hız çelikleri ve karbür takımlar arasında seçim yapmaya bağlıdır. Her iki durumda da takım ömrü çeliklerin işlenmesindeki takım ömründen daha kısadır. Çünkü molibden, aynı sertlikteki çeliklerden daha fazla kesici takımı aşındırmaya meyillidir. Yüksek hız çelikleri, genellikle düşük yüzey kaliteleri veya kaba işlemlerde kullanılır. İyi yüzey kaliteleri ve sıkı toleranslar için karbür takımlar tercih edilir. Frezeleme işlemlerinde genellikle C2 kalitesindeki karbür takımlar tercih edilir. Molibden için kullanılan kesici takım malzemesi dökme demirler için kullanılanlarla da benzerlik gösterir. Molibden ve alaşımlarının üreticilerinden biri olan ED FAGAN şirketinin 2016 yılında yayınlamış olduğu bir bültende, molibden ve alaşımlarının aynı sertlikteki çelikten daha fazla aşındırıcı olduğu ve az sayıda parça üretimi ve kaba işlemler için yüksek hız çeliği takımların kullanılabilmesi belirtilmiştir. Bu bültende ayrıca bitirme tornalama ve frezeleme işlemlerinin C2 kalite karbür ve kaba tornalama, delme, rayba çekme, kılavuz çekme ve vida açma işlemlerinin yüksek hız çeliği ve C2 kalite karbür takımlarla yapılması önerilmiştir [10].

Oldukça yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanım ve korozyon direnci gereksinimi olduğu zaman, niobyum, tantal, tungsten ve molibden gibi refrakter malzemeler kullanılır. Ancak, refrakter malzemelerin işlenmesi üstün özelliklerinden dolayı zordur ve bunların işlenmesi hakkında bilgiler literatürde nadir bulunmaktadır. Sortino vd. tarafından yapılan kapsamlı bir çalışmada, sinterlenmiş molibden kesme sıvısı kullanılmadan bitirme yüzeyleri için tornalama işlemine tabi tutulmuştur.

Seramik, sermet ve karbürlerden oluşan çeşitli kesici takımlar seçilmiştir. Tornalama deneyleri sabit talaş derinliği, sabit ilerleme değeri ve farklı kesme hızlarında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım aşınması incelenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucu seramik ve sermet takımların yüksek kırılma dayanıklılıkları nedeniyle molibdenin işlenmesinde uygun olmadığı görülmüştür. Farklı geometri ve farklı kalitelerde seçilen karbür takımların çoğunun da uygun olmadığı görülmüştür. İyi yüzey kalitesi ve tatmin edici takım ömrünün nispeten yüksek kesme hızlarında kesme sıvısı kullanılmadan orta seviyede kobalt birleştirici içeren ve çok ince taneli WC takımlarla elde edilebildiği görülmüştür. Artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülük değeri önemli derecede düşmüştür. Benzer şekilde kesme kuvveti de artan kesme hızıyla düşmüştür. Düşük kesme hızlarında kesici takım talaş yüzeyine iş parçası malzemesinin önemli miktarda yapıştığı gözlenmiştir. Pozitif talaş açılara sahip kesici takımlar düşük kesme hızları da dâhil tüm kesme hızlarında iyi bir performans sergilemişlerdir. Sinterlenmiş molibdenin tornalama yöntemiyle işlenmesinde pozitif talaş açısına sahip, kesici ucu az miktarda yuvarlatılmış, ince katmanlı kaplamaya sahip ve yüzeyi parlatılmış orta derecede kobalt birleştirici içeren, çok ince taneli karbür kesici takımların kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır [11].

Talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri işlenen parça boyutları, ısı oluşumu, takım ömrü ve yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, yüksek kesme kuvvetleri işlem esnasında iş parçasının kırılmasına veya ciddi olarak deforme olmasına da neden olabilir. Bu durum, özellikle molibden gibi çok pahalı malzemelerde ciddi maliyet artışlarına neden olur. Önemli bir yüzey kalite göstergesi olan yüzey pürüzlülük değeri de bileşenlerin kalitesini etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Yüzey pürüzlülük değeri bileşenlerin sürtünme, aşınma, korozyon ve yorulma ömürleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Talaşlı imalat işlemleri esnasında oluşan kuvvetlerin ve işlenen parçaların yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük olması istenir. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri iş parçası malzemesi, kesici takım ve kesme parametrelerine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla, düşük kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerini sağlayan kesici takım ve işleme koşullarının belirlenmesi yüksek kaliteli bileşenlerin düşük maliyette üretilmesi için önemlidir [12-14].

Yapılan literatür taramasından molibden ve alaşımlarının talaşlı imalatı ile ilgili çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde uygun kesici takım ve kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu alaşımların frezelenmesi sonucu oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel tasarımında Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kesme parametrelerinin önem seviyelerini belirlemek için ANOVA yapılmıştır.

Talaşlı imalat, takım tezgâhı, kesici takım/malzeme çifti ve insan unsurları ile gerçekleştirilmektedir [15]. Kesme işleminin doğru analiz edilebilmesi için, işlemeden önce, işleme sırasında ve işleme sonrasında gözlemlerin yapılması gerekir [16]. Günümüzde yüksek kapasiteli bilgisayarların mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılması ile gerçekleştirilen gözlemler ve yaklaşık çözüm yöntemleri büyük önem kazanmıştır. Yaklaşık çözüm yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi, yüksek doğrulukta sonuçlar veren sayısal bir yöntemdir [17-19]. Bu çalışmada ayrıca sonlu elemanlar analizi ile ticari saflıktaki molibdenin frezelenmesinde oluşan kesme kuvvetlerinin önceden tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır.



## BÖLÜM 2

### REFRAKTER METALLER

Refrakter metaller için değişik kaynaklarda farklı tanımlamalar yapılmıştır. Refrakter Metaller ve Sert Maddeler Uluslararası Dergisi (IJRMHM), refrakter metalleri ergime noktası 1800 °C'den yüksek olan metaller olarak tanımlar. Bunlar, tungsten, molibden, krom, tantal, niobyum, hafniyum ve renyumun elementlerinin yanı sıra, bunların bileşik ve alaşımlarıdır [20]. Bununla birlikte, American Society for Metals (ASM) tarafından yayınlanan Metaller El Kitabı'na göre, refrakter metaller ergime sıcaklıkları demir, kobalt ve nikel aralığının üzerinde olan metallerdir [21].

Refrakter metaller, genel olarak, yüksek ergime noktasına ve yüksek sıcaklıklarda mükemmel ısıl, kimyasal ve aşınma direncine sahip metaller ve onların alaşımları olarak tanımlanabilir. Bunlar niobyum (Nb), molibden (Mo), tantal (Ta), tungsten (W) ve renyum (Re) metallere aittir [22].

#### 2.1. REFRAKTER METALLERE GİRİŞ

Refrakter metaller; niobyum (Nb), tantal (Ta) molibden (Mo), tungsten (W) ve renyum (Re) metallerini içermektedir. Osmiyum ve iridyumdan sonra en yüksek ergime derecelerine sahip metallerdir. Oksitleyici ortamlarda orta seviyelerdeki sıcaklıklarda bile kolaylıkla bozunurlar. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda veya oksitleyici olmayan yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılmaları uygundur. Yüksek sıcaklık dayanımları bakımından diğer birçok metal ve alaşımlarından daha iyidirler. Refrakter metaller önceleri lamba filamanları, elektron tüp bileşenleri ve elektrik kontakları gibi parçaları imal etmek için kullanılmıştır. Teknolojik ilerlemelerle birlikte günümüzde roket motorlarında, gaz türbinlerinde, havacılık ve uzay uygulamalarında, elektronik, nükleer enerji ve kimya sanayilerinde, kesici takım ve kalıp malzemeleri olarak kullanım alanları bulmuşlardır [12,21].

Çizelge 2.1’de refrakter metallerin bazı uygulama alanları, Çizelge 2.2’de ise refrakter metaller ile ticari olarak yaygın kullanılan metallerin temel bazı özellikleri yaklaşık değerlerde karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.1. Refrakter metallerin bazı uygulama alanları [21].

Uygulama	Tungsten (Volfram) (W)	Molibden (Mo)	Tantal (Ta)	Niobyum (Kolombiyum) (Nb)	Renyum (Re)
Elektronik	X	X	X	X	X
Alaşım	X	X	X	X	X
Nükleer güç	X	X		X	
Havacılık	X	X	X	X	
Kimyasallar	X	X	X		X
Metal kesme ve şekillendirme	X	X	X		
Mekanik parçalar	X	X			
Madencilik petrol sondaj	X				

Çizelge 2.2. Refrakter metaller ile diğer metallerin karşılaştırılması [21,23].

Özellik	Niobyum (Nb)	Tantal (Ta)	Molibden (Mo)	Tungsten (W)	Renyum (Re)	Demir (%1 C) (Fe)	Bakır (Cu)	Alüminyum (Al)
Atom numarası	41	73	42	74	75	26	29	13
Atom ağırlığı	92,91	180,95	95,94	183,85	186,31	55,85	8,93	26,98
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) (20 °C)	8,57	16,65	10,22	19,25	21,04	7,87	8,93	2,7
Kristal yapı	HMKY	HMKY	HMKY	HMKY	HSPY	HMKY	YMKY	YMKY
Ergime sıcaklığı (°C)	2468	2996	2617	3410	3180	1538	1085	660
Kaynama sıcaklığı (°C)	4927	5427	5560	5700	5760	2861	2562	2519
Isıl genişleme katsayısı (µm/mK) (20 °C)	7,3	6,5	4,9	4,6	6,7	11,8	16,5	23,6
Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) (20 °C)	52,3	54,4	138	163,3	39,6	76,2	385	210
Sertlik (BSD)	76	95	225	294	165	146	45	13
Akma gerilmesi (MPa)	207	180	550	750	290	280	33,3	152
Çekme gerilmesi (MPa)	300	275	650	980	1070	380	210	310
Elastikiyet modülü (Gpa)	103	185	324	400	469	200	110	68
Poisson oranı (25 °C)	0,38	0,35	0,32	0,28	0,49	0,29	0,34	0,36

## 2.2. TUNGSTEN (VOLFRAM) (W)

Tungsten beyazımsı gri renkli, eşsiz özelliklere sahip bir metaldir. 3410 °C ile en yüksek ergime noktasına sahip elementtir. Aynı zamanda paslanmaya çok dayanıklı olan tungsten 1650 °C ’nin üstünde en yüksek akma mukavemeti olan metaldir.

Tungstenin çok geniş ticari, endüstriyel ve askeri uygulama alanları vardır. Saf tungsten vakum ortamında ve asal gazlar içinde 2400 °C'ye kadar dayanıklılığını korur ve bu nedenle de elektrik ampullerinde, elektrik bağlantı yerlerinde ve X – ışını tüplerinde kullanılır. Tungsten alaşımları ( Cr, Ni, V, Co, Mo ile yapılan alaşımları) yüksek hızlarda kesme yapan kesici takımlar, valf, yay, buji üretiminde, ticari saflıktaki tungsten ise galvanometre, teleskop, yay, jilet, piyano teli, ısıtma elemanı, termostat yapımında kullanılır [24].

### **2.3. TANTAL (Ta)**

Tantal periyodik tablonun 73 numaralı elementidir. Ergime sıcaklığı 2996 °C ve yoğunluğu 16,65 g/cm<sup>3</sup>'tür. Tantal en iyi refrakter malzemelerden biridir ve sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellik nedeniyle önemli bir malzemedir. Tantal ve alaşımlarının yoğunlukları ve ergime sıcaklıkları değer olarak tungsten ve molibden'in yoğunluğunun ve ergime sıcaklığının arasında bir değerdedir. Tantal elektronik parçalar, kimyasal cihazlar, roketler ve nükleer reaktörlerde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektronik endüstrisi, kapasitör üretiminde tantaldan en çok faydalanan sektördür. Tantal korozif sıvılar için valflerin üretiminde ve roket motorlarında ısı başlığı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca tantal, radyasyon başlığı olarak kullanılmaktadır. Tantal asitlere ve sıvı metallere karşı oldukça dayanıklıdır. Asitlere karşı direnci caminkine eşittir ve sıvı metallere karşı 899 °C'a kadar dayanıklıdır [25].

### **2.4. NİOBYUM (KOLONBİYUM) (Nb)**

Niobyum (Nb) parlak beyaz renkte, yumuşak ve ısıya dayanıklı bir elementtir. Kimyasal ve fiziksel özellikleri tantal'a benzemesinden dolayı birbirilerini ayırmak oldukça zor olmakla birlikte oda şartlarında niobyum pek çok asit ve alkilerle çözülemezler. Niobyum metalinin ergime sıcaklığı 2468 °C ve yoğunluğu 8,57 g/cm<sup>3</sup>'tür. Yüksek sıcaklıklarda oksijen, karbon, azot, sülfür ve halojenler ile etkileşime girmekte ve işlem sırasında çevresindeki atmosfer çeşitli dış etkilere karşı korunmalıdır. Niobyum alerjik veya daha farklı sağlık problemlerine sebep olmadığından ötürü takılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Niobyum pek çok kimyasal

etkiye karşı oldukça dayanıklı bir metaldir. Niobyum genellikle alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Örneğin, çeliğe katılması ile çeliğin sertliğini aşırı miktarda artırmaktadır. Bu çeşit çelikler nükleer reaktörlerin yapımında kullanılmaktadır. Niobyum alaşımlı çeliğin kullanımı günümüzde uçaklarda ve uzay mekiklerinde giderek artmaktadır. Ayrıca niobyum alaşımları, neredeyse elektrik akımına karşı bir direncin olmadığı süper iletken mıknatısların üretiminde de kullanılmaktadır [26].

## **2.5. RENYUM (Re)**

Renyum gümüş – beyaz renge katı ve gri – siyah renge toz halinde görülmektedir. Tungstenden sonra ikinci en yüksek ergime sıcaklığına sahip metaldir (3180 °C) Oda sıcaklığındaki sünekliğinin mükemmel olması ile aşınmaya ve korozyona karşı dayanıklılığı oldukça yüksektir. Sünek – gevrek geçiş sıcaklığı olmayan renyum, her sıcaklık aralığında tokluk davranışı sergiler. Renyum refrakter metaller içerisinde yüksek sıcaklıkta en yüksek çekme mukavemeti (1070 MPa) ve sürünme direncine sahip metaldir. Doğada nadir olarak karşılaşılan bu elementin ekonomik değeri oldukça yüksektir. Talaşlı imalatla, döküm yöntemleri ile şekillendirilmeye uygun olmayan renyumun kullanım alanları da sınırlıdır. Toz metalurjisi ve buhar fazından biriktirme yöntemleri kullanılarak parça üretimleri gerçekleştirilir [27].

## **2.6. MOLİBDEN (Mo)**

Molibden gümüş beyazı renge, atom numarası 42, atom ağırlığı 95,94 ve yoğunluğu 10,22 g/cm<sup>3</sup> olan bir metalik elementtir. Molibden, yüksek karbür oluşturma eğilimi nedeniyle çeliklerin çeşitli özellikleri üzerinde önemli bir rol oynar. Yüksek bir ergime noktasına (2617 °C) sahip olan molibden, aynı zamanda yüksek elastikiyet modülüne, yüksek ısı ve elektrik iletkenliğe, yüksek ısı şok direncine ve saf metaller arasında da en düşük ısı genleşmeye sahiptir. Molibden özel çeliklerde, pik demirlerde, nikel, kobalt ve titanyum bazlı alaşımlarda kullanılan ve fiyatı etkileyen bir alaşım elementidir [28]. Son yıllarda takım çeliklerinde tungsten yerine molibden kullanılarak kullanım alanı genişlemektedir [24].

### 2.6.1. Molibden Alaşımları

Molibden ve alaşımları, roket endüstrisinde, nozüller gibi yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların üretilmesinde çok önemli bir yer tutar. Roketlerin yönlendirme ve destek kanatlarında, ısı/radyasyon kanallarında, ısı emiciler, türbin tekerlekleri ve pompalar gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan yapısal parçaların üretiminde önemli rol oynar. Molibden alaşımları, ısıl sertlikleri, yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı ve termal döngüden sonra mekanik özelliklerini koruyabilmeleri nedeniyle havacılık ve uzay uygulamaları için uygundur. Hastelloy gibi bazı molibden içeren alaşımlar, ısı ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır [21].

Molibden ve alaşımları havacılık ve uzay, savunma ve elektronik gibi alanlarda kritik öneme sahip bileşenlerin yapımında kullanılmaktadır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de molibden alaşımından üretilmiş çeşitli parçalar gösterilmiştir.



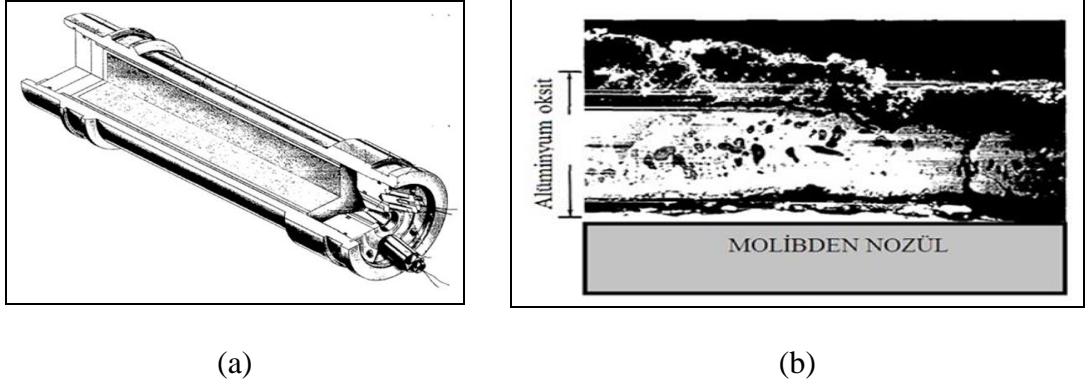
(a)



(b)

Şekil 2.1. Amraam 120 ve 9x roket nozülü a) nozül tasarımı ve b) resmi.

Aynı zamanda molibden, kesici takımlarda da önemli bir alaşım elementi olarak da kullanılır. M kalite (molibden takviyeli HSS) yüksek hız çelikleri (high speed steel – HSS) W (%6) ve Mo (%5) elementlerinin teşekkülünden meydana gelir. Yüksek hız çeliklerinde molibden ilavesi ile takımın sıcak sertliği artırılır ve abrasiv aşınma direncini yükseltirler [13].



Şekil 2.2. a) Bir nozülün yapısı ve b) molibdenden üretilmiş bir nozüldeki alüminyum oksit tabakası [32].

Dünyada üretilen molibdenin üçte ikisinden fazlası alaşımlamada kullanılır. Bu alaşımlardan en önemlileri; yüksek mukavemetli alaşımlar ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı çelikleridir. Molibden, uçak ve füze parçalarının yapımında ve ayrıca filamanlarda kullanılır [29].

Molibden ve alaşımları, toz metalurjisi ve ingot döküm yöntemiyle üretilmektedir. Her iki durumda da kütük malzeme üretilebilmektedir. Molibden 360 – alaşımsız vakum ortamında döküm yöntemi ile, Molibden 361 – alaşımsız toz metalurjisi yöntemi ile, Molibden 363 – TZM alaşımı vakum ortamında döküm yöntemi ile, Molibden 364 – TZM toz metalurjisi yöntemi ile, Molibden 365 – Düşük karbonlu vakum ortamında döküm yöntemi ile, Molibden 366 – %30 tungsten ile vakum ortamında döküm yöntemi ile üretim ve alaşımlama biçimlerine göre sınıflandırılır [30].

Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan molibden alaşımları; ticari saflıktaki molibden, TZM (Ti-Zr-Mo), MHC (Mo-Hf-C), Mo-W, Mo-Re, Mo-Al, Mo-Ta, Mo-Nb, Mo-Ni, Mo-Cu, Mo-Ti, Mo-Na, Mo-C gibi sıralanabilir [31].

Molibden sağlık sektöründe (diş implantı, kol ve bacak eklemlerinde) kobalt alaşımlı biyomalzemelerde alaşım elementi olarak da kullanılmaktadır [33]. Havacılık, savunma, nükleer ve elektronik sanayilerindeki gelişmelerle beraber, yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik özellikler sağlaması nedeniyle kullanımı her geçen gün

artmakta ve molibden talebinde artışlar yaşanmaktadır. Yapılan araştırmalar, insan sağlığı üzerinde tehdit edici zararlarının olmadığını ortaya koymaktadır [34].

### **2.6.2. Ticari Saflıktaki Molibden**

Ticari saflıktaki molibden > %99,97 oranında molibden içerir. Elastikiyet modülü 320 – 330 GPa, poisson oranı 0,38'dir. Çekme gerilmesi 600 – 650 MPa ve akma gerilmesi ise 450 – 550 MPa'dır. Ortalama sertlik değeri 225 BHN seviyelerindedir [35].

Çizelge 2.3'te sinterlenmiş saf molibden, AISI 1045 ve Inconel 718 malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Burada, molibdenin ticari karbon çelikleriyle karşılaştırıldığında elastikiyet modülünün önemli ölçüde yüksek olduğu açıkça görülür. Ancak en önemli özelliği artan sıcaklığa karşın sertlik değerini muhafaza edebilmesidir. Maliyet açısından karşılaştırıldığında; molibdenin, karbon çeliklerinden 65 kat daha pahalı olduğu görülür [11].

Döküm ve toz metalurjisi yöntemleriyle üretimleri gerçekleştirilir. Isıl radyasyon direncinden dolayı yüksek ergitme fırınlarında, silah sanayinde roket nozülleri ve yönlendirme kanatçıklarında, elektrik alanında aydınlatma grupları gibi uygulama alanları vardır [29,31].

Ticari saflıktaki molibden, tel, şerit, çubuk veya levha şeklinde ısıtma gereçlerinin yapımında, yüksek sıcaklık fırınlarının kritik parçalarının (1700 °C'nin üzerine çıkılabilir) üretiminde kullanılır. Koruyucu atmosfer kullanılmazsa karbon ve oksijen ile etkileşime girer. Elektrik ve elektronik endüstrileri için filaman, elektrot, lamba yuvaları, valfler ve redresör lambalarının üretimlerinde yer alır [29,31,34].

Çizelge 2.3. Sinterlenmiş molibden, AISI 1045 ve Inconel 718 malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması [11].

Özellik	AISI 1045	Inconel 718	Sinterlenmiş Mo
Kimyasal içerik (ağırlıkça %)	C 0,42-0,50; Si ≤ 0,40; Mn 0,65; Cr ≤ 0,40; Ni ≤ 0,40; Mo ≤ 0,10; Cr + Mo + Ni ≤ 0,63	C ≤ 0,08; Mn ≤ 0,35; Si ≤ 0,35; Cr 17-21; Ni 50-55; Ti 0.65-1.15; Al 0,2-0,8; Co ≤ 1; Fe(kalan)	Mo 99.97
Sıcaklıktaki yoğunluğu (20 °C) (g/cm <sup>3</sup> )	7,85	8,20	10,22
Ergime sıcaklığı (°C)	1350	1336	2617
Yeniden kristalleşme sıcaklığı (°C)	540-675	>850	800-1200
Elastikiyet modülü (E) (GPa)	210	205	320-340
Akma gerilmesi (MPa)	300-450	550-1000	350-700
Çekme gerilmesi (MPa)	570-800	800-1450	450-850
Brinell sertliği (BSD)	170-230	250-400	200-230
Uzama (%)	16	5-20	<30
Isıl genişleme katsayısı (20 °C) ( W/(mK) )	11,5	13	5,2
Isı iletkenlik katsayısı (20 °C) ( μm/(°mK) )	46-52	11.2	140
Isıl kapasite (20 °C) ( J/(kgK) )	480	435	254
Kesme kuvveti (N)	2000-2600	2500-5000	2500-4500
Son tornalamada tavsiye edilen kesme hızı (m/dak)	350-500 (sementit karbür) 400-650 (Sermet)	40-90 (sementit karbür) 150-220 (seramik veya CBN)	<140 (sementit karbür)
Yaklaşık maliyet	1	≈ 2,5	≈ 65

### 2.6.3. Titanyum – Zirkonyum – Molibden (TZM) Alaşımı

Kısa gösterilişi TZM olup %0,5 – 1,2 oranlarında titanyum (Ti) ve %0,08 – 0,5 zirkonyum (Zr) içeren molibden alaşımıdır. Molibdene çok küçük miktarlarda titanyum ve zirkonyum ilavesi ile meydana gelen TZM, 1200 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sürünme direnci sağlar [4]. Molibden esaslı alaşımların en başında gelen TZM nükleer enerji ve havacılık sistemleri için bilinen en iyi refrakter alaşımlardan biridir [5].

Döküm ve toz metalurjisi yöntemleriyle üretimleri gerçekleştirilir. Silah sanayinde roket nozülleri ve yönlendirme kanatçıklarında, izotermal dövme kalıplarında ve aksesuarlarının yapımında, enjeksiyon kalıplarında, X – ray ışınlarından koruma malzemelerinde, metal işleme takımlarında kullanılır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı 1400 °C'dir [29,31].

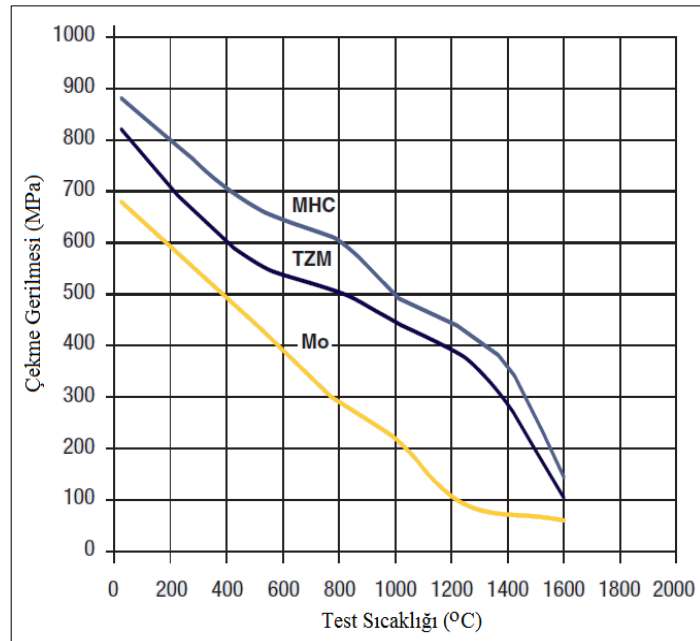


Majundar vd. TZM alaşımının özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada Mo – 0,5Ti – 0,1Zr – 0,02C içerikli bir TZM alaşımını toz metalurjisi yöntemiyle üretmişler ve ürettikleri yeni TZM alaşımının oksidasyon direncinde artış gzlelemişlerdir [36].

#### 2.6.4. Molibden – Hafniyum – Karbon (MHC) Alaşımı

Kısa gösterilişi MHC olup %0,8 – 1,5 oranlarında hafniyum (Hf) ve %0,05 – 0,15 arasında da karbon içeren molibden alaşımıdır. Yüksek sıcaklık dayanımı ve sürünme dayanımını TZM alaşımından daha yüksektir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı 1550 C civarlarındadır. Döküm ve toz metalurjisi yöntemleriyle parça üretimleri gerçekleştirilir. İzotermal dövme kalıpları, sıcak metal ekstrüzyon kalıplarında kalıp malzemesi olarak, bu kalıpların aksesuarlarının yapımında ve metal işleme takımlarında kullanılır. Son zamanlarda X – ray tüplerinde de kullanılmaktadır [7,29,31]. MHC alaşımının yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik davranışı, yapısındaki hafniyum karbürlerden kaynaklanır [6].

şekil 2.3'te ticari saflıktaki Mo, TZM ve MHC alaşımlarının çekme dayanımları karşılaştırmalı bir şekilde sıcaklığa bağlı olarak verilmektedir.



şekil 2.3. Molibden alaşımlarının çekme dayanımlarının sıcaklıkla değişimi [31]

## BÖLÜM 3

### TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

Talaşlı imalat, bir iş parçasının yapım resmi referans alınarak, parça üzerindeki fazlalıkların talaş şeklinde kaldırılarak istenilen geometrik şekli elde etme işlemidir. Bu şekil verme işlemi, uygun kesici takım ve takım tezgâhları aracılığıyla yapılır. Kullanılan kesici takımların ve/veya iş parçasının birbirlerine göre izafi hareketi sağlanarak, oluşturulan gerilimler yoluyla iş parçası üzerinden parça kaldırmak suretiyle yapılan bu üretim şeklinin farklı çeşitleri bulunmaktadır. Tornalama, frezeleme ve delme, talaşlı üretimin temel yöntemleridir.

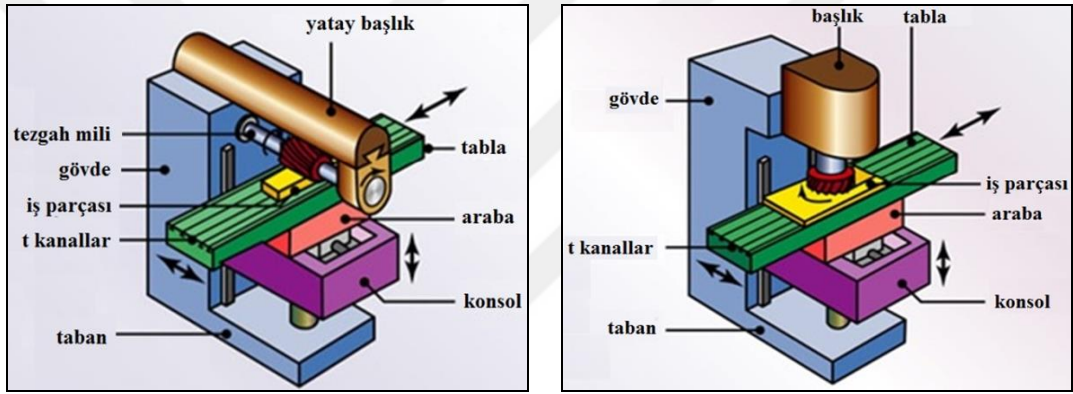
#### 3.1. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ

Talaşlı imalat olarak tanımlanan metal kesme işlemi en önemli imalat yöntemlerinden biridir. Döküm, dövme, haddeleme ve diğer şekillendirme yöntemleriyle üretilmiş mühendislik malzemelerinin kullanıma hazır hale getirilmesi için çoğunlukla talaşlı imalat işlemine maruz kalmaları gerekir. Talaşlı imalat işleminde iş parçasını istenilen geometriye getirmek için üzerindeki fazlalıklar, talaş şeklinde uygun takım tezgâhı ve kesici takım kullanılarak uzaklaştırılır ve istenilen boyutlar ve yüzey kalitesinin elde edilmesi amaçlanır. Talaşlı imalat işlemleriyle endüstrinin birçok uygulama alanında ürünlere kullanıma hazır son şekilleri verilir [37].

Talaşlı imalat işleminde iş parçası malzemelerinin işlenebilirliğinin ve kesici takımların kesme performanslarının artırılması çok sayıda bilimsel araştırmanın konusu olmuştur. Geleneksel malzemelere göre üstün özelliklere sahip yeni yüksek performanslı malzemelerin ve alaşımların (örnek olarak, süper alaşımlar, kompozit ve refrakter malzemeler) geliştirilmesi araştırmacıları bu yeni geliştirilen malzemelerin işlenebilirlik problemlerine yönlendirmiştir [37].

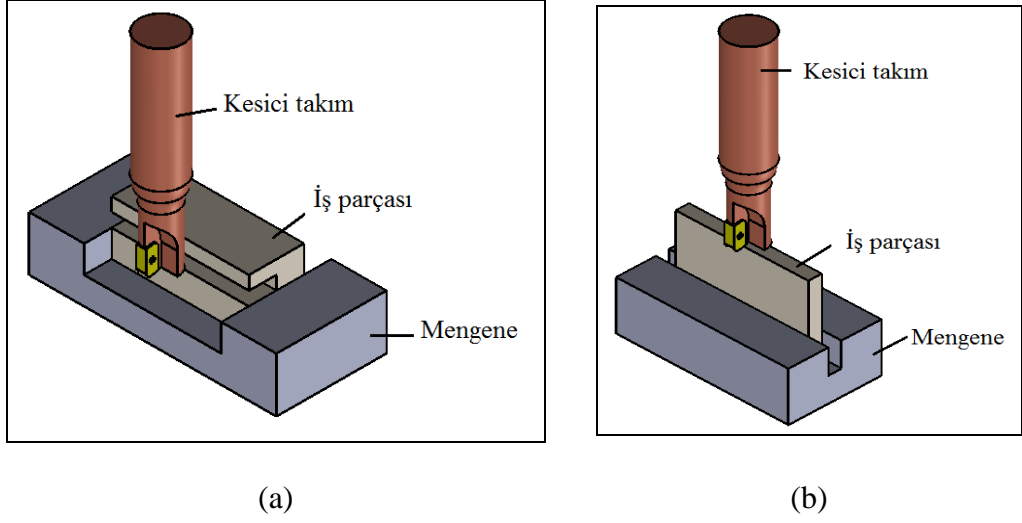
Şekillendirilebilmeleri zor olan refrakter malzemelerin kullanımı gelişen teknolojiyle artmış olmasına rağmen bunların işlenmesi hakkında bilgiler literatürde nadir olarak bulunmaktadır [11].

Frezeleme, kesici takımın kendi ekseninde dönmesi ve parçanın ilerleme hareketi yapması ile gerçekleşen bir işlemdir. Frezeleme, makine, otomotiv ve uçak endüstrisinde büyük bir öneme sahiptir. Frezeleme ile düzlem, eğik, dairesel ve çeşitli profildeki yüzeylerle, vidalar, dişli çarklar ve kanallar istenilen tamlık derecesinde seri olarak yapılabilir [38]. Şekil 3.1’de bir freze tezgahının kısımları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Freze tezgahı ve kısımları a) yatay başlık ve b) dikey başlık.

İşlenecek parçanın geometrisine bağlı olarak çeşitli frezeleme yöntemleri (düzlem frezeleme ve yanal frezeleme) geliştirilmiştir. Düzlem frezeleme, frezeleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Takım ekseninde işlenen malzemeye dik olup, kesme işlemi kesici uçların ucu ve/veya yan kenarı ile yapılır ve iki ardışık eğri ile kuşatılmış bir yay şeklinde teşekkül eder [39]. Şekil 3.2’de frezeleme işlemlerinin çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Frezeleme çeşitleri a) çevresel frezeleme ve b) alın frezeleme.

### 3.1.1. Talaşlı İmalat İşlemlerinde Değişkenler (Parametreler)

Başarılı bir talaşlı imalat işlemi için; iş parçasına uygun bir takım tezgâhı seçmek, işlem esnasında iş parçasını yeterli rijitlikte tutulabilmesi için bir iş parçası bağlama sistemi kurmak, işlenecek parçadan talaş kaldırabilecek, istenilen geometri ve yüzey kalitesini sağlayabilecek kesici takımların ve işlem değişkenlerinin seçimine bağlıdır. Bunların uygun seçilmemesi durumunda iş parçasının istenilen geometri ve yüzey kalitesinde olmaması, kesici takımın hızlı aşınması ve yüksek işleme maliyeti gibi problemlerle karşılaşılır.

Talaşlı imalat işlemlerinde işleme maliyetine nihai ürün kalitesi üzerinde etkisi olan değişkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Takım malzemesi ve takımın durumu,
- Takım şekli, yüzeylerinin durumu ve keskinliği,
- İş parçası malzemesi ve durumu,
- Kesme hızı ve talaş derinliği gibi kesme parametreleri,
- Kesme sıvısının kullanılması,
- Rijitlik ve sönümlenme kabiliyeti gibi takım tezgâhının özellikleridir [40].

### 3.1.2. Kesme Hızı ( $V_c$ )

Bir freze takımının, çevresindeki kesen bir dişin (noktanın) bir dakikada metre cinsinden keserek aldığı yol kesme hızı olarak tanımlanır. Kesme hızı Eşitlik 3.1’de verilen formül ve birimlerle ifade edilir.

$$V_c = \pi Dn / 1000 \quad (3.1)$$

$V_c$  : Kesme hızı (m/dak)

$D$  : Takım çapı (mm)

$n$  : Devir sayısı (dev/dak)

Uygun kesme hızının seçilmesi takım ömrü ve işleme zamanı açısından önemlidir. Kesici takım düşük kesme hızlarında kullanıldığında işleme süresi artacağından dolayı zaman kaybı olur ve ilave olarak kesme kuvvetleri yüksek olacağı için kesici takım ve iş parçasında daha çok eğilmeye neden olur, yüksek hızda ise sürtünme ve ısıdan dolayı takım çabuk aşınır [41]. Bir malzemeyi işlemek için uygun kesme hızının belirlenmesinde; iş parçası malzemesi, kesici takım malzemesi, istenilen bitirme yüzeyi, tezgâh ve bağlama elemanlarının rijitliği gibi faktörler dikkate alınmalıdır [42].

### 3.1.3. İlerleme Hızı ( $F$ )

Kesme hızı ve ilerleme hızı birbirine sıkı bir şekilde ilişkilidir. İlerleme hızı; kesmek üzere döndürülen freze takımının altından, iş parçasının bir dakikada milimetre cinsinden aldığı yoldur. İlerleme hızı Eşitlik 3.2’de verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$F = f_z z n \quad (3.2)$$

$F$  : İlerleme hızı (mm/dak)

$f_z$  : Diş başına ilerleme miktarı (mm/dev)

$z$  : Kesici takımın diş sayısı (adet)

$n$  : Devir sayısı (dev/dak)

Diş başına ilerleme miktarı ( $f$ , mm/diş) frezeleme işleminde önemli bir büyüklüktür. Freze başlığı genellikle çok uçlu bir takımdır, dolayısıyla her ucun yeterli talaş kaldırabilmesi için uygun bir ilerleme değerine gereksinimi vardır. Diş başına ilerleme miktarı bir kesici kenarın parçaya girişi ile bir sonraki kesici kenarın parçaya girişi arasında geçen sürede tablanın ilerlediği mesafe olarak tanımlanır. Bu nedenle bu büyüklük takımdaki mevcut uç sayısı ( $z$ ) ve ilerleme hızına ( $F$ , mm/dak) bağlı olarak değişir [43].

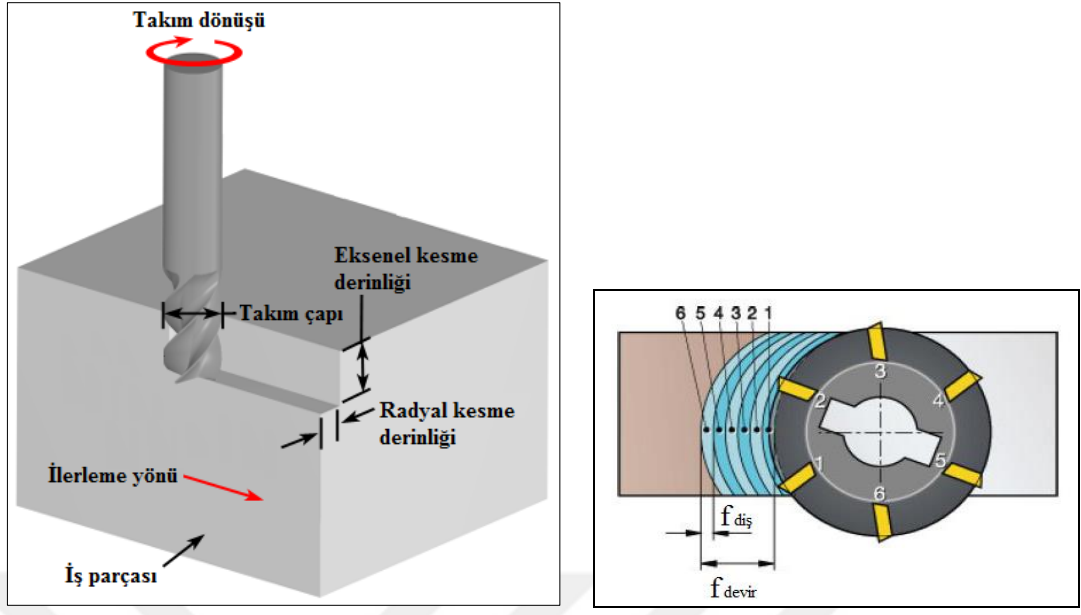
İlerleme miktarının uygun seçilmemesi, yüzey kalitesini, takım ömrünü ve üretim hacmini dolayısıyla birim maliyetleri önemli oranda etkiler. İlerleme miktarı düşük seçildiğinde frezeleme işlemi çok geç biter. İlerleme miktarı çok yüksek seçildiğinde ise takım süratle aşınır [42,43].

#### **3.1.4. Talaş Derinliği ( $a$ )**

Talaş derinliği, takımın iş parçası içine dikey olarak aldığı yoldur. Genellikle, “ $a$ ” ile gösterilir. Talaş derinliğinin uygun seçilmemesi işleme zamanını ve maliyeti etkilemektedir. Yeterli talaş derinliğinin verilmemesi, işleme süresini uzatarak zaman kaydına sebep olacak dolayısıyla birim başına düşen maliyetleri artıracaktır [42,43].

Talaş derinliği ( $a$ ) ile talaş kalınlığı ( $a_c$ ) birbiri ile karıştırılan ifadelerdir. Talaş derinliği işlenmemiş yüzey ile işlenmiş yüzey arasındaki dikey mesafeyken, talaş kalınlığı kesme sonucunda oluşan talaşın kalınlığıdır. Talaş kalınlığı kesme düzlemi açısı nedeniyle her zaman talaş derinliğinden büyüktür ( $a_c > a$ )

Bu üç kesme parametresinin ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a$ ) çarpımıyla çoğunlukla metal kesme işleminin verimliliğini ifade eden talaş kaldırma oranı bulunur [42,43]. Şekil 3.3’te frezeleme işleminde ilerleme hızı ( $F$ ) ve talaş derinliği ( $a$ ) şematik olarak gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.3. Frezeleme işleminde a) talaş derinliği ve b) ilerleme hızı.

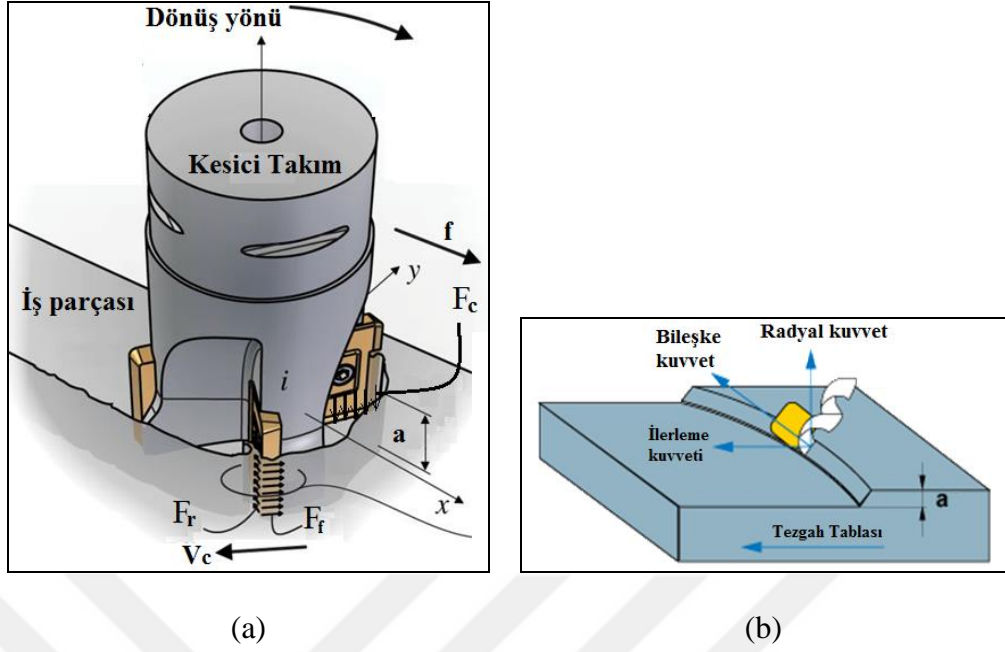
### 3.2. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİNDE KESME KUVVETLERİ

Talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri, ısı oluşumu, yüzey kalitesi, boyut ve geometrik toleranslar, takım ömrü gibi faktörler açısından önemli bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda kesme kuvvetleri takım tezgâhının, kesici takımların ve gerekli bağlama elemanlarının tasarımı için de kullanılır [44]. Frezeleme işlemi esnasında oluşan kuvvetler Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir. Burada kesme kuvvetinin üç bileşeni mevcuttur. Bunlar:

**Esas kesme kuvveti ( $F_c$ ):** Kesme hızı yönünde etki eder. En büyük kuvvet olup metal kesme işleminde harcanan gücün genelde %99'una karşılık gelir.

**İlerleme kuvveti ( $F_f$ ):** Kesici takımın ilerlemesi yönünde etkiyen kuvvettir. Esas kesme kuvvetinin yaklaşık %50'si kadardır fakat ilerleme hızı esas kesme kuvvetiyle karşılaştırıldığında küçük olması nedeniyle metal kesme işlemindeki gerekli gücün az bir kısmına karşılık gelir.

**Radyal kuvvet ( $F_r$ ):** İşlenen yüzeye dik etkiyen kuvvettir. Bu kuvvet de ilerleme kuvvetinin yaklaşık %50'si kadardır [12,37].



Şekil 3.4. Frezeleme işlemi esnasında oluşan a) kesme kuvvetleri ve b) bileşke kuvvet [45].

Bileşke kuvvet ( $F_R$ ) bu üç kuvvetin vektörel olarak toplanması ile elde edilir ve Eşitlik 3.3 ile hesaplanır.

$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_r^2} \quad (3.3)$$

### 3.3. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİNDE ISI VE SICAKLIK

Talaşlı imalat işleminde kullanılan güç çoğunlukla ısıya dönüşerek talaşın, iş parçasının ve kesici takımın sıcaklığını artırır. Sıcaklık artışı, talaşlı imalat işlemi esnasında oluşan ısı ve aynı zamanda bu ısının uzaklaştırılması durumuna bağlıdır. Oluşan ısı sonucu sıcaklık artışı kesici takım performansını ve iş parçası kalitesini etkiler [37]. Kesme bölgesinde ısı üretme kapasitesine göre ısı oluşturan üç bölge vardır. Bu bölgeler Şekil 3.5'te gösterilmiştir.





Şekil 3.5. Kesme bölgesi ısı oluşumu [46].

- a. **Kayma düzlemi:** Buradaki plastik deformasyon önemli bir ısı kaynağı olup oluşan ısının çoğu talaşla uzaklaştırılır.
- b. **Takım – talaş ara yüzeyi temas bölgesi:** Burada ilave plastik deformasyon olur ve kayma hareketinden (sürtünme) dolayı ısı oluşumunda önemli derecede etkilidir.
- c. **Takım yan yüzeyi:** Burada yeni oluşan iş parçası yüzeyinin takım yüzeyine sürtünmesiyle ısı oluşur. Özellikle bu sürtünme yan yüzey aşınması ile artar [37].

### 3.4. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİNDE KULLANILAN KESİCİ TAKIMLAR

Talaşlı imalat işleminde kesici takımın etkin bir şekilde kesme işlemi yapılabilmesi için uygun bir malzemeye gerekli olan geometrinin kazandırılması gerekmektedir. Hızla gelişen teknoloji, kesici takım malzemeleri ve takım geometrileri üzerinde de etkisini göstererek bu sektörde de gelişmelere ve yeniliklere neden olmuştur.

Yapılacak bir talaşlı imalat işlemi için seçilen takım malzemesi, takım geometrisi ve işleme parametreleri işlemin verimliliğini doğrudan etkiler. Takım seçiminde aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- a. İş parçası özellikleri (kimyasal bileşimi ve metalurjik durumu),
- b. İşlenecek parça özellikleri (geometri, boyutsal tamlik, yüzey pürüzlülüğü ve bütünlüğü gereksinimi),

- c. Takım tezgahı ve iş parçası bağlama sistemi özellikleri (yeterli rijitlik ve güç, ve iş mili devir sayısı ve ilerleme değeri aralıkları),
- d. Operatör kabiliyeti ve sensörler, tezgâh kontrol sistemleri, yağlama ve talaş uzaklaştırma sistemleri gibi takım tezgâhı özellikleri.

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesici takımların özellikleri günden güne geliştirilmekte ve dolayısıyla işlenmesi zor olan birçok malzemenin yüksek talaş kaldırma oranlarında işlenmesi mümkün olmaktadır. Yüksek talaş kaldırma oranları verimliliği artırır.

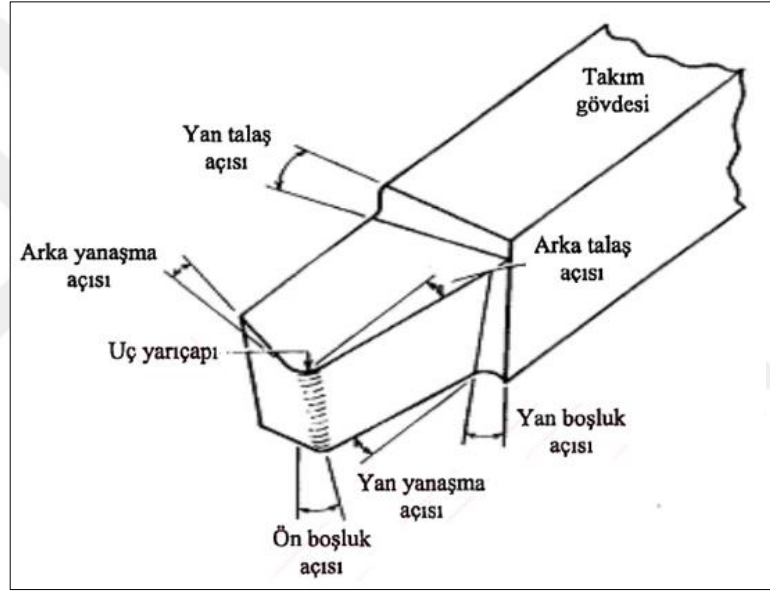
Talaşlı imalat işlemleri esnasında kesici takımlar zor şartlara maruz kalırlar. 1000 °C ve üzeri takım sıcaklıkları, sürtünme ve yüksek bölgesel gerilmeler kesici takımların etkin bir şekilde işlevini yerine getirebilmesi için çeşitli özelliklere sahip olmasını gerektirir. Kesici takımların sahip olması gereken bu özellikler:

- a. Yüksek sertlik,
- b. Aşınmaya ve kırılmaya karşı direnç,
- c. Yüksek tokluk,
- d. Yüksek sıcak sertlik,
- e. Deformasyona direnç,
- f. İyi kimyasal kararlılık (iş parçası ile reaksiyona girmeme)
- g. Yüksek elastiklik modülü,
- h. Yeterli ısı özellikleri,
- i. İstikrarlı takım ömrü,
- j. Uygun geometri ve yüzey kalitesidir.

Hemen hemen bütün talaşlı imalat işlemlerinde, kesme hızı ve ilerleme değerini sınırlandıran etken kesici takımın malzemesinin kabiliyetidir. Kabul edilebilir bir takım ömrü için kesme hızı ve ilerleme değeri belirli bir seviyenin altında tutulmalıdır. Aksi takdirde oluşan yüksek sıcaklıklara kesici takım dayanamayacağı için hızlı aşınma gerçekleşir.

### 3.4.1. Kesici Takım Geometrisi

Etkili kesme yapabilmek için kesici takımın en uygun geometriye sahip olması gerekmektedir. Talaşlı imalat yöntemlerine ve işlenecek malzemenin çeşidine göre kesici takım geometrileri de farklılık gösterir. Kesici takımlar genelde iki katagoriye ayrılır; tek noktadan kesme işlemi yapan ve çok noktadan kesme işlemi yapan. Talaş oluşum mekanizması bütün talaşlı imalat işlemlerinde ana hatları ile aynıdır [37]. Şekil 3.6’da tek noktadan, sağ yönlü (sağ yan) kesme işlemi yapan bir kesici takım görülmektedir.



Şekil 3.6. Sağ yan kesici takım geometrisi [37].

Takım geometrisini tayin eden faktörler;  $\alpha$  talaş açısı,  $\theta$  kama açısı,  $\gamma$  boşluk açısı gibi ana açılar ve takım ucunun yuvarlatma yarıçapı ( $r$ :uç yarıçapı) bu faktörlerin en önemlilerindedir ve açı değerleri arasında Eşitlik 3.4’teki gibi bir bağıntı vardır [47].

$$90 = \alpha + \theta + \gamma \quad (3.4)$$

$\gamma$  boşluk açısı, takımın işlenen yüzeye sürtünmesini,  $\theta$  kama açısı takımın parçaya nüfuz etmesini ve  $\alpha$  talaş açısı talaşın parçadan uzaklaşmasını sağlar. Pratikte  $\gamma$  boşluk açısı takım ve parça malzemesine bağlı olarak genellikle  $3^\circ - 7^\circ$  arasında

alınır. Dolayısıyla talaş kaldırma olayını esas olarak  $\theta$  ve  $\alpha$  açıları etkiler. Bu hususta yukarıdaki bağıntı göz önüne alınırsa iki durum ortaya çıkabilir. Bunlarda birincisi  $\alpha$  açısı küçük,  $\theta$  açısı büyük ise takımın ucu küt olduğundan malzemeye nüfuz etmesi zorlaşır, kesme kuvvetleri büyür, ısı oluşumu artar ve takımın ucu kısa zamanda bozulur. İkincisi ise  $\alpha$  açısı büyük,  $\theta$  açısı küçük ise, takım ucu ince olduğundan malzemeye daha kolay nüfuz eder, daha küçük kesme kuvvetleriyle talaş kaldırır, talaş kolaylıkla akar ve takım daha yüksek kesme hızlarında kullanılabilir. Ancak uç ince olduğundan takımın mukavemeti azalır ve kırılma olasılığı artar [47]. Bu açıklamalar ışığı altında kırılğan malzemeler için  $\alpha$  açısı küçük  $\theta$  açısı büyük; sünek malzemeler için  $\alpha$  açısı büyük  $\theta$  açısı küçük seçilmelidir [48].

İki kesici kenarın birleştiği köşe noktası keskin ancak zayıf bir noktadır. Talaş kaldırma işleminin küçük bir kesit alanıyla gerçekleşmesinden dolayı köşe noktası kesici kenarın en zayıf noktasıdır. Talaş kaldırma esnasında iş parçasına önce bu kısım temas etmekte, dolayısıyla malzeme deformasyondan dolayı ortaya çıkan gerilmeleri önce bu kısım karşılamak zorunda kalmaktadır. Kesici uca ait uç açısı ucun mukavemetini belirler. Genellikle bu açı  $35^\circ - 90^\circ$  arasında değişir, ancak yuvarlak kesici uçlarda kesici kenar çok daha büyük bir kesit alanına sahiptir. Dolayısıyla yuvarlak kesici uçlarda kesici kenar çok güçlüdür. Ayrıca daha büyük kesit alanı işleme esnasında daha büyük kuvvetlere mukavemet gösterir. Daha büyük bir köşe yarıçapı kesmeyi daha uzun bir kenar boyunca dağıtır ve böylelikle daha iyi bir takım ömrü sağlar. Büyük uç yarıçapı ile ısının sistemden uzaklaştırılması çok daha kolay, böylelikle ısıl gerilmelerden ortaya çıkan tahribat çok daha azdır. Ancak uç yarıçapına göre radyal ve aksenal yöndeki kuvvet dağılımları da farklılık gösterir. Büyük uç yarıçapı büyük radyal kuvvetlerin oluşumuna neden olur. Bu da ince cidarlı iş parçalarının işlenmesinde ve delik delme işlemlerinde talaş kaldırma işleminin rijitliğine olumsuz etkide bulunur. Radyal kuvvet iş parçası ve takımda sehime yol açar. Uç yarıçapının artması titreşim eğilimini de artırır. Daha büyük bir kesme uzunluğu daha yüksek bir rijitliğe gereksinim gösterir. Yuvarlak kesici uçların kesici kenarları son derece güçlüdür. Ancak bu kesici uçların kullanıldığı işlemlerde rijitlik açısından takımın, bağlama elemanlarının, iş parçasının ve tezgâhın test edilmesi gerekir. Tırlama riski olduğunda uç yarıçapının seçiminde son derece dikkatli olunmalıdır. İş parçasının yüzey kalitesi köşe yarıçapının büyüklüğünden

etkilenir. Yüzey kalitesi ilerleme ile uç yarıçapının bir fonksiyonudur ve Eşitlik 3.5'teki gibi ifade edilir. Bu sonuç teorik bir sonuçtur. Pratikte kesme hızı ve kesici kenarda oluşan aşınma da yüzey pürüzlüğüne etkide bulunurlar [43].

Teorik olarak bu bağıntı;

$$R_t = f_z^2 / 8r \quad (3.5)$$

olarak bulunur. Burada;

$f_z$ : İlerleme miktarı (mm/dev)

$r$ : Takım uç yarıçapı (mm)

$R_t$ : Yüzey pürüzlülük değeri ( $\mu\text{m}$ ); tüm ölçüm uzunluğu için maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamıdır. Bu değer aynı zamanda taşlama, honlama, lepleme gibi bitirme yüzeylerinin işlenmesinde bırakılan talaş payı olarak adlandırılır [12].

### 3.4.2. Kesici Takım Malzemeleri

Başarılı bir talaşlı imalat işlemi için işlenecek malzemeye uygun bir kesici takım seçilmelidir. Uygunluk hem takım geometrisi hem de takım malzemesine göre olmalıdır. Çeşitli özelliklerde, kabiliyetlerde ve maliyetlerde kesici takım malzemeleri kullanılmaktadır. Yüksek hız çeliği, karbür, kaplamalı karbür, sermet, seramik, kübik bor nitrit ve çok kristalli elmas yaygın olarak kullanılan kesici takım malzemeleridir.

Günümüzde en yaygın kullanılan kesici takımlar kaplamalı ve kaplamasız yüksek hız çelikleri (HSS) ve karbürlerdir. Son yıllarda özellikleri daha da iyileştirilen seramik takımlar karbürler kadar olmasa da yaygın kullanılan kesici takım malzemeleridir. Çok kristalli elmas (PCD) ve kübik bor nitrid (CBN) kesici takımlar yüksek maliyetlerinden dolayı daha özel uygulamalarda kullanılırlar [49]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan kesici takım malzemeleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

### **3.4.2.1. Yüksek Hız Çeliği (HSS)**

Taylor ve White tarafından geliştirilen ve ilk olarak 1900'lü yıllarda kullanımına başlanan yüksek hız çeliği (HSS) yüksek alaşımlı bir çelik türüdür. Günümüzde kullanılan HSS kesici takım malzemeleri demir ve karbona ilave olarak önemli miktarlarda W, Mo, Co, V ve Cr içerirler. Ferrit içerisinde katı çözelti olarak bulunan W, Mo, Cr ve Co temperleme sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda matrisi güçlendirici etki yaparlar. Dolayısıyla sıcak sertliği artırır. W, Mo, ve Cr ile birlikte V sertliği ve aşınma direncini artırır. Matrisin yoğun bir şekilde alaşımlandırılması yüksek hız çeliklerinin iyi sertleştirilebilirliğini sağlar [49].

Günümüzde HSS malzemeler çeşitlilik gösterir. Genel olarak; tungsten (W) ve molibden (Mo) tipi olarak iki ana gruba ayrılır. 1) Tungsten (W) tipi; Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından "T kalite" ve 2) molibden (Mo) tipi; AISI'ya göre "M kalite" olarak adlandırılır [50].

Günümüzde HSS malzemeler ticari olarak en önemli ve en yaygın kesici takım malzemelerinden biri olarak karşımıza çıkar. Karmaşık geometriye sahip kesici takımlar (matkaplar, kılavuzlar, paftalar, frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar ve tığlar gibi) HSS malzemelerden üretilirler. HSS kesici takımların tokluk değerleri sementit karbür ve seramik gibi çelik dışı diğer kesici takım malzemelerinin tokluk değerlerinden daha yüksektir. İstenilen geometriye bilenerak kolaylıkla getirilebilirler, bu nedenle aşınan takım yeniden bilenerak birçok defa kullanılabilir. HSS kesici takımlar metalurjik özellikleri ve üretim yöntemlerindeki gelişmelerle beraber birçok talaşlı imalat işleminde hala önemli bir takım malzemesi olarak yerini korumaktadır. Aynı zamanda, HSS takımlar, özellikle matkaplar, ince bir TiN ve TiC katmanı ile kaplanarak kesme performanslarında önemli derecede iyileşmeler sağlanmaktadır [12,50,51].

### **3.4.2.2. Sementit Karbür (WC)**

HSS kesici takımlar gerekli tokluk, darbe direnci ve ısı şok direncine sahip olmalarına rağmen, dayanım ve sıcak sertlik değerleri oldukça düşüktür. Dolayısıyla

yüksek kesme hızlarında (yüksek sıcaklıklarda) etkin bir şekilde kullanılmaları mümkün değildir. Yüksek kesme hızları talaşlı imalat verimliliğini artırmak için gereklidir. Yüksek kesme hızlarında ve dolayısıyla yüksek verimlilikte kullanılabilmesi için 1930'lu yıllarda karbür kesici takımlar geliştirilmiştir. Karbür kesici takımlar günümüzde yaygın olarak kullanılan kesici takımlardır. Bunlar aynı zamanda sementit karbür olarak da isimlendirilirler. Karbür kesici takımlar çok geniş bir sıcaklık aralığında yüksek sertlik, yüksek elastikiyet modülü, yüksek ısı iletkenlik ve düşük ısı genleşme katsayısı gibi özelliklere sahiptirler [12].

Karbür kesici takım ilk olarak parçacık (toz) halindeki WC bileşiği ve kobalttan toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Kobalt burada birleştirici olarak kullanılmıştır. Ancak, günümüzde WC'e ilave olarak TiC ve TaC gibi diğer bileşikleride karbür takım imalatında kullanılmaktadır. İlk geliştirilen WC – Co karbür dökme demirleri ve demir dışı metalleri HSS'den daha yüksek kesme hızlarında işlemek için kullanılmıştır. Ancak, WC – Co takım çeliğin işlenmesinde hızlı krater aşınması problemine maruz kalmıştır [52].

Karbür kesici takımları çeliklerin işlenmesinde de etkin bir şekilde kullanabilmek için daha sonraları WC – Co karışımına TiC ve TaC ilave edilmiştir. Bu şekilde çeliklerin işlenmesinde hızlı krater aşınması probleminin üstesinden gelinmiştir [52].

Karbür kesici takımlar temelde demir dışı metaller ve dökme demirin işlenmesinde kullanılanlar ve çeliklerin işlenmesinde kullanılanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Parçacık (WC) boyutu ve kobalt miktarı demir dışı metaller ve dökme demirler için kullanılan karbür kesici takımların özelliklerini belirleyen faktörlerdir. Tipik parçacık boyutu 0,5 ile 5 µm arasında değişir. Parçacık boyutu arttıkça sertlik ve sıcak sertlik azalır ancak tokluk artar. Bu kesici takımlardaki kobalt içeriği %3 ile %12 arasında değişir. Çok miktarlarda (%6 - %12) kobalt içeren karbür kesici takımlar kaba işlemler ve frezeleme gibi kesintili işlemlerde kullanılırken az miktarlarda (%3 - %6) kobalt içerenler de bitirme işlemleri için kullanılırlar. Çeliklerin işlenmesinde kullanılan karbür takımlarda WC'e ilave olarak TiC ve TaC parçacıkları da bulunur. TiC ve TaC parçacıklarının miktarı %10 – %25 arasında değişir [52].

Son yıllarda çok küçük (mikron altı) parçacıkların (WC, TiC and TaC) kullanılması karbür kesici takımlar alanındaki önemli bir gelişmedir. Küçük tane boyutu çoğunlukla yüksek sertlikten dolayı düşük tokluk anlamına gelse de sertlik artışı tokluktaki düşük mikron altı parçacıkların kullanılması ile azaltılmaktadır. Dolayısıyla çok küçük parçacıklar kullanılarak üretilen karbür kesici takımlar yüksek sertlikle birlikte iyi tokluğu da sahiptirler [52].

Çizelge 3.1. Karbür takımlar için ANSI C – kalite sistemi [52].

İşlem	Çelik dışı malzemeler	Çelikler	Kobalt ve özellikler
Kaba	C1	C5	En yüksek tokluk için yüksek Co
Genel amaçlı	C2	C6	Orta ve yüksek Co
Bitirme	C3	C7	Orta ve düşük Co
Hassas bitirme	C4	C8	En yüksek sertlik için düşük Co
İş parçası	Al, Ti, pirinç, dökme demir	Karbon ve alaşımlı çelikler	
Tipik bileşim	WC-Co	WC-TiC-TaC-Co	

Günümüzde kullanılan karbür kesici takımların çok farklı kaliteleri mevcuttur. Karbür kesici takımların sınıflandırılması için geliştirilen iki standart mevcuttur. Bunlardan bir tanesi ISO R513 – 1975(E) sistemi ve diğeri de ANSI (Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü) C – kalite sistemidir. Çizelge 3.1’de ANSI C – kalite sistemi gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Karbür takımlar için ISO kalite sistemi [12].

Sembol	İş parçası malzemesi	Renk kodu	Her bir kategoride artan aşınma direncinin belirlenmesi ve tokluğun azalan düzeninin belirlenmesi (5’lik artışlarla)
P	Uzun talaşlı demirli metaller	Mavi	P01, P05 – P50
M	Uzun veya kısa talaşlı demirli metaller, demir olmayan metaller	Sarı	M10 – M40
K	Kısa talaşlı demirli metaller, demir olmayan metaller, metalik olmayan malzemeler	Kırmızı	K01, K10 – K40

Karbür kesici takımların ISO kalite sınıflandırma sistemi de Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bu sistemde karbür kesici takım kaliteleri P, M ve K harfleriyle gösterilen üç ana gruba ayrılırlar. Her bir gruba P, M ve K harflerini takip eden numaralar verilir. Bu numaralar, genellikle 01’den başlar ve 40 veya 50’ye kadar



kademeli olarak artar. Bu numaraların düşük olması kesici takımın sertliğinin yüksek olduğunu gösterirken yüksek olması da tokluğunun yüksek olduğunu gösterir. ISO sınıflandırma sistemi sermet ve kaplamalı karbür kesici takımlara da uygulanır. [12,50,52].

### **3.4.2.3. Sermet**

Seramik ve metal kelimelerinin ilk üçer harflerden oluşan bir ifadedir. Teknik olarak karbür kesici takımlar da sermet kompozitler olarak kabul edilmektedir. Ancak, sermet ifadesi sert parçacık olarak TiC, TiN ve TiCN ve birleştirici olarak ta Ni ve/veya Mo kullanılarak üretilen kesici takımlar için kullanılan isimdir. Dolayısıyla WC – Co esaslı karbür kesici takımlar sermet olarak ifade edilmemektedir. Sermet kesici takımlar çelik, paslanmaz çelik ve dökme demirin karbür takımlara göre daha yüksek olan kesme hızlarında bitirme veya yarı bitirme işlemlerinde kullanılır. Sermet kesici takımların sıcak sertliği, oksidasyon direnci ve kimyasal kararlılığı karbür kesici takımlarinkinden daha yüksektir [49,52].

### **3.4.2.4. Kaplamalı Sementit Karbür**

Özellikle 1960'lı yıllardan itibaren dayanımı ve tokluğu yüksek olan yeni mühendislik malzemeleri geliştirilmiştir. Tasarım yönünden özellikleri cazip olan bu yeni malzemelerin talaşlı imalat yöntemleriyle şekillendirilmeleri esnasında hızlı kesici takım aşınması problemi ile karşılaşmıştır. Bu yeni geliştirilen malzemelerin etkin bir şekilde işlenebilmesi ve yaygın mühendislik malzemelerinin işlenmesinde de verimin artırılması amacı ile yapılan çalışmalar sonucu kaplamalı kesici takımlar geliştirilmiştir. 1970'li yıllarda karbür kesici takımların kaplanması kesici takımlar alanında yapılan önemli bir gelişme olarak kabul edilmektedir. Kesici takımlara uygulanan kaplamalar düşük sürtünme, aşınmaya karşı yüksek direnç, yüksek difüzyon direnci ve yüksek sıcak sertlik gibi özellikler sağlarlar. Kesici takım yüzeylerine uygulanan ince, kimyasal olarak kararlı ve sert olan TiC, TiN veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi kaplama katmanlarıyla kesici takım ömrü %200, %300 veya daha yüksek oranda artırılabilir. Günümüzde talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesici takımların önemli bir kısmı (%80'e kadar) kaplamalı olarak kullanılır [12,49,52].

### 3.4.2.5. Seramik

Seramik kesici takımlar başlıca iki ana gruba ayrılır: alümina ( $Al_2O_3$ ) esaslı seramikler ve silisyum nitrür (SiN) esaslı seramikler. 1950'li yılların başlarında geliştirilen alümina esaslı seramikler esas olarak ince taneli ve yüksek saflıktaki alüminyum oksitten oluşurlar. Bu ince taneli alüminyum oksit parçacıklar bir birleştirici kullanılmadan soğuk olarak preslenir ve yüksek sıcaklıkta sinterlenerek kesici takım biçimine getirilirler. TiC ve  $ZrO_2$  ilavesiyle bu kesici takımların tokluğu ve ısıl şok direnci artırılır.  $Al_2O_3$  seramik parçacıklar aynı zamanda taşlama işlemlerinde aşındırıcı taşların imalatında da kullanılırlar [12,52].

Alümina esaslı seramik kesici takımlar yüksek abrasiv aşınma direncine ve sıcak sertliğe sahiptirler. Yüksek hız çeliği ve karbür takımlardan kimyasal olarak daha kararlı oldukları için yığıntı talaş oluşturma eğilimleri daha düşüktür. Dolayısıyla, dökme demirler ve çeliklerin işlenmesinde iyi yüzey kaliteleri elde edilir. Ancak, düşük toklukları nedeniyle kolayca kırılabilirler. Bu nedenle yüksek kesme hızlarında ve tornalama gibi kesintisiz işlemlerde bitirme ve yarı bitirme işlemleri için uygundur. Düşük toklukları nedeniyle seramik kesici takımlarda genellikle negatif talaş açısı tercih edilir. Ayrıca, uzun bir takım ömrü için takım tezgâhının rijitliği ve sönümlenme kabiliyeti yüksek olmalıdır, iş parçası ve kesici takım rijit bir şekilde bağlanmalıdır. Bu şekilde titreşim ve tırlama azaltılmış olur [12].

1970'li yıllarda geliştirilen silisyum nitrür (SiN) esaslı seramik kesici takım malzemeleri silisyum nitrüre ilave olarak çeşitli miktarlarda da alüminyum oksit, itriyum oksit ve titanyum karbür içerirler. Bu kesici takımlar yüksek tokluk, yüksek sıcak sertlik ve iyi ısıl şok direnci özelliklerine sahiptirler. SiAlON SiN esaslı bir seramik kesici takım malzemesi olup silisyum, alüminyum, oksijen ve azotun oluşur. SiAlON silisyum nitrürden daha yüksek ısıl şok direncine sahip olup dökme demirler ve nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kullanılır. Ancak, yüksek sıcaklıklarda artan kararsızlığından dolayı SiN esaslı kesici takım malzemeleri çeliğin işlenmesi için uygun değildir. Seramik kesici takımların tokluğunu artırmak için son yıllarda whisker takviyeli seramik kesici takımlar da geliştirilmiştir [12,49,53].

#### **3.4.2.6. Kübik Bor Nitrür (CBN, PCBN)**

Kübik bor nitrür kesici takımlar yaygın olarak sertleştirilmiş çeliklerin, süper alaşımların ve sert dökme demirlerin işlenmesinde kullanılırlar. Yüksek sıcaklıklarda sertliğini önemli derecede koruma kabiliyetine sahip olup (20 °C’de 4700 Knoop ve 1000 °C’de 4000 Knoop) takım talaş arayüzeyinde yüksek kimyasal kararlılık gösterirler [49].

Sertlikte elmadan sonra gelen CBN kesici takımlar işlenmesi zor olan malzemeleri yüksek kesme hızlarında ve talaş kaldırma oranlarında etkin ve ekonomik işlemek için kullanılırlar. Karbür kesici takımlara göre beş kat daha yüksek hızlarda kullanılırlar. Yüksek kesme hızlarından dolayı mükemmel tamlık, yüzey kalitesi ve bütünlüğü sağlarlar. CBN kesici takımların maliyeti karbür ve seramik kesici takımlardan daha yüksektir. Buna mukabil, seramik bir takıma göre beş ile yedi kat arasında uzun takım ömrüne sahiptirler [12,49].

CBN kesici takımlar yüksek sertliklerinden dolayı kırılğan oldukları için işleme esnasında mümkün olduğunca titreşim ve tırlamadan kaçınılmalıdır. Dolayısıyla takım tezgâhının ve bağlama sistemlerinin rijitliği önemlidir [12].

#### **3.4.2.7. Elmas**

Günümüzde en sert malzeme olarak bilinen elmas, demir dışı malzemelerin (alüminyum, bronz ve plastikler gibi) işlenmesinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Karbrlerle karşılaştırıldığında kesme kuvvetlerinin azalmasında etkindir. Bu kesici takımlarla yüksek kesme hızlarında ve düşük talaş derinliklerinde yapılacak kesme işlemlerinde oldukça yüksek yüzey kaliteleri elde edilir. Tek kristalli (doğal) elmaslar yüksek yüzey kaliteleri için kullanılarak işlemeden sonra ilave bir parlatma işlemine gerek kalmaz.

Elmas kesici takımların önemli özellikleri; yüksek sertlik, iyi ısıl iletkenlik, çok keskin bir uca sahip olma özelliği, çok düşük sürtünme, özellikle bakır ve

alüminyum gibi yumuşak malzemelerin işlenmesinde uzun süre kesici ucun keskinliğini koruyabilmesi ve iyi aşınma direncidir.

Tek kristalli elmasın düşük arzı, yüksek talepleri ve maliyeti nedeniyle yeni araştırmaları beraberinde getirmiştir. General Elektrik firması, 1950 yılında grafitten elmas yapımını yüksek basınç (50 kbar) ve yüksek sıcaklık (1500 °C) şartlarında gerçekleştirmiştir. Devam eden çalışmalar sonucu 1960'lı yılların sonuna doğru da çok kristalli elmasın (PCD – polycrystalline diamond) üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çok kristalli elmas (PCD), çok küçük elmas tanelerinin birlikte sinterlenmesi ve sementit karbür bir altlıkla (sert ve kırılğan elmasa gerekli olan elastik destek sağlamak için) yapay elmas yapımındaki gibi yüksek sıcaklık ve basınç altında birleştirilmesi ile üretilir. Sinterlenmiş PCD kalitesi, tokluğu ve aşınma direnci, tek kristalli elmastan daha üstündür [50].

### **3.4.3. Takım Aşınması ve Takım Ömrü**

Talaşlı imalatta sürecinin en büyük maliyetlerden birisi kesici takım maliyetleridir. Bu nedenden dolayı, yıllar boyunca araştırmacılar kesici takımlar ve kesici takım ömrü konularına yoğunlaşmışlardır. Özellikle son dönem bilimsel çalışmalarda ekonomik takım ömrü ve en az takım maliyeti konularının araştırılması devam etmektedir.

Talaş kaldırma sürecinde tüm takımlar aşınır ve bu aşınma takım ömrünü tamamlayıncaya kadar devam eder. Takım ömrünü tayin etmede çeşitli modeller geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. En yaygın kullanılan ve bilinen takım ömrü modelleri Taylor, Gilbert, Kronenberg modelleridir.

#### **3.4.3.1. Takım Aşınması**

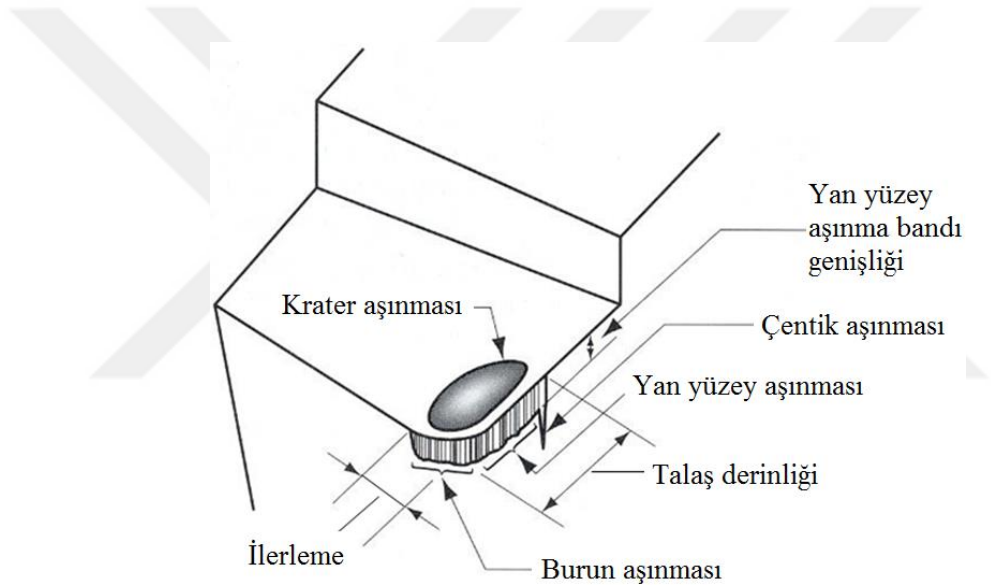
Talaşlı imalat işlemleri esnasında kesici takımlar yüksek gerilmeye ve talaş yüzeyi boyunca da yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Yüksek gerilmeler özellikle kesme işlemi yapan kesici uç kısmında meydana gelir. Ayrıca, oluşan talaşın talaş

yüzeyinde kayması ve kesici takımın yeni oluşan iş parçası yüzeyi ile temasta olması da sıcaklığı artırır. Bu yüksek gerilmeler ve sıcaklıklar sonucu kesici takım aşınmaya maruz kalır. Takım aşınmasının belirli bir değere ulaşması sonucu kesici takım etkin olarak kesme işlemi yapamaz. Dolayısıyla kesici takımın bilenmesi veya yenisi ile değiştirilmesi gerekir. Bu da işleme maliyetini artırır. Ayrıca, takım aşınması işlenmiş yüzeyin kalitesini ve iş parçasının boyutsal tamlığını da olumsuz yönde etkiler [12].

Tedrici aşınma dışında kesici takımın kesme kabiliyetini kaybettiği anlık kırılma ve kesici ucun plastik deformasyonu gibi durumlar da talaşlı imalat işlemleri esnasında görülür. Kesici takımın işlem esnasında maruz kaldığı anlık yüksek yüklerden dolayı kırılması sürekli olmayan kesme işlemleri (frezeleme gibi) esnasında mekanik ve ısıl yorulmalardan kaynaklanır. Kesici takımda plastik deformasyon ise çok yüksek gerilmeler ve sıcaklık sonucu oluşur. Plastik deformasyon sonucu kesici takımın uç geometrisi değişerek işlem yapamaz hale gelir [37].

Talaşlı imalat işlemleri sonucu aşınan kesici takımlarda farklı biçimlerde aşınma tipleri görülür. Şekil 3.7'de bu aşınma tipleri gösterilmiştir. Bunlardan en yaygın olanları yan yüzey aşınması, krater aşınması ve çentik aşınmasıdır. Yan yüzey aşınması kesici takımın işlenmiş yüzeyle temasta olması sonucu gerçekleşen aşınmadır. Kesici takım ve iş parçası malzemesine bağlı olarak abrasiv ve adesiv aşınma mekanizmaları sonucu gerçekleşir. Artan sıcaklıkla kesici takımın dayanımı ve sertliği azaldığı zaman bu aşınma tipi daha hızlı gerçekleşir. Yan yüzey aşınmasının değeri aşınma bandının genişliğidir. Kesici takımın değiştirilmesi için bu band genişliğinin belirli bir değere ulaşması gerekir. Deneysel çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla kullanılan kriter 0,3 mm'dir. Bu bandın ortalama olarak genişliği 0,3 mm'ye ulaştığında kesici takımın değiştirilmesi veya bilenmesi gerekir. Ancak, bazı durumlarda bu değer artırılabilir veya azaltılabilir. Örneğin, boyut toleranslarının düşük olduğu durumlarda bu değer 0,3 mm'den daha az olabilir veya boyut toleranslarının yüksek olması ve iş parçası malzemesinin rahatlıkla kesilmesi durumunda bu değer 0,3 mm'den fazla olabilir [40].

Krater aşınması, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi kesici takımın talaş yüzeyinde kesme işlemi yapan kısmın gerisinde aşınma sonucu iç bükey bir alanın oluşmasıyla görülen aşınma tipidir. Talaşlı imalat işlemlerinde bu bölgenin sıcaklığının yüksek kesme hızlarında 1000 °C’ye kadar çıktığı bilinmektedir. HSS kesici takımlar bu yüksek sıcaklıklarda sertliğini kaybettiği için çok hızlı bir şekilde aşınır. Karbür takımlar bu sıcaklıklarda sertliklerini belirli oranda korumalarına rağmen difüzyon sonucu aşınma gerçekleşir. Çok yüksek kesme hızlarında krater aşınması, takım aşınmasının belirlenmesinde etkindir. Krater aşınmasının büyümesi sonucu takım ucu zayıflar ve takım kırılır. Normal işleme koşullarında takım ömrü üzerindeki belirleyici aşınma türü genellikle yan yüzey aşınmasıdır [51,54].



Şekil 3.7. Bir kesici takımda oluşan aşınmalar [52].

Çentik aşınması kesici takımdaki yan yüzey aşınma bölgesinin sonunda, kesici takım ile iş parçası temasının bittiği bölgede görülür. Çentik aşınması işlenmemiş iş parçası yüzeyi ile kesici takımın yan yüzeyinin temas ettiği bölgede gerçekleşir. İşlenmemiş iş parçası yüzeyinin daha sert olması ve yüzeyde oksit ve tufal gibi kalıntılar olması nedeniyle çentik aşınmasının büyüklüğü yan yüzey aşınmasının büyüklüğünden daha fazladır [52].

Kesici takımda görülen aşınma biçimlerinde etkin olan farklı aşınma mekanizmaları vardır. Bu mekanizmalar abrasiv, adesiv, difüzyon, oksidasyon ve kimyasal olarak

isimlendirilebilir. Abrasiv aşınma iş parçasındaki sert ve küçük parçacıkların kesici takım yüzeyine sürtünmesi sonucu gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklardaki plastik deformasyon ve sürtünme sonucu iş parçası ile kesici takım arasında bölgesel küçük kaynaklanmalar gerçekleşir. Talaşlı imalat işlemi esnasındaki devam eden nispi hareket sonucu kaynaklanan bu küçük bölgelerin kopması sonucu kesici takımdan da bir miktar parça koparak aşınma gerçekleşir. Bu tip aşınmada adesiv aşınma mekanizması etkin olur. Difüzyon aşınması ise yüksek sıcaklıklarda takım – talaş arayüzeyinde kesici takımdan atomların talaşa geçmesiyle gerçekleşir. Bu geçiş sonucu takımın sertliği düşer ve aşınma süreci de hızlanmış olur. Kesici takımdaki karbürlerin yüksek sıcaklıkta oksitlenmesiyle oksidasyon mekanizması, aşınmada etkin olur [52,55].

#### **3.4.3.2. Takım Ömrü**

Kesici takımın kesme işlemine başlamasından itibaren etkin olarak kesme işlemini yapamaz hale gelinceye kadar geçen süre takım ömrü olarak bilinir. Takım ömrü, kesici takımın kullanılabilmesi kesme süresi olarak da tanımlanabilir. Kesici takımı kırılana kadar kullanmak takım ömrünü belirlemenin bir yöntemi olsa da gerçek endüstriyel şartlarda kırılma aşamasına kadar kullanmak kesici takımı tekrar bilemede ve iş parçası kalitesinde problemler oluşturur. Bir alternatif olarak, belirli bir miktarda yan yüzey aşınması bir kriter olarak seçilebilir ve bu seviyeye ulaşıldığında kesici takım değiştirilir.

### **3.5. YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ**

Yüzey bütünlüğü, çeşitli yöntemlerle şekillendirilen parçaların yüzeylerinin pürüzlülük değeri, yüzey altı katmanlarındaki kalıcı gerilmeler ve bu katmanlarının mekanik ve metalurjik özelliklerini kapsamaktadır. Talaş kaldırma yöntemleriyle imal edilen bileşenlerin işlevsel performansı üzerinde bu bileşenlerin yüzey bütünlükleri önemli derecede etkilidir [56].

Çeşitli yöntemlerle imal edilen bir iş parçası bu işlemler esnasında çeşitli mekanik, ısıl, fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalır. Bu nedenle parça yüzeyinin (dışı)

özellikleri parça iç tarafının özelliklerinden farklılıklar gösterir. Bir parçanın mekanik özelliklerini genellikle parçanın iç tarafı (gövdesi) belirlemesine rağmen, imal edilen bir parçanın yüzeyi ve yüzey katmanı önemli bazı özellikleri ve nitelikleri doğrudan etkiler. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- a. Sürtünme ve aşınma özelliklerini,
- b. Yağlayıcının etkinliğini,
- c. Boyama, kaplama, kaynaklama, lehimleme ve birleştirme işlemlerini ve aynı zamanda korozyon direncini,
- d. Yorulma veya diğer kırılma mekanizmaları vasıtasıyla parçanın zayıflamasına ve daha kısa sürede kırılmasına neden olan yüzey kusurlarından dolayı kırılma başlangıcını,
- e. Yüzeylerin ısıl ve elektrik iletkenliğini etkiler [12].

Dolayısıyla, öngörülen çalışma süresi boyunca bir bileşenin işlevini etkin bir şekilde yerine getirebilmesi için yüzeyinin belirli özelliklerde olması gerekir ve çoğunlukla bu özellikler yapım resimlerinde belirtilir. Talaşlı imalat yöntemleriyle üretilen bileşenlerin çoğunluğu için yüzey pürüzlülük değeri tek başına bir kalite özelliği olarak yeterli olur. İstisnai durumlarda ise yüzey pürüzlülük değerine ilave olarak yüzeyin işleme yöntemi, yüzeyde oluşan izlerin şekli ve yönleri, yüzey altı katmanının mikroyapısı ve kalıntı gerilmeleri de tasarımcı tarafından belirlenen özellikler olabilir.

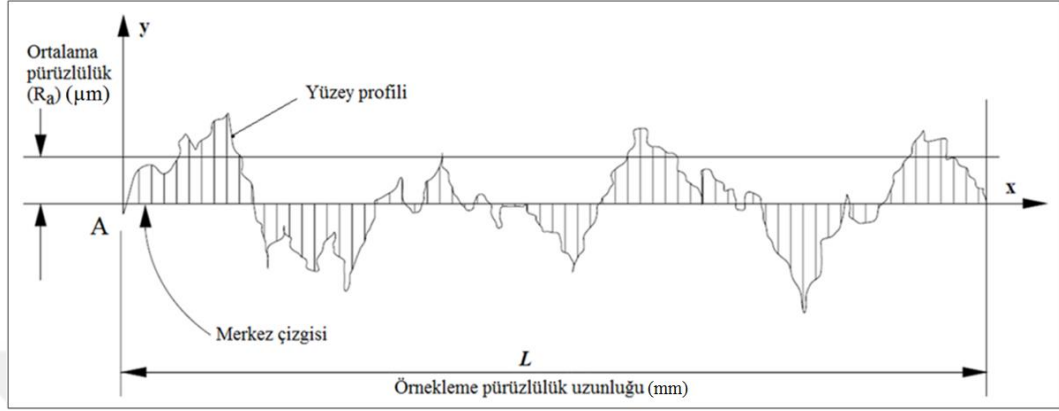
Genelde yüzey pürüzlülük değeri; aritmetik ortalama ( $R_a$ ) ve karekök ortalaması ( $R_q$ ) olarak iki metodla belirlenebilir. Merkez çizgi ortalaması (CLA) olarak da adlandırılan aritmetik ortalama; Şekil 3.8'de şematik olarak gösterilen bir yüzeyin pürüzlülüğünün ölçülmesi esasına dayanır. Aritmetik ortalama değeri ( $R_a$ ) Eşitlik 3.6'da verilen bağıntı ile belirlenir.

$$R_a = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (3.6)$$

buradaki bütün ordinarlar (a,b,c,...) mutlak değerlerdir.



Şekil 3.8'deki Ax çizgisi, bu çizginin altında kalan alanların toplamı üzerinde kalan alanların toplamına eşit olacak şekilde konumlandırılır. Yüzey pürüzlülüğü için kullanılan birim genelde  $\mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 3.8. Yüzey profili ve merkez çizgisi [47].

Bir yüzeyin en alt noktasından en üst noktasına olan mesafe en yüksek pürüzlülük değeri ( $R_t$ ,  $R_{\text{max}}$ ) bir pürüzlülük kriteridir ve düzgün bir yüzey elde etmek için kaldırılması gerekli malzeme miktarını göstermektedir. Günümüzde yüzey pürüzlülüğü ölçümünde çoğunlukla ortalama yüzey pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) değeri kullanılır.

Genel olarak,  $R_a$  değerleri ortalama bir değer olduğundan yüzeyi yeterince tanımlayamaz.  $R_a$  pürüzlülük değeri aynı olan iki yüzey incelendiğinde yüzey profillerinin birbirinden farklı olduğu görülebilir. Az sayıda derin girinti ve çıkıntı  $R_a$  üzerinde etkili olmayabilir. Ancak, üretilmiş bir parçanın yüzey profilindeki farklılıklar yorulma, sürtünme ve aşınma özellikleri bakımından önemli olabilir [12].

Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek ve kaydetmek için "yüzey profilometresi" olarak isimlendirilen çeşitli ticari cihazlar kullanılır. En yaygın olarak kullanılan cihaz, yüzey üzerinde doğru bir hat boyunca bir yol takip eden elmas izleyici uca sahiptir.

### 3.6. İŞLENEBİLİRLİK

İşlenebilirlik, bilimsel olarak tanımlanmış ve standartlaştırılmış bir özellik olmamakla beraber “bir kesici takım yardımı ile iş parçası malzemesinden talaş kaldırılırken (talaşlı imalat esnasında) iş parçası malzemesinin davranışı” tanım olarak kabul görmüştür. Başka bir ifadeyle “talaş kaldırarak iş parçası malzemesinin (çoğunlukla metal) şekillendirilmesinin nispi kolaylığı veya zorluğu” olarak tanımlanabilir [52,57].

İşlenebilirlik, genellikle malzemeye has bir özelliği olarak görülse de, işlenebilirlik sadece işlenen malzemeye bağlı olmamakta, bununla beraber işleme yöntemi ve parametrelerine de bağlıdır [49]. İşlenebilirliği değerlendirmek için çeşitli kriterler kullanılmaktadır. Takım ömrü, harcanan enerji/güç ve işlenen yüzey kalitesi gibi faktörler en yaygın olan işlenebilirlik kriterlerindedir [58].

İyi işlenebilirlik, bir malzemenin işlenmesinde iyi yüzey kalitesi, uzun takım ömrü ve düşük kuvvet ve güç gereksinimini demektir. İşlenebilirlik, sertlik, süneklik, ısıl iletkenlik, deformasyon sertleşmesi, malzemenin kimyasal bileşimi ve içindeki inklüzyonla gibi malzeme özelliklerinden etkilenir. Örneğin, sertlik arttıkça kesici takımda abrasif aşınma artarak takım ömrü kısalmır. Düşük sertlik ve dayanım genelde iyi işlenebilirlik anlamına gelmekle birlikte sertliği az olan çok sünek malzemelerde yığıntı talaş (BUE) oluşumu gerçekleştiği için yüzey kalitesi kötüleşir ve takım ömrü kısalmır. Çok düşük sertlik talaşlı imalat işleminin performansını kötü yönde etkileyebilir. Örnek olarak, nispeten düşük sertliğe sahip düşük karbonlu çeliğin işlenmesinde kötü yüzey kalitesi oluşur ve talaş uzaklaştırılması ile ilgili problemlerle karşılaşılır. Bu nedenle, düşük karbonlu çeliklerde yüzey sertliğini artırmak ve talaş kırılmasını sağlamak için çoğunlukla soğuk çekme işlemi uygulanır. Düşük süneklik, metal kesme işleminde genelde olumlu bir etki yaparak iyi talaş oluşumuna katkıda bulunur ve metal kesme işlemi için daha az güç gerektirir. Artan iş parçası dayanımı da kesme kuvvetleri, özgül enerji ve kesme sıcaklığını artıracığı için, artan dayanımla metal kesme işlemi zorlaşır. Bununla birlikte, yüksek ısıl iletkenlik kesme bölgesinden oluşan ısının hızlı olarak uzaklaştırılması demektir. Bu nedenle, yüksek ısıl iletkenlik işlenebilirlik yönünden genelde faydalıdır [59].

Ayrıca, bir malzemenin kimyasal bileşimi, maruz kaldığı ısı işlem ve içerisindeki inklüzyonlar işlenebilirlik özelliğini önemli ölçüde etkiler ve bazı durumlarda kimyasal bileşim takım üzerinde etkin olan aşınma mekanizmalarını da belirler [52,57].

İşlenebilirlik derecelendirmeleri 60 dakikalık takım ömrüne göre değerlendirilir. İşlenebilirlik değerlendirmelerinde standard malzeme AISI 1112 çeliğidir. Bu malzemenin işlenebilirliği 100 olarak kabul edilir. Bu çeliğin belirli bir kesici takımla (muhtemelen karbür) işlenmesinde 60 dakikalık bir takım ömrü için kesme hızı 100 ft/min olmalıdır. Yüksek hızlar takım ömrünü düşürür ve düşük hızlar da artırır. Örneğin, 3140 çeliğinin işlenmesi 1112'ye göre zordur. Bu nedenle de 3140 malzemesinin işlenebilirliği 55'tir. Bunun anlamı 3140 çeliği 55 ft/min kesme hızında işlendiğinde takım ömrü 60 dakikadır. Benzer şekilde nikelin işlenebilirliği 200, 2011 dövme alüminyumun işlenebilirliği 200, perlitik gri dökme demirin 70, Inconelinki 30'dur [40].

### **3.7. MOLİBDENİN İŞLENEBİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

Otomotiv, havacılık/uzay ve biyomedikal gibi modern üretim endüstrilerinde, gelişmiş mühendislik malzemelerinin verimli bir şekilde işlenmesi çok önemlidir. Üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı ağır çalışma koşullarında iyi performans sağlamaları gerekmektedir. Aksi takdirde pahalı olan bu malzemeler, üretim maliyetlerini önemli ölçüde artırırlar.

Araştırmacılar, gelişmiş mühendislik malzemelerinden olan titanyum ve alaşımları, süper alaşımlar, alüminyum alaşımları gibi malzemeler üzerinde araştırmalarını yoğunlaştırmışlardır. Ancak, niyobyum, tantal, tungsten ve molibden gibi refrakter malzemelerin işlenmesi üzerinde sınırlı sayıda araştırma vardır [11].

TZM molibden alaşımını da içeren çeşitli refrakter malzemelerin işlenmesi ile yapılan ilk çalışmalardan bir tanesi Zlatin vd. aittir. Tornalama, alın frezeleme, parmak frezeleme, delme, raybalama, kılavuz çekme ve taşlama işlemlerine farklı

koşullarda tabii tutulan TZM alaşımından elde edilen sonuçlar bu çalışmada verilmiştir. Tornalama deneyleri karbür takımlarla 450 ft/dak kesme hızında, 0,009 inç/dev ilerleme değerinde ve 0,03 inç talaş kesme derinliğinde yapıldığında 25 dakika takım ömrü elde edilmiştir. İlerleme değeri iki katına çıkarıldığında takım ömrü 5 dakikaya düşmüştür. Kesme sıvısı kullanılmadan tornalama işlemi yapıldığında takım ömründe çok ciddi düşüşler görülmüştür. C3 kalite karbür takımının C2 kaliteden daha iyi performans sergilediği görülmüştür [60].

Alın frezeleme deneyleri çeşitli yüksek hız çeliği (HSS), döküm alaşımı ve karbür kesici takımlar kullanılarak yapılmıştır. T1 ve M2 kalite HSS takımlar T15 ve diğer iki kalite (süper HSS ve Braecut) HSS takımlara göre daha düşük takım ömrü performansı sergilemişlerdir. Döküm alaşımlarının takım ömrü performansı T1 ve M2 kalite HSS takımlardan iyi olmasına rağmen süper HSS takımdan daha yüksek performans sergilemişlerdir. İlerleme değeri HSS takımların ömrü üzerinde çok belirgin bir etkiye sahip olmamıştır. Ancak, kesme derinliğinin artması ile takım ömrü kayda değer bir şekilde azalmıştır. Kesme hızının %15 azalması ve kesme derinliğinin iki katına çıkarılması ile takım ömründe bir düşme görülmemiştir [60].

HSS takımlarda takım geometrisinin takım ömrünü belirlemede çok önemli olduğu görülmüştür. Negatif talaş açıları TZM alaşımlarının frezelenmesinde kullanılmaması gerektiği ve yüksek pozitif talaş açıları kullanılması gerektiği belirtilmiştir [60].

Ekstrüzyonla üretilmiş TZM alaşımının C2 kalite karbürle alın frezelenmesinde 300 ila 350 ft/dak kesme hızının uygun olduğu belirtilmiştir. Karbür takımlarda kesme derinliği takım ömrünü fazla etkilememiştir. Kesme derinliğinin 0,030 inç den 0,060 inç'e çıkarılması ile takım ömründe %10'dan daha az bir düşüş görülmüştür. Takım ömrünün yeniden kristalleşmiş, sıcak haddelenmiş ve gerginliği giderilmiş alaşımda düşük kesme hızlarında kayda değer olarak düşük olduğu sonucu çıkarılmıştır [60].

Karbür takımlarda kesme sıvısının kullanılması kuru işlemeye göre önemli ölçüde iyi sonuç vermiştir. Karbür takımlarda negatif talaş açılarının kullanılmaması ve optimum radyal ve aksel talaş açıları 0 (sıfır) derece olması gerektiği belirtilmiştir.

Yüksek pozitif talaş açıları da takım ömrünü düşürmüştür. İlerleme değeri karbür takımlar için daha kritik olmuştur. İlerleme değerinin 0,05 inç/diş'ten 0,08 inç/diş'e çıkarılmasıyla takım ömrü %60 azalmıştır.

Nispeten yüksek kesme hızlarında 248 BHN sertliğe sahip TZM alaşımı üzerinde HSS parmak frezelerle ile kanal açılmıştır. Parmak freze ile işlemede yüksek ilerleme değerlerinin kullanılmaması tavsiye edilmiştir. İlerleme değerinin 0,002 inç/diş'ten 0,005 inç/diş'e çıkarılmasıyla kaldırılan talaş hacmine göre takım ömrü ikiye katlanmıştır. Kesme derinliğinin 0,250 inç'i geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. 0,5 inç kesme derinliğinde takım hızlı bir şekilde kırılmıştır ve takım ömrü 0,250 inç'e göre %50 azalmıştır. Kanal açma işlemine göre çevresel (peripheral) frezelemede kesme hızı %50 daha büyük alınmıştır [60].

Kuljanic vd. sertleştirilmiş çelik, titanyum alaşımları, nikel esaslı alaşımlar ve molibden alaşımları gibi bazı önemli ve işlenmesi zor olan malzemelerin işlenebilirlikleriyle ilgili kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Saf molibdenin işlenebilirliği üzerinde tane yapısının önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş molibdenin nispeten kolay işlenebildiği ancak ilk pasodan sonra işlemin zorlaştığı, iş parçasının ince, homojen ve yönlendirilmiş tane yapısına sahip olması durumunda işlenebilirliğin daha da iyi olacağı belirtilmiştir. Molibden işlerken kırılma ihtimali olduğu için kırılmayı engellemek amacıyla bir dizi önlem alınması gerektiği ve dolayısıyla, iş parçası ve kesici takımın rijit bir şekilde bağlanması gerektiği ve takım tezgâhının yeterince güçlü ve tırlamaya neden olmaması gerektiği tavsiye edilmiştir. Bol miktarda kesme sıvısının kullanılması ve aşırı takım aşınmasından kaçınmak için de düşük kesme hızlarında (120 m/dak'nın altında) işlem yapılması tavsiye edilmiştir. Kesme sıvısı olarak kükürt esaslı kesme sıvılarının kaba işlemler için ve kükürt veya gazyağı esaslı kesme sıvılarının da bitirme işlemleri için uygun olduğu belirtilmiştir [2].

Toz metalurjisi ile üretilmiş molibdeni ekonomik ve çevresel kaygılardan dolayı kesme sıvısı kullanmadan işlemek daha cazip olduğu için bu çalışmanın yazarları tarafından kesme sıvısı kullanılmadan tornalama deneyleri yapılmıştır. Kesici takım olarak kaplanmış karbür takımlar kullanılmıştır. Tornalama yöntemiyle işlenmiş

molibdenin yüzey pürüzlülük değerlerinin ve kesici takım aşınmasının kesme hızına göre değişimi belirlenmiştir. Artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülük değerinin azaldığı ve iyi bir yüzey kalitesi için de kesme hızının 150 m/dak'nın üzerinde olması gerektiği görülmüştür. 200 m/dak kesme hızında M15 kalite TiAlN kaplanmış takımla 20 dakika bir takım ömrü elde edilmiştir. Bu sonuçlardan molibdeni kesme sıvısı kullanmadan etkin bir şekilde işlemek için nispeten yüksek kesme hızlarının kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ışığında toz metalurjisi ile üretilmiş molibdenin kesme sıvısı kullanılmadan işlenmesi için daha ayrıntılı bir çalışma yapılması düşünülmüştür [2].

Bir önceki çalışmadan elde edilen sonuçlara göre Sortino vd. tarafından yapılan daha kapsamlı bir çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş molibden kesme sıvısı kullanılmadan bitirme tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Seramik, sermet ve karbürlerden oluşan çeşitli kesici takımlar seçilmiştir. Tornalama deneyleri sabit talaş derinliği, sabit ilerleme değeri ve farklı kesme hızlarında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım aşınması incelenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucu seramik ve sermet takımların yüksek kırılgenlikleri nedeniyle molibdenin işlenmesinde uygun olmadığı görülmüştür. Farklı geometri ve farklı kalitelere seçilen karbür takımların çoğunun da uygun olmadığı görülmüştür. İyi yüzey kalitesi ve tatmin edici takım ömrünün nispeten yüksek kesme hızlarında kesme sıvısı kullanılmadan orta seviyede kobalt birleştirici içeren ve çok ince taneli WC takımlarla elde edilebildiği görülmüştür. Artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülük değeri önemli derecede düşmüştür. Benzer şekilde kesme kuvveti de artan kesme hızıyla düşmüştür. Düşük kesme hızlarında kesici takım talaş yüzeyine iş parçası malzemesinin önemli miktarda yapıştığı gözlenmiştir. Pozitif talaş açlarına sahip kesici takımlar düşük kesme hızları da dâhil tüm kesme hızlarında iyi bir performans sergilemişlerdir. Toz metalurjisi yöntemiyle molibdenin tornalama yöntemiyle işlenmesinde pozitif talaş açısına sahip, kesici ucu az miktarda yuvarlatılmış, ince katmanlı kaplamaya sahip ve yüzeyi parlatılmış orta derecede kobalt birleştirici içeren, çok ince taneli karbür kesici takımların kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır [11].

Molibden ve alaşımlarının işlenmesi konusunda ED FAGAN şirketinin 2016 yılında yayınlamış olduğu bir bültende bu malzemelerin testere ile kesilmesi, tormalanması, frezelenmesi, delinmesi, raybalanması, kılavuz çekilmesi, taşlanması, parlatılması ve honlanması ile ilgili bir takım faydalı bilgiler verilmiştir. Molibden ve alaşımlarının işlenmesinin diğer metal ve alaşımlarının işlenmesi sürecine benzediği ve çok basit parçalardan, çok karmaşık parçalara kadar istenilen ölçü ve toleranslarda işlem yapmanın mümkün olduğu ifade edilmiştir [10].

Elde edilen yüzeyin kalitesinin yüksek hız çelikleri ve karbür takımlar arasında seçim yapmaya bağlı olduğu, her iki durumda da takım ömrü çeliklerin işlenmesindeki takım ömründen daha kısa olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni de molibdenin, aynı sertlikteki çeliklerden daha fazla kesici takımı aşındırmaya meyilli olmasıyla açıklanmıştır. Yüksek hız çelikleri, genellikle düşük yüzey kaliteleri veya kaba işlemler için ve iyi yüzey kaliteleri ve sıkı toleranslar için de karbür takımlar tercih edildiği ifade edilmiştir [10].

Frezeleme işlemlerinde genellikle C2 kalite karbür takımların tercih edilmesi ve molibden için kullanılan kesici takım malzemesinin dökme demirler için kullanılanlarla da benzerlik gösterdiği belirtilmiştir. Bitirme tormalama ve frezeleme işlemlerinin C2 kalite karbür ve kaba tormalama, delme, rayba çekme, kılavuz çekme ve vida açma işlemlerinin yüksek hız çeliği ve C2 kalite karbür takımlarla yapılması önerilmiştir [10,61].

Uluslararası Molibden Birliği (IMOA) tarafından 2013 yılında yayınlanan bir bültende molibden ve alaşımlarının yaygın işleme yöntemleri ile şekillendirilebileceği ve farklı büyüklüklerde çok çeşitli parçaların bu malzemelerden üretildiği belirtilmiştir. Uygun işleme şartlarının belirlenmesi koşuluyla iyi yüzey kalitesi ve boyutsal tamlığın sağlanabileceği ifade edilmiştir. Başarılı bir işleme için takımın ucunun keskin olması gerekliliğine vurgu yapılmıştır. Aksi durumda takımın kesmeden ziyade koparma yapacağı ve bunun da parça servis ömrünü azaltan mikro çatlaklara neden olacağı belirtilmiştir. Bu bültende ayrıca saf molibden ve TZM'nin çeşitli talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi için kesici takım ve işleme parametreleri önerilmiştir. Genel olarak birçok uygulama için yüksek sertliği ve aşınma

direncinden dolayı karbür takımların kullanılması gerektiği ancak takım ucu keskinliğinin korunduğu sürece HSS takımların da kullanılabileceği belirtilmiştir. Saf molibdenin frezelenmesi için %6 – 9 arasında Co birleştirici içeren K10 – K25 kalite WC/Co karbür ve %6 Co birleştirici içeren M10 kalite WC/TiC/TaC/NbC karbür takımların 100 – 150 m/dak kesme hızı aralığında, HSS (yüksek hız çeliği) kesici takımların da 20 – 25 m/dak kesme hızı aralığında kullanılması önerilmiştir. TZM alaşımı için ise Zilatin vd. tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarının günümüzde başlangıç değerleri olarak kullanılacağı belirtilmiştir [31].





## BÖLÜM 4

### TAGUCHI METODU VE OPTİMİZASYON

Düşük maliyetler ile yüksek kaliteli ürünler üretmek günümüz rekabet koşullarında çok önemli bir unsurdur. Bu amaçla istatistiksel deney tasarımı teknikleri yeni ürünler ve/veya üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gibi alanlarında uygulama imkânı bulmuşlardır [62].

Yeni ürün tasarımı veya varolan ürünün geliştirilmesi için maliyetleri en aza indirerek nihai ürünü ortaya çıkartmak için değişik yöntemler geliştirilmiştir. Klasik yöntemlerin uzun süre ve yüksek maliyetlerle neticelenmesi, araştırmacıları yeni yöntemlerin geliştirilmesine yönlendirmiştir. Taguchi metodu, 1980'li yıllarda özellikle ürün geliştirme konusunda yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bir olmuştur [63].

Yeni teknoloji ve ürün geliştirme sürecine istatistiksel ve ilgili yöntemlerin uygulanması – Robust Parametre Tasarımı (RPD) olarak adlandırılan Taguchi metoduna dayanan optimizasyonlar için ISO16336:2014 uluslararası bir standart geliştirilmiştir [64].

#### 4.1. TAGUCHI METODU

Genichi Taguchi, 1940'lı yılların sonunda ürün ve süreç tasarımında kalitenin artırılması konusunda çalışmalarda bulunan Japon makine mühendisidir. İstatistiksel yöntemler kullanarak yeni bir deney tasarımı geliştiren Taguchi, kalite felsefesini yedi noktada özetlemiştir [65,66].

- a. Ürünün, son kullanıcının isteklerine cevap verebilmesi,
- b. Üretici açısından kalitenin artırılması ve maliyetlerin minimize edilmesi,
- c. Üründen beklenen özellikler, hedeflenen değerlere yaklaştırılması,
- d. Ürünlerin istenilen özelliklerindeki değişimler sonucunda ortaya çıkan kayıp, performans karakteristiğinin hedef değerden sapmasının karesi ile doğru orantılıdır.
- e. Ortaya çıkan yeni ürünün kalite ve maliyeti, üretici tarafından belirlenir.
- f. Yeni ürünün performans varyansı, performans karakteristikleri üzerindeki eğrisel etkileri azaltılarak bütürülebilir.
- g. İstatistiksel olarak yapılan deneyler performans varyansını azaltan ürün parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır.

Her faktörün bütün seviyelerini içeren tüm bileşenler için çok fazla deney yapılması gerektiği durumlarda, Taguchi metodu kullanılarak, çok daha az sayıda deney ile sonuca ulaşmak mümkün olmaktadır.

Taguchi, tasarım kavramını, kalite sağlama aşaması olarak hem ürün tasarımı için hem de süreç tasarımı için üç kalite aşaması biçiminde tanımlamıştır. Bunlar, sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı aşamalarıdır [65,67].

#### **4.1.1. Sistem Tasarımı**

Müşterileri gereksinimleri ve üretici teknolojileri kullanarak ilk örnek ürün (prototip) üretilir. Bu ürün performans karakteristiği için parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu süreçte sadece ürün ortaya konulmaz, üretim için gerekli olan ekipmanlar ve diğer faktörlerde göz önünde bulundurulur [65].

#### **4.1.2. Parametre Tasarımı**

İlk örnek üründeki varyansa en fazla katkıda bulunan faktörler belirlenir. Ürün parametre tasarımı; malzeme seçimi, ölçüler, yüzey özellikleri gibi en iyi şartların belirlenmesi amacıyla, süreç parametre tasarımı ise; kontrol edilebilen imalat süreç

parametreleri (çeşitli hızlar, sıcaklıklar, basınçlar, süreler, kuvvetler) için optimum düzey ve ayarların belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır [65].

#### **4.1.3. Tolerans Tasarımı**

İstenilen parametre değerleri için kabul edilebilir toleranslar belirlenir. Tolerans tasarımı aşamasında sonuçlar üzerinde büyük etkiye yol açan ürün ve süreç parametreleri toleranslarının belirlenmesi çalışılır [65].

Taguchi yaklaşımında sistem ve parametre tasarımı, düşük maliyetli yüksek kalitede ürünlerin üretilmesi için önem arz etmektedir. Taguchi, parametre tasarımı için deney tasarımı uygulamasını önermiştir [65,68].

#### **4.2. TAGUCHI METODUNDA DENEY TASARIMI**

Deney tasarımı daha önce geliştirilmiş olmasına rağmen, bu kavramı ürün performansındaki varyansın azaltılması için ilk uygulayan kişi Taguchi olmuştur. Taguchi, deney tasarımının kullanılmasının şu noktada önemli olduğunu belirtmiştir [65,69].

- a. Hedef değer için varyansın düşürülmesi.
- b. Çevre koşullarına karşı robüst (güçlü, iyi gelişmiş) ürün üretilmesi.
- c. Parçalardaki varyansa karşı duyarlı olmayan ürünlerin tespit edilmesi.
- d. Yei ürünlerin ömürleri konusunda yapılan deneyler.

Bu noktalardan ilk üçü Taguchi'nin parametre tasarımı olarak isimlendirdiği kategoridedir. Taguchi deney tasarımında, performans karakteristiğini etkileyen faktörleri;

- a) Kontrol edilebilen faktörler (tasarım faktörleri); süreç mühendisi tarafından kolayca belirlenebilen faktörler,
- b) Kontrol edilemeyen faktörler (Gürültü faktörleri); üretim ortamı ile ilişkili olan varyansın kaynaklarını oluşturan faktörler olarak iki şekilde belirler [69,70].

Deneyleerin amacı tasarımı parametrelerinin belirlenmesidir. Gürültü faktörlerinin performans karakteristiği üzerindeki etkisini en aza indiren tasarımı parametrelerinin belirlenmesi amaçlanır. Tasarımı parametre matrisi ve gürültü faktörleri matrisi olarak iki bölümden meydana gelir [65,66]. Çizelge 4.1’de Taguchi’nin parametre tasarımı için örnek bir deney tasarımı verilmiştir.

Çizelge 4.1. Taguchi’nin parametre tasarımı deney örneği [65].

Tasarım parametre matrisi					Gürültü faktörü matrisi			Performans karakteristiği	Performans İstatistiği
Test no	Tasarım parametreleri				Gürültü faktörü			Y1 Y2 Y3 : : : : Y33 Y34 Y35 Y36	[Z(q)] <sub>1</sub> : : : : : [Z(q)] <sub>9</sub>
	Q1	Q2	Q3	Q4	W1	W2	W3		
1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	1	2	2	1	2	2		
3	1	3	3	3	2	1	2		
4	2	1	2	3	2	2	1		
5	2	2	3	1	1	1	1		
6	2	3	1	2	1	2	2		
7	3	1	3	2	2	1	2		
8	3	2	1	3	2	2	1		
9	3	3	2	1					

Taguchi tasarımı parametreleri ve gürültü faktörleri, gürültü faktörleri matrisini oluşturmak için ortogonal (dikey) dizinin kullanılmasını önermektedir. Dikey dizin tasarımı parametrelerinin değişik sayıdaki değerlerinin belirlenmesini sağlar [66]. Çizelge 4.2’de Taguchi dikey dizi seçim tablosu verilmiştir.

Otomobil direksiyonu üreten bir işletmede mühendisler ürünün performansını etkileyen 13 değişken her değişken için ise 3 seviye belirlemişlerdir. Tam faktöriyel yöntemi ile deneyler yapılmış olsa toplam 1,5 milyonun üzerinde deney alternatifi söz konusu olacakken Taguchi dikey dizini kullanarak deney sayısını 27’ye düşürmüştür [65,71].

Performans istatistiği denilen ölçütü hesaplamak için tasarımı parametreleri matrisinin her bir deneyinden elde edilen çoklu deneyler yapılır. Taguchi performans istatistiği ölçütü olarak Sinyal – Gürültü (S/N) oranının kullanılmasının gerekliliğini de ileri sürmüştür [64]. Sinyal, ürünün bize vermeye çalıştığı şey, gürültü ise sinyali olumsuz olarak etkileyen müdahalelerdir. Bunlar bazen ürünün bünyesinde ye alan unsurlardan ya da dışarıdan gelen müdahalelerdir [65].

Çizelge 4.2. Taguchi dikey dizini seçim tablosu [72].

		SEVİYE SAYISI									
		2		3		4		5			
PARAMETRE SAYISI	P=2	S=2		P=2	S=3		P=2	S=4		P=2	S=5
	P=3	S=2	L4	P=3	S=3	L9	P=3	S=4		P=3	S=5
	P=4	S=2		P=4	S=3		P=4	S=4	L' 16	P=4	S=5
	P=5	S=2		P=5	S=3		P=5	S=4		P=5	S=5
	P=6	S=2	L8	P=6	S=3		P=6	S=4		P=6	S=5
	P=7	S=2		P=7	S=3	L18	P=7	S=4		P=7	S=5
	P=8	S=2		P=8	S=3		P=8	S=4		P=8	S=5
	P=9	S=2		P=9	S=3		P=9	S=4	L' 32	P=9	S=5
	P=10	S=2	L11	P=10	S=3		P=10	S=4		P=10	S=5
	P=11	S=2		P=11	S=3	L27				P=11	S=5
	P=12	S=2		P=12	S=3					P=12	S=5
	P=13	S=2		P=13	S=3						
	P=14	S=2	L16	P=14	S=3						
	P=15	S=2		P=15	S=3						
	P=16	S=2		P=16	S=3						
	P=17	S=2		P=17	S=3						
	P=18	S=2		P=18	S=3						
	P=19	S=2		P=19	S=3	L36					
	P=20	S=2		P=20	S=3						
	P=21	S=2		P=21	S=3						
	P=22	S=2		P=22	S=3						
	P=23	S=2		P=23	S=3						
	P=24	S=2									
	P=25	S=2									
	P=26	S=2	L32								
	P=27	S=2									
	P=28	S=2									
	P=29	S=2									
	P=30	S=2									
	P=31	S=2									

Taguchi yetmişden fazla S/N oranı geliştirmiştir. Bunlardan geniş ölçüde uygulanan ve geniş kapsamlı hale gelen üç tane S/N oranı hesaplama yöntemi aşağıda verilmiştir [73].

**Tip S: En küçük en iyi**

$$S/N = -10 \log(\sum Y^2 / n) \quad (4.1)$$

Burada;

Ȳ: Y değerinin (performans karakteristiklerinin değerlerinin) ortalaması.

S: Y değerlerinin standart sapması.

**Tip N: hedef değer en iyi**

$$S/N = 10 \log(\bar{Y}^2 / S^2) \quad (4.2)$$

### **Tip B: En büyük en iyi**

$$S/N = -10 \log [\sum(1/Y^2)/n ] \quad (4.3)$$

Bu üç tür problemde de amaç S/N oranını yükseltmektir. Bunların maksimize edilmesi, bir yandan sinyali artırırken, diğer yandan da varyansı azaltmaktır [64].

Taguchi, düşük maliyetlerle kaliteli ürünlerin üretilmelerini için ürün ve süreç tasarımı aşamalarında yaygın olarak kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Teknik yönden bazı eleştirilere maruz kalmakla birlikte, bilim çevrelerinde olduğu kadar, endüstriyel uygulayıcılar için de kalite geliştirme ve maliyetleri düşürme konusunda yeni bir bakış açısı oluşturmuştur. 1940'lardan Japonya'da 1982'den beri A.B.D. 'de yaygın bir uygulama alanı bulan Taguchi metodu 1990'larda Türkiye'de az sayıda işletme tarafından uygulanmıştır. Kalite geliştirme sürecine giren her işletme Taguchi'nin deney tasarımı metodundan yararlanabilir [65].

### **4.3. TAGUCHI METODU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

Kumar vd. karmaşık parçaların üretiminde kullanılan buharlaştırılmalı döküm tekniğinde üretilen malzemelerin gerilme özelliklerinin optimize etmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu işlem için Al – 7% Si alaşımli döküm malzemesi kullanılmıştır. Deney tasarımı için 4 farklı parametre tayin edilmiş olup, bu parametreler, tane incelik değeri, titreşim zamanı, vakumlama derecesi ve dökme sıcaklığıdır. Her bir parametre için 3 farklı seviye atanmıştır. Deney tasarımı için L9 dikey dizisi kullanılmış ve toplam 9 deneyle işlem tamamlanmıştır [70].

Ghani vd. son frezeleme parametrelerinin optimizasyonun da Taguchi metodu uygulanmış, frezeleme parametreleri olarak 4 farklı kontrol faktörü ve bu faktörlere 3 farklı seviye belirlemişlerdir. Deney tasarımı için L27 dikey dizisi seçmişlerdir. Kesici takım TiN kaplı, malzeme olarak da AISI H13 çeliği kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda en iyi bileşenin yüksek kesme hızı, düşük ilerleme miktarı ve kısa talaş derinliği olarak belirlenmişlerdir [74].

Park vd. tarafından mikro – akışkan sistemler için salınım karıştırıcı aktif mikromikser tasarımı yapılmış, bu tasarım için 3 temel parametre ve 3 seviye belirlenmiştir. Bu parametreler frekans, açı ve uzunluktur. Üç temel parametre olmasına rağmen frekans – uzunluk, frekans – açı, açı – uzunluk etkileşimleri de etkin parametre içerisine alınarak toplam 6 parametre atanmıştır. Bu deney için Taguchi L27 dikey dizisi kullanılmıştır. Yapılan deney tasarımı sonucunda karışım verimliliği %84,59'a kadar artırılmış ve yeterli karışım uzunluğu %25'e kadar düşürülmüştür [75].

Darwin vd. %18 Cr içeren martenzitik paslanmaz çeliklerin aşınma dirençlerini artırmak için kroyojenik ısıtım işlemi için parametre optimizasyonunu Taguchi methodu kullanarak yapmışlardır. 5 kontrol faktörü için 2 farklı seviye atanmış ve 5 temel kontrol faktörü birbiri ile tam etkileşim içerisine girdiğinden sonradan 10 etkileşim parametresi daha eklenmiş ve toplam 15 parametre 2 seviye olarak L16 dikey dizisi seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda bekletme sıcaklığı en önemli kontrol faktörü olduğu tespit edilmiştir [76].

Günay, AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin işlenmesinde oluşan kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve ortalama yüzey pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) için kesici takım radyüsü ve kesme parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Taguchi L9 dikey dizini kullanarak işlenebilirlik deneylerini gerçekleştirmiş ve değişkenlerin önem seviyelerini belirlemek için ANOVA yapmıştır. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli değişkeni ilerleme miktarı olduğunu bulmuştur [77].

## BÖLÜM 5

### SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Günümüz rekabet koşullarında yeni ürünlerin en kısa zamanda, istenilen kalitede ve en az maliyetle geliştirilmesi gerekmektedir. 1980'lerde fiyat/performans açısından oldukça gelişen bilgisayar teknolojisi analiz programlarının yaygın olarak kullanımına olanak sağlamıştır. Mühendisliğin her alanında bilgisayar kullanımı her geçen gün artarak devam etmektedir [78].

1900'lü yılların ortalarında çalışma alanları uzay ve havacılık olan Boeing, Bell Aerospace ve Rolls Royce gibi firmalar bilgisayar destekli analiz yöntemlerinin ilk kullanıcılarıdır. Turner ve arkadaşları 1956 yılında ilk akademik çalışmayı yapmışlardır. Yöntem günümüzde makine, elektrik, uçak, inşaat, hidrodinamik, atom gibi çeşitli mühendislik alanlarının yanında tıp alanında da uygulama imkânı bulmaktadır [79]. Bilgisayar destekli analiz yöntemleriyle bazı temel sayısal metotlara dayanarak hesaplamalar yapılır.

#### 5.1. TEMEL SAYISAL METODLAR

Bir mühendislik sisteminin çözümü için kullanılan temel sayısal metotları dört grupta toplamak mümkündür. Bunlar; sonlu farklar metodu, sonlu elemanlar analizi (SEA) sınır eleman metodu ve sonlu hacimler metodudur. Temel sayısal metotlar kullanım yerlerine ve problem çözebilme yeteneklerine göre birbirlerinde ayrılırlar [80].

Sonlu farklar metotlarının anlaşılması ve basit problemlere uygulaması kolay olmasına rağmen karmaşık geometri ve sınır koşullarına sahip problemlere uygulanmaları zordur.



SEA ise bir sistemin cebirsel denklemlerini oluştururken fark denklemlerinden ziyade integral formülasyonlarını kullanır. Dahası her bir elemandaki çözümü elde etmek için devamlı yaklaşım fonksiyonu varsayımı yapılır. Daha sonra sistemin genel davranışı tek tek elemanların davranışlarının birbirleri arasındaki süreklilik korunarak bir araya getirilmesi ile bulunur [81].

SEA çeşitli mühendislik problemlerine toleranslar dâhilinde çözüm arayan sayısal bir yöntemdir. SEA yapılırken yapı uygun sayıda parçalara bölünerek ağ oluşturulur. Her bir parça düğüm noktaları ile birbirine bağlanır. Analiz ve yapının şekline göre eleman tipleri farklılık gösterebilir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme, birim şekil değiştirme, sıcaklık vb. bilgiler düğüm noktalarına aittir. Düğüm noktalarındaki sayısal değerlerin ortalamaları gerekli bilgileri verecektir.

## **5.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (SEA) YAKLAŞIMI**

Sonlu elemanlar analizinin (SEA) geliştirilmesinde ilk göze çarpan adım 1950'lerde Boeing firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Uçak kanatlarını üçgen gerilme elemanları kullanarak modellenmesine Boeing firması öncülük etmiştir. Clough ise 1960'ta sonlu elemanları popüler hale getirmiştir. 1960'lar süresince araştırmacılar sonlu elemanları mühendisliğin çeşitli alanlarına uyguladılar, bunlara örnek olarak ısı transferi ve akış problemleri verilebilir. 1967'de ise Zienkiewicz ve Cheung sonlu elemanlar hakkında ilk kitabı yayınladılar. 1971 yılında sonlu elemanlar ile ilgili ilk ticari yazılım olan ANSYS piyasaya sürülmüştür [81].

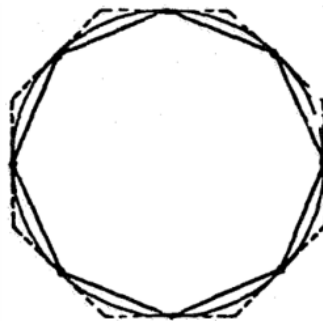
SEA'da temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan konvansiyonel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar analizi kullanılacak tek yöntem olmaktadır [82-84].

Mühendislikte SEA uygulamaları; makine, uçak, inşaat, otomotiv mühendislikleri, yapısal analizler (statik, dinamik, lineer ve nonlineer çözümler), termal ve akış hesapları, elektromanyetik, biyomekanik şeklinde sıralanabilir [82].

SEA “parçadan bütüne gitme” genel prensibine dayanmaktadır. Sonlu eleman; iki veya üç boyutlu yapıların bir parçası veya bir bölgesidir. Bu analizin ilk ve en geniş uygulama alanı gerilme analizidir. Sonraları ısı analizi, akışkan analizi, piezoelektrik analizi, elektrik analizi vb. alanlarda da kullanılmıştır [85,86].

Yönteme sonlu elemanlar isminin verilmesi yeni ise de, sonlu elemanlar düşüncesi gerçekte günümüzden birkaç yüzyıl önce kullanılmıştır. İlk matematikçiler bir dairenin çevresini, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, daireyi çokgene indirgeyerek (problemi basitleştirerek) hesaplamışlardır. Günümüzün deyimi ile bu çokgenin her kenarı bir sonlu elemandır. Bu basit çözümün incelenmesi sonucunda genel sonlu eleman uygulanabilmesi için de geçerli olan iki özellik ortaya çıkmaktadır [83,84].

- Dairenin dışındaki ve içindeki çokgenlerin çevreleri, dairenin çevresinin üst ve alt sınırlanmıştır.
- Çokgenin kenar sayısının artırılması ile bu yöntemle bulunacak olan yaklaşık çözüm yukarıdan veya aşağıdan gerçek çözüme ulaşacaktır.



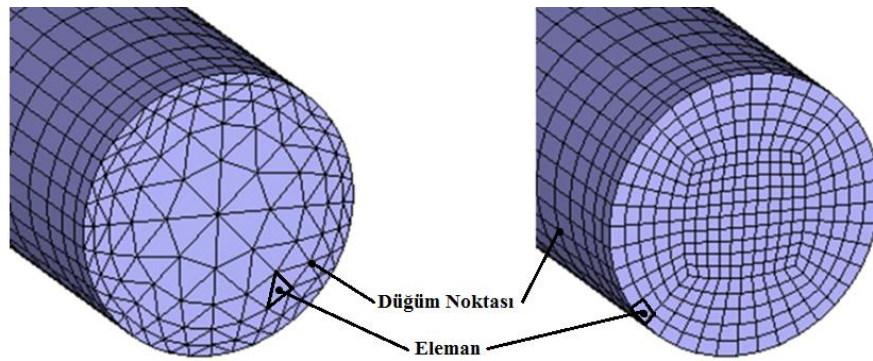
Şekil 5.1. Daire çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması [84].

Gerçek modelin matematiksel modellenmesinin zorluğu sebebiyle, model hesaplanması daha kolay elemanlardan oluşan bir biçimde bölünerek bir ağ

oluşturulur. Bu ağ ne kadar sık oluşturulursa sonuçlar gerçeğe o kadar yakın çıkar buna karşın hesaplama süreside artacaktır [79,85-89].

Sonlu elemanlar esnek tasarım imkânı vererek, kesin sonuçlara yakın analizler yapabilir ve birçok problem için çözüm imkânı sunmaktadır. Geometrinin düzensiz ve heterojen oluşu bu yöntem için bir engel değildir ve çeşitli tipteki sınır şartlarının probleme dâhil edilmesine imkân verir. Problem ne kadar küçük parçalara bölünürse, çözüm o kadar doğruya yaklaşır fakat çözüm süreside oldukça uzar ve yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulur [86].

Kesin sonucunu bulamadığımız birçok mühendislik problemi bulunmaktadır. Bu durum sistemi tanımladığımız diferansiyel denklemlerin karmaşıklığından veya sınır ve başlangıç koşullarını belirlemekteki zorluktan kaynaklanabilir. Bu tarz problemlerin üstesinden gelmek amacıyla sayısal yaklaşımlara başvurulur. Sistemin herhangi bir noktasındaki tam sonucu veren analitik çözümlerin aksine, sayısal çözümler tam çözüme ancak ayrılmış noktalarda yakınsarlar, bu noktalara düğüm noktası ya da nod adı verilmektedir. SEA'nin ilk aşaması sistemi parçalara bölmektir [81]. Şekil 5.2'de sonlu elemanlar analizinde kullanılan düğüm noktaları ve ağ yapısı/örgüsü (mesh) gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Ağ yapısı kurulmuş bir milde eleman ve düğüm noktaları.

SEA ile bir problemin çözülmesi için bilgisayara verilmesi gerekli olan bilgiler şunlardır; Analiz tipini seçmek, malzeme özelliklerini seçmek, model geometrisini oluşturmak (ağ yapısı dâhil), sınır şartlarını uygulamak, yükleri uygulamak, çözümü optimize etmek.

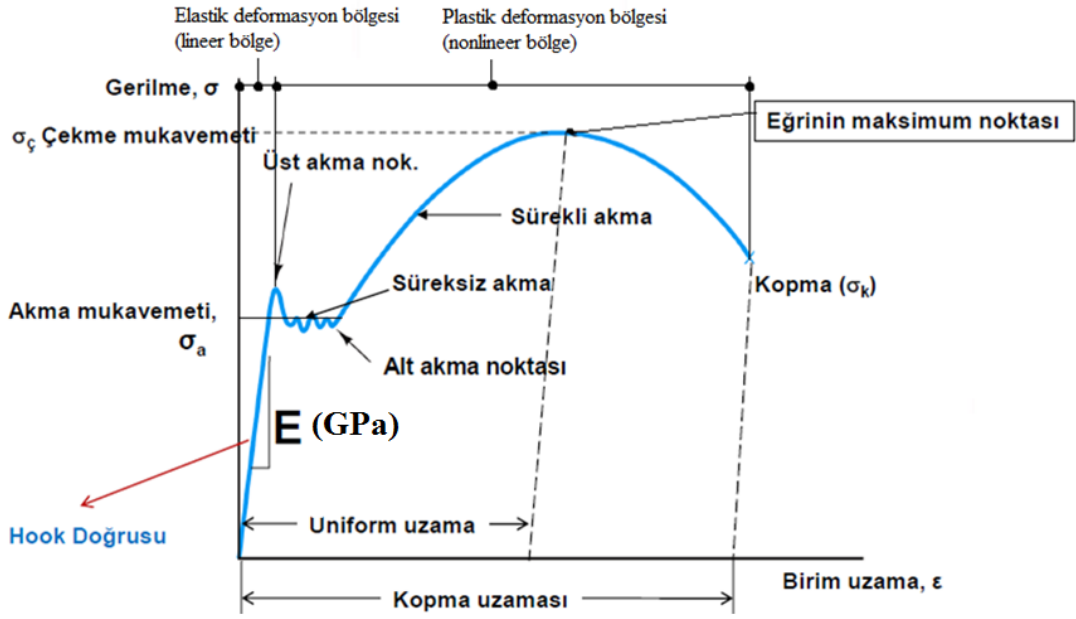
### 5.3. ANALİZ TİPİ

SEA sayısal bir yaklaşım olup mühendislikte çok çeşitli problemleri çözmekte kullanılabilir. Gerilme analizinde kararlı, geçici, lineer veya lineer olmayan (nonlinear) problemler, ısı transferi, akışkanlar dinamiği, elektro manyetizma problemleri sonlu elemanlar analizi ile çözülebilmektedir.

### 5.4. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Uygun malzeme modeli, sonuçlar üzerinde olduğu kadar hazırlık sürecini de etkilemektedir. SEA konusunda çalışan herkesin malzemeler için geçerli olan Hooke kanununu bilmesi gerekmektedir. Malzemelerin gerilmelere karşı gösterdiği davranışlarını ve sınırlarının belirlenmesi için malzemeler çekme gerilmesi testine tabi tutulurlar. Bunun sonucunda ortaya gerilim – uzama eğrisi dediğimiz bir eğri çıkar. Bu eğri malzemenin hangi gerilme değerine ulaştığında elastikliğini yitireceğinin bilgisini vermektedir [90]. Şekil 5.3'te örnek bir gerilim – uzama grafiği gösterilmektedir.

Bu eğrinin X eksenini % uzama (gerinim), Y eksenini ise gerilmeyi oluşturmaktadır. Grafik içinde bulunan ve lineer olarak işaretlenmiş olan bölge akma gerilmesine kadar olan kısımdır. Bu bölgede şekil değiştirmeler elastiktir ve kuvvet kaldırıldığında malzeme eski haline geri gelecektir. İşte bu kısım lineer yani doğrusal kısım olarak değerlendirilir. Eğer analiz sonucunda bulduğunuz gerilme değeri akma gerilmesinden küçükse lineer analiz sonucu doğru kabul edilebilir ancak sonuç akma gerilmesinden büyükse lineer analiz sonucu doğru olmayacaktır. Bu sebeple nonlinear analiz yapılmalıdır ki bu noktada devreye (nonlinear elastik, bilinear elastoplastik, multilineer plastik, hyperelastik, viscoelastik) gibi modeller girmektedir [90]. Her malzemenin gerilme – uzama grafiği birbirinden farklıdır. Çelik sünek bir malzeme özelliği göstermekte iken dökme demir daha kırılğan yapıdadır.



Şekil 5.3. Gerilim – uzama grafiği.

## 5.5. MODEL GEOMETRİSİ VE MESH




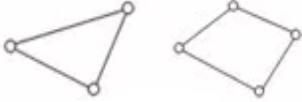

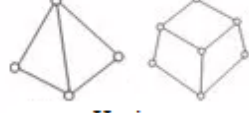
Sonlu elemanlar analizinde, yapı ve/veya çözüm bölgesi alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayrılmalıdır. Bu ayırmada uygun sonlu elemanlar kullanılmalı, elemanları cinsi, sayısı ve düzeni tespit edilmelidir [83].

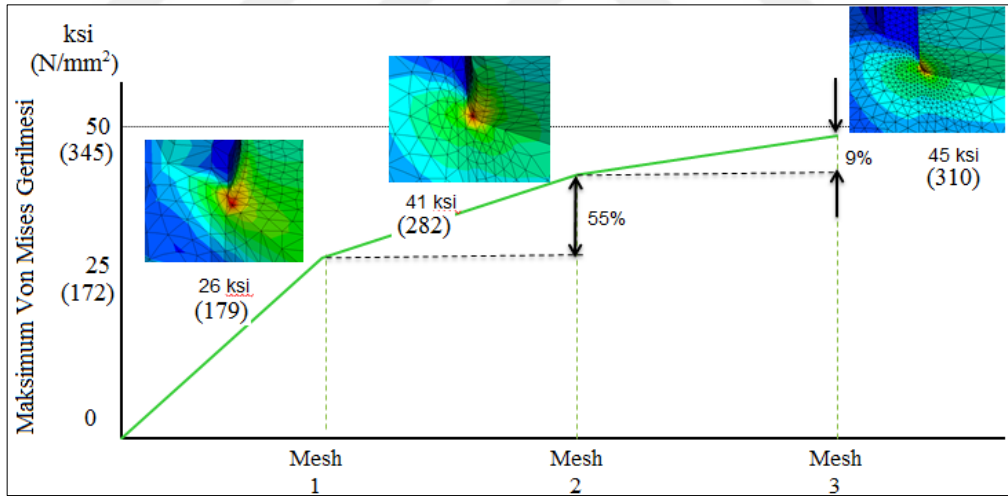
Fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi mesh üretme olarak tanımlanır. Burada amaç bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Yüzeysel tanım aralıkları üçgen, dörtgen vb. şekillere bölünebilirken, hacimsel tanım aralıkları tetrahedra, hexahedra gibi şekillere bölünebilirler. Elemanların şekli ve dağılımı otomatik mesh üretme algoritmaları ve/veya kullanıcı tarafından özel biçimlerde belirlenir [83]. Mesh üretiminde kullanılan bazı eleman çeşitleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

SEA’nin uygulanması sırasında eleman sayısı ve çözüm noktası sayısını kesin olarak belirleyen bir kural mevcut değildir. Genel olarak daha fazla eleman ve çözüm noktası daha hassas çözüm sonucunu doğurur. Ancak eleman ve çözüm noktası sayısı artırıldıkça, harcanacak çözüm süresi de artacaktır [80]. Şekil 5.4’te örnek bir

çalışmanın mesh sıklığının değişimi sonucu elde edilen sonuçlardaki farklılığı ortaya koymaktadır.

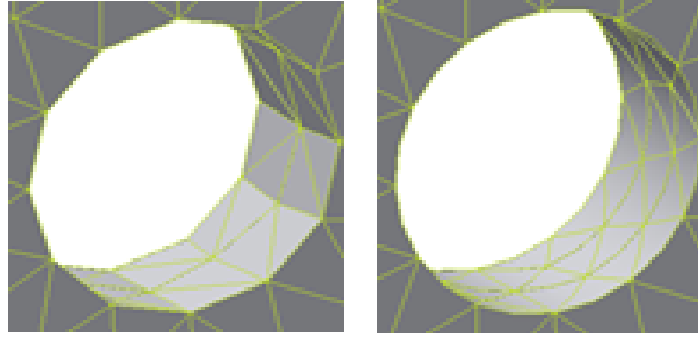
Çizelge 5.1. Mesh üretiminde kullanılan bazı eleman çeşitleri.

Ürün		Eleman Çeşitleri
	Çubuk Kiriş	 Uzunluk
	Kabuk Düzlem	 Alan
	Kati	 Hacim



Şekil 5.4. Mesh sıklığının sonuçlar üzerindeki etkisi [90].

Mesh yapısı iyi bir sonlu elemanlar analizi için oldukça önemli olup, bu noktada yapılacak hatalar sonuçlar üzerinde etkili olacaktır. Şekil 5.5'te bir deliğe uygulanan farklı mesh yapıları görülmektedir [90].

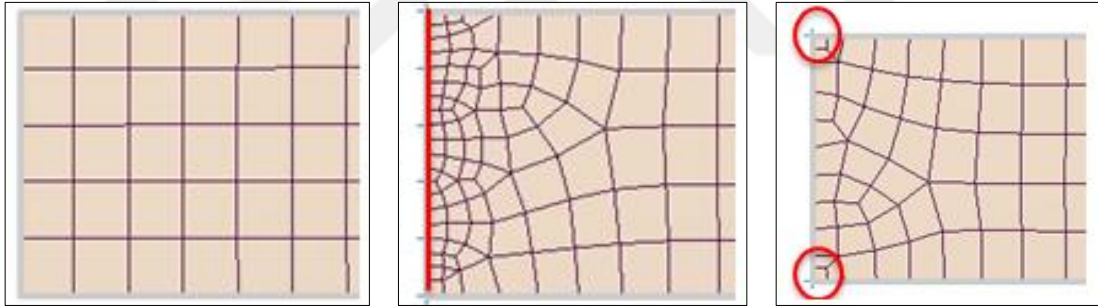


(a)

(b)

Şekil 5.5. Mesh oluşturma türleri.

Şekil 5.6’de görmüş olduğunuz daha hassas bir yaklaşımla modellemek istediğimiz alanlara bölgesel mesh uygulaması yaparak daha lokal ancak daha hassas mesh atma şansımız bulunmaktadır. Bu özellik tasarımcı için önem arz eden bölgelerde sıklıkla işe yaramaktadır [90]. Bölgesel olarak meshlerin sıklıklarını düzenlemek bizi yaklaşık doğru sonuca daha kısa sürede götürecektir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 5.6. Değişken mesh yapıları a) bütün yüzeyde eşit, b) bir kenarda sık ve c) köşede sık ve farklı geometride.

## 5.6. SINIR ŞARTLARI VE YÜKLERİN UYGULANMASI

Malzeme ve geometrinin belirlenmesinden sonra problemin sınır bölgelerindeki koşullar (bağlantılar, ilişkiler, kuvvetler, sabitlemeler, yer çekimi) girilir. Ayrıca varsa model üzerindeki diğer etkiler belirtilir. Mesela katı mekaniği için destek noktaları ve yük uygulama noktaları belirlenir. Isı problemleri için sınırlardaki

sıcaklıklar, ısı akışları varsa modelin içindeki ısı kaynağı veya ısı emici özellikleri belirtilir.

## **5.7. SEA TALAŞLI İMALATTA KULLANIMI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

Talaşlı imalatın sonlu elemanlar analizi kullanılarak modellenmesi yaklaşımının ortaya çıkması 1970' li yıllara kadar dayanmaktadır ve o günden bugüne bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların incelenmesi sırasında özellikle Mackerle'nin hazırlamış olduğu bibliyografi çok yararlı bir kaynak olarak karşımıza çıkmaktadır [91,92].

Komvopoulos vd. ortogonal kesme esnasında oluşan talaş oluşumunu, talaş akışı, takım – talaş ara yüzeyindeki sürtünme ve takım aşınmasını incelemek için sonlu elemanlar analizini kullanmışlardır. AISI 4340 çeliğinin seramik kaplı kesici takımlar ile yapılan kesme analizinde kesme hızını 183 m/dak ve talaş derinliğini 1,27 mm olarak seçmişlerdir. Metal kesme işleminin çeşitli yönleri, deneysel sonuçları sonlu elemanlar analizi ile önceden öngülebilmıştır [93].

Işık, talaşlı imalatta kesici takımların kırılma öncesi davranışlarının incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar ile statik ve dinamik analizler yapmıştır. Karşılaştırma deneyleri soğuk iş takım çeliğinin AISI O1 (60 HRC) karbür kesici takımlarla işlenmesi ile gerçekleştirmiştir. Kesici takımın aşınma analizi için Von – Mises kriterini kullanmıştır. Analiz sonuçlarının incelenmesinde kesici takımın aşınmasına ait veriler deneysel sonuçlarla paralellik göstermiştir [15].

Kurt ve Şeker, Al 2007 alüminyum alaşımının ortogonal kesme işleminde talaş derinliğinin kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar kullanılarak analiz etmişler ve talaş derinliğine bağlı olarak kesme kenarındaki gerilmelerin değişimini incelemişlerdir. Analiz sonuçları, Y – ekseni doğrultusundaki normal ve XY – düzlemindeki kayma gerilmelerinin kesici takımın ucundan takım – talaş temas uzunluğunun sonuna doğru azalmakta olduğunu ve dağılımlarının Lee ve



Zorev'in normal gerilme dağılımına paralel bir biçimde gerçekleştiğini göstermişlerdir [94].

Villumsen ve Fauerholdt, sonlu elemanlar analizi ile metal kesmede oluşan kesme kuvvetlerini tahmin etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile yapılan analiz sonucu oluşan kesme kuvvetlerini mukayese etmişlerdir. Yapılan karşılaştırma sonucunda yanıl kuvvet % 104, esas kesme kuvveti % 60 oranlarında tahmin etmişlerdir [95].

Pius vd. metal kesme sürecinde sıcaklığın kesici takım üzerindeki etkilerinin deneysel, analitik ve SEA kullanarak incelenmişlerdir. Numerik ve analitik sonuçlar, SEA ile elde edilen değerlerle makul ölçüde uyumludur. Elde edilen sonuçlar ana parametrelerin soğutma verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmak için kullanılabilir olduğunu ortaya koymaktadır [96].

Varlık vd. talaşlı imalat sırasında oluşan ısının kesici takımlar üzerindeki etkilerini güdümlü ve kendiliğinden hareketli dönel takımlarla karşılaştırmalı olarak SEA ile incelemişlerdir. Dönme hareketinin kesici takım üzerindeki etkisi güdümlü dönel takımın aşınmasının daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [97].

Laakso ve Niemi, AISI 1045 için Johnson Cook parametrelerinin beş farklı seti için performans değerlendirmesi yapmışlardır. SEA ile kesme kuvvetleri ve sıcaklığın analizini yapmışlardır. Sonuçları literatürde bulunan deneysel sonuçlarla mukayese etmişlerdir. Önerdikleri yöntemin literatürde bulunan model parametrelerden daha iyi performans gösteren model parametreleri ürettiğini bulmuşlardır [98].

Kaplanlıoğlu ve Gemalmayan, SEA ve analitik yöntemlerle uçak kanadı üzerindeki gerilmeleri karşılaştırmalı olarak hesaplamışlardır. Yaptıkları kaba model ve detay model ile gerilme değerleri açısından karşılaştırıldığında en fazla %8,68 fark bulunmuştur. Hazırladıkları analitik model ile bu tip problemlerin çözümü için farklı bir yaklaşım getirmişlerdir [99].

Aydın, düzlemsel gerinim koşulları altında iş parçasında oluşan kalıcı gerilmeleri tahmin etmek için dik kesme sürecinin ısıl – mekanik sayısal analizini

gerçekleştirmiştir. 20NiCrMo5 çeliğinin işleme sürecinde kalıcı gerilmeleri belirlemek için uyarlamalı ağ ve açık dinamik çözüm teknikleri kullanılarak Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) formülasyonlu sonlu eleman (SE) modeli kurmuştur. Tahmin edilen kalıcı gerilmeler literatürde mevcut deneysel olarak ölçülen verilerle karşılaştırmış ve elde edilen yüzeyin kalıcı gerilmeleri oldukça makul bir doğruluğa sahip olduğunu tespit etmiştir [100].

Cui vd. sertleştirilmiş çeliklerin kesintisiz ve aralıklı olarak seramik kesici takımlarla tornalanması esnasında kesme hızının ve talaş açısının etkisini SEA yardımı ile incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucu elde edilen sonuçlar literatüre uygun bulunmuştur [101].

Brinksmeier vd. OFHC bakır, bronz CuZn39Pb3, alüminyum AlMg5 ve elektroliz nikelin yüksek hızda elmas kesici takımlarla yapılan tornalama ve frezeleme işlemini kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım aşınması açısından SEA kullanarak simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu simülasyonla elmas kesici takımlar, işlem süresinin önemli ölçüde azalmasına izin vermekle beraber kesme kuvvetleri ve aşınma değerlerinde azalma, yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir [102].

Gökçe vd. sementit karbür matkapların, delik delme işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetlerini deneysel olarak belirlemişler ve elde edilen deneysel sonuçların, matkap üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar kullanılarak analiz etmişlerdir. Çalışmada Ø 8,8 mm çaplı iki ağızlı sementit karbür matkap ve AISI 1045 iş parçası malzemesi kullanmışlardır. Çalışma sonucu elde edilen veriler karşılaştırılarak sonuçların birbiri ile tutarlı olduğunu gözlemlemişlerdir [103].

Özel vd. Ti6Al4V titanyum alaşımının mikro frezeleme yöntemiyle işlenmesinde kesme bölgesinde sıcaklık, elastik/plastik gerilmeler, uzama ve talaş akışını SEA ile tahmin etmişlerdir. Deneysel veriler ile analiz sonuçlarını mukayese etmişler ve sonuçları tutarlı bulmuşlardır [104].

## BÖLÜM 6

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 6.1. MALZEME

Molibden ve alaşımlarının işlenebilirliğinin incelendiği bu çalışmada 3 farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlar; ticari saflıktaki molibden, TZM (titanyum – zirkonyum – molibden) ve MHC (molibden – hafniyum – karbon) dir. Bu malzemelerin tercih edilmesindeki en önemli faktör savunma başta olmak üzere çeşitli endüstri kollarında kritik parçaların imalatında tercih edilen malzemeler olmasıdır.

Malzemeler, yurtiçinde sınırlı sayıdaki ithalatçılardan fiyat araştırması ve analiz sonuç raporları dikkate alınarak temin edilmiştir. İş parçalarının çeşitli özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Deneyler için 50x50x5 mm boyutlarında prizmatik parçalar hazırlanmıştır.

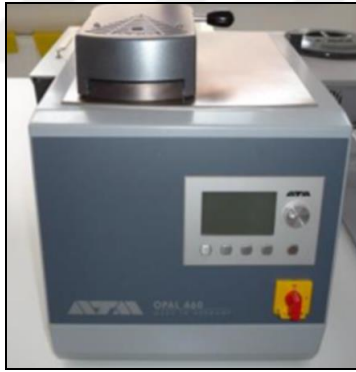
Çizelge 6.1. İş parçalarının çeşitli özellikleri.

Özellik	Birim	Saf molibden	TZM	MHC
Yoğunluk (20 °C’de)	g/cm <sup>3</sup>	10,22	10,16	10,00
Ergime noktası	°C	2617	2620	
Akma gerilmesi	MPa	600	680	725
Çekme gerilmesi	MPa	800	850	890
Elastikiyet modülü	GPa	330	325	
Poison oranı		0,38	0,38	
Isı iletim katsayısı (20 °C’de)	[W/(mK)]	138	140	

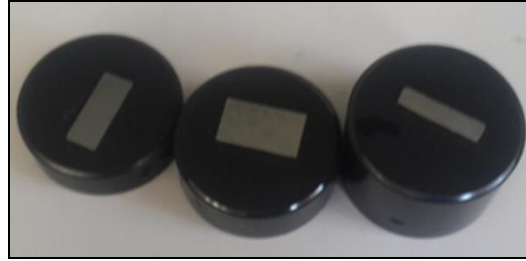
### 6.1.1. Metalografik İnceleme

Metalografik incelemeler için deney parçaları şerit testere tezgâhında 10 mm genişliğinde kesilmiş ve bu parçalar Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Bölümü Metalografi Test Laboratuvarlarındaki ATM Brillant 250 abrasif kesme cihazıyla 10x10x5 mm ölçülerine kesilerek bakalit kalıbına girecek büyüklüğe getirilmiştir.

Kesilen deney numunelerinin boyutları elle tutularak zımpara ve parlatma işlemlerine uygun olmadığından deney numuneleri sıcak bakalite alınarak bundan sonraki süreçler için uygulama kolaylığı sağlanmıştır. Deney numuneleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Bölümü Metalografi Test Laboratuvarlarındaki ATM Opal 460 bakalite alma cihazıyla 200 °C sıcaklık ve 200 bar basınç altında Ø40 mm çapında bakalite alınmıştır. Şekil 6.1'de bakalite alma cihazı ve bakalite alınmış deney numuneleri gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.1. a) Bakalite alma cihazı ve b) bakalite alınmış deney numuneleri.

Bakalite alınmış numuneler öncelikle zımparalama işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemleri ATM Saphir 330 cihazıyla sırasıyla 300, 600, 800, 1000 ve 1200 tane boyutundaki zımparalar kullanılarak sulu ortamda elle yapılmıştır.

Zımparalama işlemine tabi tutulmuş numunelere parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işlemi ATM Saphir 250 otomatik parlatma cihazı ile sırasıyla 3 ve 6 µm

parlatma solüsyonları kullanılarak keçe üzerinde yapılmıştır. Parlatmadan sonra yüzey deterjanlı su ile yıkanmış, alkolle temizlenmiş ve basınçlı hava ile kurutulmuştur.

Molibden ve alaşımlarının dağlanması en etkin dağlayıcı Murakami çözeltisidir. Deneylede iki farklı dağlayıcı kullanılarak en uygun yüzey sonucuna ulaşmaya çalışılmıştır.

a) 1. Dağlayıcı: Murakami dağlayıcısının bileşenleri ve uygulama biçimi;

Solüsyon a: 100 mL saf su + 10 g KOH

Solüsyon b: 100 mL saf su + 10 g  $K_3Fe(CN)_6$

Solüsyon a ve b karıştırılır, 1 dakika süre ile uygulanır.

b) 2. Dağlayıcı: Kimyasal bileşenleri ve uygulama biçimi;

50 mL saf su + 50 mL  $H_2O_2$  + 50 mL  $NH_3$

Solüsyon 50 saniye süre ile uygulanır.

### 6.1.2. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Bölümü Mekanik Testler Laboratuvarlarındaki EmcoTest Duravision 2000 cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümünde  $\varnothing$  2,5 mm çapında bilye 187,5 kgf yük altında iş parçasına uygulanmıştır. Her malzeme gurubu için sertlik ölçümleri 3 kez tekrar edilmiş ve ortalamaları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Sertlik ölçüm değerleri.

Malzeme	Ortalama sertlik değeri (Brinell)
Saf Molibden	205
TZM	212
MHC	223

### 6.1.3. XRF Analizi

Malzemelerin kimyasal bileşimlerini belirlemek için XRF ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler Thermo NITON XL3I cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.2’de ölçüm yapılan XRF cihazı görülmektedir. Çizelge 6.3’te XRF analizleri sonucu elde edilen kimyasal bileşim değerleri verilmektedir.



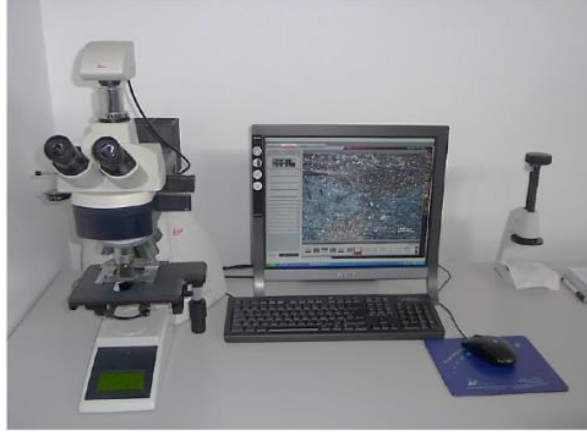
Şekil 6.2. XRF cihazı.

Çizelge 6.3. Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi.

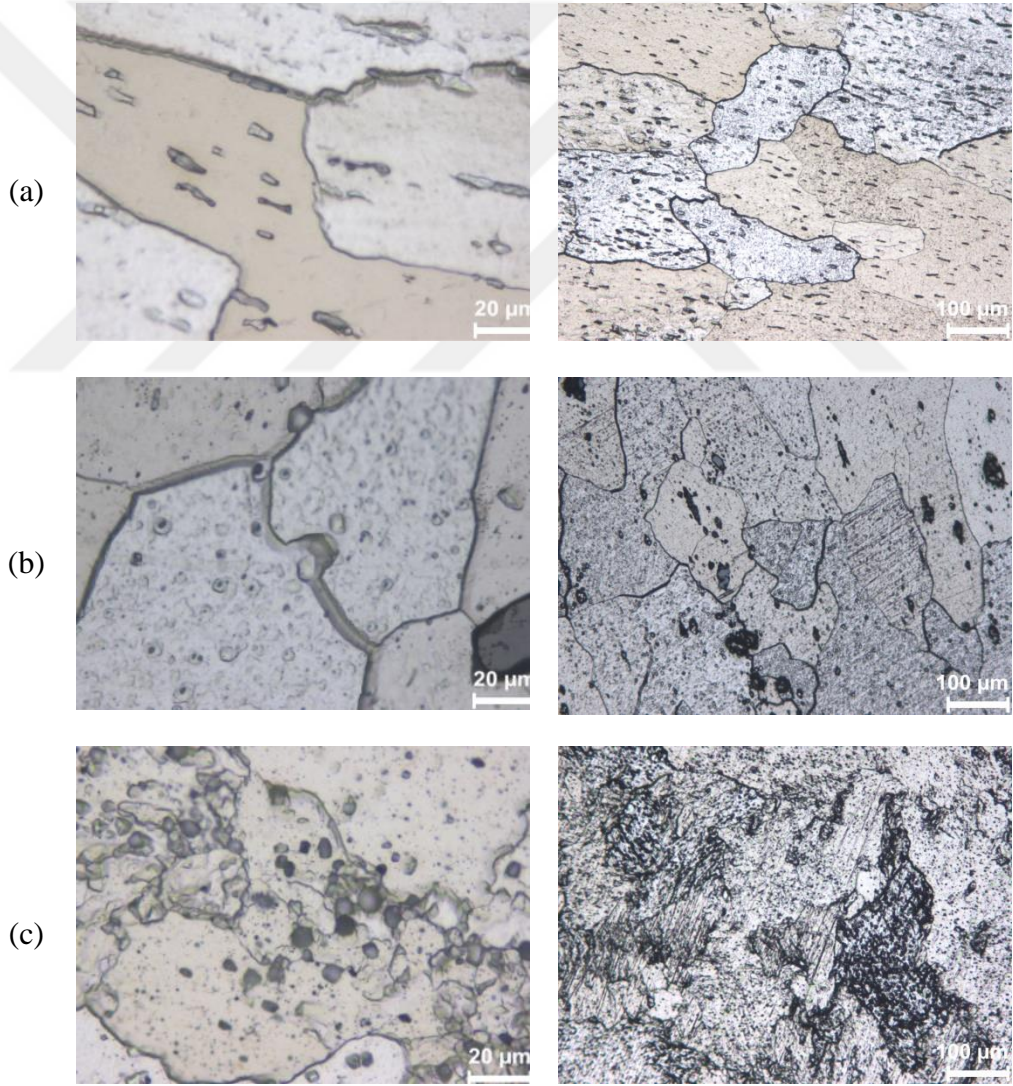
Saf molibden (%)	TZM (%)	MHC (%)
Fe:0,283 Mo:98,12 Ru:0,409 Pd:0,168 Cd:0,226 Sn:0,215 Sb:0,272	Fe:0,332 Mo:97,13 Ni:0,078 Ti:1,08 Zn:0,011 Zr:0,543 Ru:0,135	Fe:0,205 C:0,103 Mo:97,28 Ti:0,238 Hf:0,815 Ru:0,416 Pd:0,196

### 6.1.4. Optik Mikroskop İncelemeleri

Dağlanmış iş parçası numunelerinin mikroyapıları Leica DM 4000M model bir metal mikroskobu ile yapılmıştır. Şekil 6.3’te optik mikroskop düzeneği, Şekil 6.4’te ise deney numunelerinin optik mikroskopla çekilmiş mikroyapı fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 6.3. Optik mikroskop düzeneği.



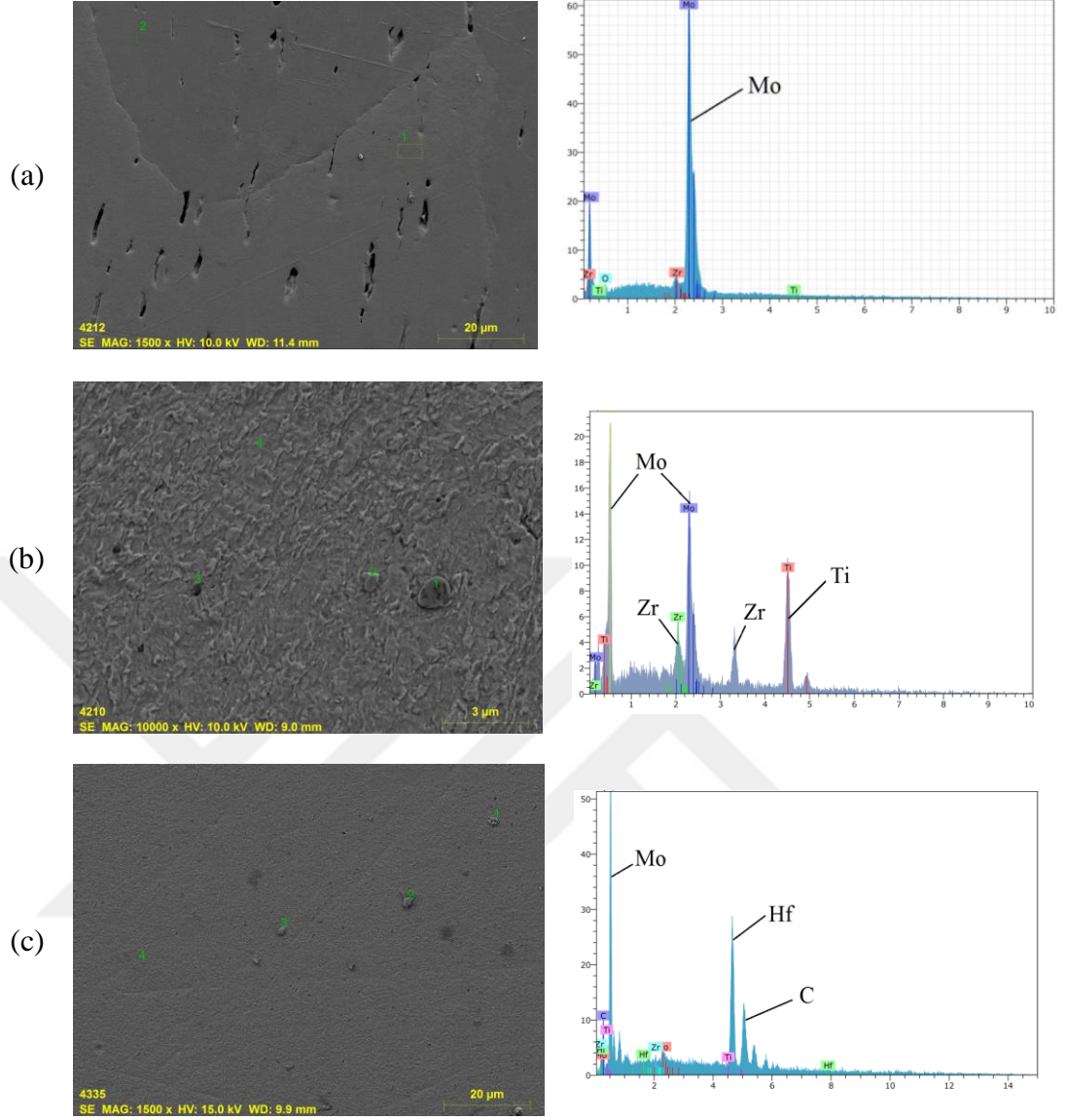
Şekil 6.4. Numunelerinin mikroyapıları a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

Şekil 6.4'te verilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; saf molibden mikroyapısının düzgün şekilli tane sınırlarından oluştuğu (Şekil 6.4a), Titanyum zirkonyum ilaveli molibden alaşımının mikroyapı görüntüsünün (Şekil 6.4b) saf molibden mikroyapısı ile benzerlik göstermekle birlikte daha küçük tanelerin varlığı görülmektedir. Hafniyum karbon ilaveli molibden alaşımının mikroyapı görüntüleri incelendiğinde (Şekil 6.4c) saf molibden ve titanyum zirkonyum molibden alaşımına göre daha karmaşık şekilli tanelerden oluştuğu görülmektedir. Malzemelerin Çizelge 6.2'de verilen sertlik sonuçlarında hafniyum karbon ilaveli alaşımın sertliğinin diğer alaşımlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sertliğin alaşım elementi ve mikroyapıdan farklılığından oluştuğu düşünülmektedir.

#### **6.1.5. SEM ve EDX Analizleri**

İş parçası malzemeleri ve aşınmış kesici takımların incelenebilmesi için gerekli olan SEM görüntüleri ve EDX analizleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü SEM Laboratuvarında bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem cihazıyla yapılmıştır. Şekil 6.5'te sırasıyla a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.





Şekil 6.5. Deney numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

Şekil 6.5'te verilen SEM görüntüleri ve EDX analizlerinde deneylerde kullanılan malzemelerin katalog değerleri ve Çizelge 6.3 ile uyumlu olduğu görülmektedir.

## 6.2. İŞLEME DENEYLERİ



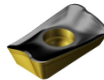

İşleme deneyleri frezeleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Her üç malzemenin (saf molibden, TZM ve MHC) işlenmesi sonucu oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin tespit edilebilmesi için 4 farklı kesici takım, 4 farklı kesme

hızı ve 4 farklı ilerleme miktarı kullanılarak işleme deneyleri yapılmıştır. Deney tasarımında Taguchi L16 dikey dizisi kullanılmıştır.

### 6.2.1. Kesici Takımlar, Takım Tutucular ve Takımcı Mikroskobu

Kesici takımlar farklı üreticilerden temin edilmiştir. Kesici takım seçiminde üretici firma tavsiyeleri ve daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Bütün kesici takımlar, uç yarıçapları 0,8 mm ve iki kenarı kesme işlemi yapacak şekilde temin edilmiştir. Kesici takımlar ve takım tutucuların özellikleri Çizelge 6.4'te verilmektedir. Deneylerde kullanılan kesici takımlar Ø12 mm çapında değiştirilebilir uçlu takım tutuculara rijit bir şekilde mekanik olarak bağlanmıştır. Takım tutucular, tek ağızlı (bir adet kesici takımın bağlanabildiği) olarak seçilmiştir.

Çizelge 6.4. Kesici takımlar ve takım tutucuların teknik özellikleri.

No	Takım Markası	Takım Kodu	Resim	Kalite Sınıfı	Tutucu Kodu
1	Mitsubishi	AOMT123608PEER-H		VP15TF PVD (Al,Ti)N	KMTAOMT100R 121W16S
2	Kennametal	EDPT10T308PDSRGE		KC522M PVD (Al,Ti)N	12A01R020A16ED10
3	Sandvik	R390-11 T308M		4240 CVD Ti(C,N)+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiN	R390-012A16-11L Coromill 390
4	Sandvik	R390-11 T308M		H13A Kaplamasız	R390-012A16-11L Coromill 390

Kesme kuvvetleri ölçümü için yapılan deneylerde düzlem frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Eksenel kesme derinliği 0,5 mm olarak verilmiştir. Takım tutucu (değiştirilebilir uçlu parmak freze) eksenel, iş parçalarının 5 mm'lik kısmının ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için yapılan deneylerde yanal frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Eksenel kesme derinliği 5 mm ve radyal kesme derinliği 0,5 mm olarak seçilmiştir.

İthalatçı firmadan silinidirik olarak temin edilen iş parçaları şerit testere makinasında 20 mm kalınlıklarında kesilmiş ve mengene çenelerine boşluksuz yerleştirilebilmesi için zımpara ve eğe yardımıyla çapak alma işlemi yapılmıştır.

Takım aşınmasının gözlemlenmesi için led aydınlatmalı, 5 megapiksel 2592 x 1944 çözünürlüğe sahip, parlaklığı azaltma özelliği bulunan, dijital 240 büyültme özelliği olan bir mikroskop kullanılmıştır. Takım aşınma değerlerinin ölçümleri bilgisayar destekli tasarım programlarından olan AutoCAD ve SolidWorks yazılımlarından yararlanılmıştır.

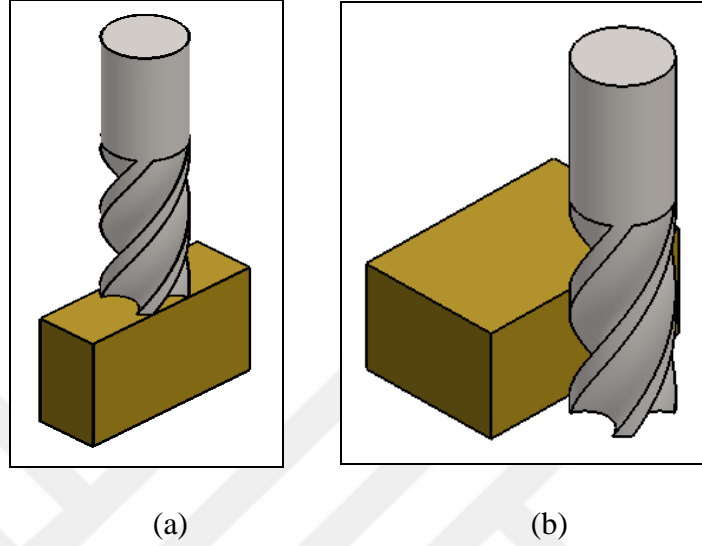
### **6.2.2. Takım Tezgahı, Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı ve Dinamometre**

Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin ( $R_a$ ) ölçümü ISO 4287 standardına uygun Mahr MarSurf PS1 marka ve model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deney şartlarını bozmamak için deneyler bitmeden parçalar deney düzeneğinden sökülmemiş ve yüzey pürüzlülük değerleri iş parçası mengeneğe bağlı iken ölçülmüştür. Bunun için de yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı bir komparatör sehpasına monte edilerek ölçümler yapılmıştır.

Deneyler düzlemsel ve yanal bitirme yüzeylerinin işlenmesi şeklinde iki aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada, düzlemsel yüzeylerin işlenmesinde meydana gelen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmış, ikinci aşamada yanal yüzeylerdeki bitirme yüzeylerinin elde edilmesinde ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Şekil 6.6'da işleme deneylerinde kullanılan alın frezeleme (kesme kuvvetleri için) ve yanal frezeleme (yüzey pürüzlülüğü için) yöntemleri görülmektedir.

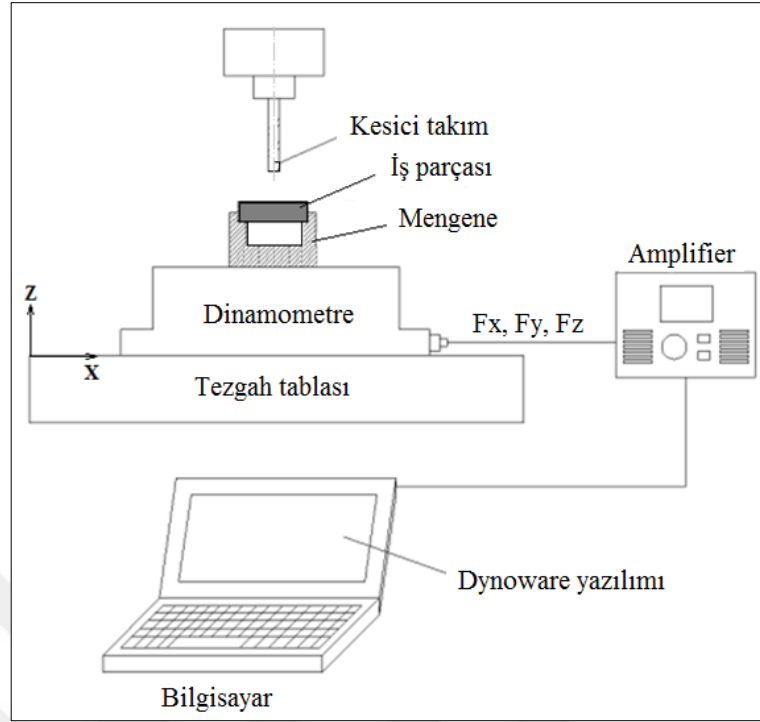
İşleme deneyleri kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü deneyleri olmak üzere iki farklı CNC dik işlem merkezinde kesme sıvısı kullanılmadan yapılmıştır. Kesme kuvvetleri deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü atölyesinde bulunan Johnford VMC – 550 CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük deneyleri ise Çankırı Karatekin Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Makine Atölyesi CNC

Laboratuvarında bulunan Taksan TMC – 500V CNC dik işlem merkezinde yapılmıştır.



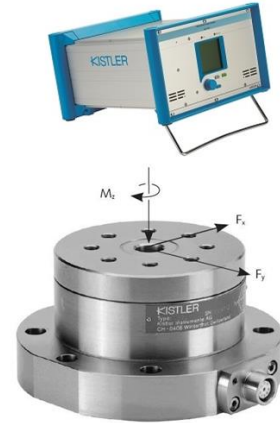
Şekil 6.6. a) Alın frezeleme ve b) yanal frezeleme.

Şekil 6.7’de kesme kuvvetlerinin ölçülebilmesi için kurulan deney düzeneği şematik olarak gösterilmektedir. Kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesi için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği CNC AR – GE laboratuvarında bulunan CNC dik işleme merkezine bağlanan, üç eksen kuvvet bileenlerini ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) aynı anda ölçme kapasitesine sahip, Kistler 9272-A tipi dinamometre kullanılmıştır. Deney setinin tasarımında Kistler 9272-A 4 bileşenli piezo-elektrik dinamometre, veri okuma kartına (Kistler PCIM DAS 1602/16) aktarılmasında Kistler 5070-A çok kanallı amplifier, 1677-A5 veri kablosu, 1500-B15 kablo, RS232 kablo ve son olarak da verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu Kistler Dynoware 2825A-02-01 yazılımı hazır olarak temin edilmiştir. Şekil 6.8’de kullanılan dinamometre ve amplifierin resmi ve teknik özellikleri verilmiştir. Tasarımı yapılan sistemde kuvvet verileri, iş parçası ile dinamometre arasında doğrudan temas sağlanarak iş parçası üzerinden alınmıştır.



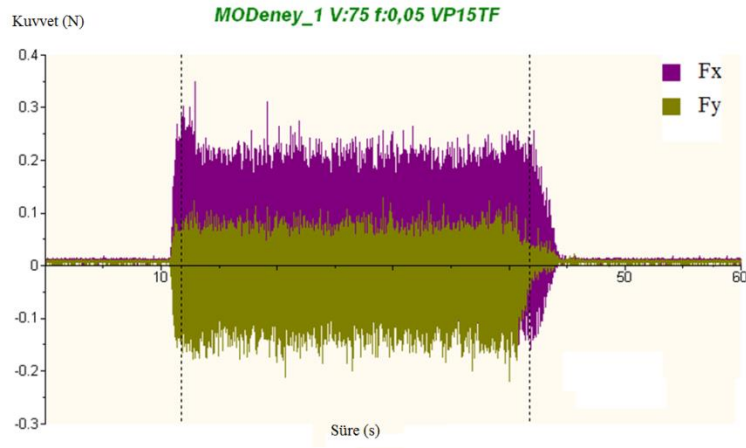
Şekil 6.7. Kesme kuvvetleri deney düzeneği.

Dinamometre Teknik Özellikleri	Kistler 9272 A	Amplifier Teknik Özellikleri	5070A01100
Kalibrasyon	Var	Kanal sayısı	8
Ölçme aralığı		Açıklama	19" rack
$F_x, F_y$	$\pm 5 \text{ kN}$	Bağlantı	Fischer flange 9 pol. neg.
$F_z$	$-5 - +20 \text{ kN}$	Ölçüm aralığı	$\pm 200 - 200000 \text{ pC}$
$M_z$	$\pm 200 \text{ kN}$	Frekans aralığı	$\approx 0 > 45 \text{ kHz}$
Hassasiyet		Çıktı sinyali	$\approx 10 \text{ V}$
$F_x, F_y$	$\approx -7,8 \text{ pC/N}$	Güç	100 - 240 V
$F_z$	$\approx -3,5 \text{ pC/N}$	Arayüz	RS 232C
$M_z$	$\approx -160 \text{ pC/N}$	Boyutlar	$\varnothing 100 \times 70 \text{ mm}$
Doğal Frekans		Bağlantı	Fischer flange 9 pol. neg.
$f_n(x,y)$	$\approx 3,1 \text{ kHz}$	Sızdırmazlık	IP67
$f_n(z)$	$\approx 6,3 \text{ kHz}$	Ağırlık	4,2 kg
$f_n(M_z)$	$\approx 4,2 \text{ kHz}$		
Çalışma sıcaklığı	$0 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$		
Boyutlar	$\varnothing 100 \times 70 \text{ mm}$		
Bağlantı	Fischer flange 9 pol. neg.		
Sızdırmazlık	IP67		
Ağırlık	4,2 kg		



Şekil 6.8. Deneyde kullanılan dinamometre ve ampliflerin teknik özellikleri.

Kistler Dynoware 2825A-02-01 yazılımı aracılığıyla elde edilen kesme kuvvetleri grafiği Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Bu grafikten kesme kuvvetleri belirlenirken en yüksek kesme kuvveti değerleri olan  $F_x$  değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Grafiklerin en başındaki ve en sonundaki kararsız kısımları hesaplama dışı tutularak, nispeten daha kararlı olan kısmın ortalaması kesme kuvveti olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 6.9. Dynoware yazılımı ile elde edilen kesme kuvvetleri grafiği.

### 6.3. TAGUCHI METODU VE OPTİMİZASYONUN UYGULANIŞI

Bu çalışmada, üç farklı molibden alaşımı olan saf molibden, TZM ve MHC için frezeleme ile şekillendirme işlemlerinde oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri için en uygun kesici takım ve kesme parametresi optimizasyonu yapılmıştır. Kesici takım (Kt), kesme hızı ( $V_c$ ) ve ilerleme miktarı (f) kontrol faktörleri olarak belirlenmiş ve her kontrol faktörü için 4 farklı seviye seçilmiştir.

Kontrol faktörleri ve kontrol faktörlerinin seviyeleri Çizelge 6.5'te verilmiştir. Deney tasarımında Taguchi metodunun L16 dikey dizini kullanılmış ve Çizelge 6.6'da deneyler detaylı olarak verilmiştir. Her malzeme için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri kalite karakteristiği olarak belirlenmiş ve kesici takım ve kesme parametrelerinin optimizasyonu için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır.

Çizelge 6.5. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol faktörleri	Birim	Kod	Seviyeler			
			1	2	3	4
Kesici takım (Kt)	-	A	VP15TF	KC522M	4240	H13A
İlerleme miktarı (f)	mm/diş	B	0,05	0,1	0,15	0,2
Kesme hızı ( $V_c$ )	m/dak	C	75	100	125	150

Kontrol faktörlerinin uygun seviyelerini belirlemek için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin en küçük olduğu durum belirlenmelidir. Bu amaçla S/N

oranının hesaplanmasında Eşitlik 4.1’de verilen “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini belirlemek için deney sonuçlarına %95 güven aralığında ANOVA uygulanmıştır. Taguchi metodu ve ANOVA Minitab17 programı ile yapılmıştır.

Çizelge 6.6. Taguchi L16 dikey dizini.

Deney No	Kontrol faktörleri					
	A	Kesici takım (Kt)	B	İlerleme miktarı (mm/diş)	C	Kesme hızı (m/dak)
<b>Saf Molibden</b>						
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150
5	2	KC522M	1	0,05	2	100
6	2	KC522M	2	0,1	1	75
7	2	KC522M	3	0,15	4	150
8	2	KC522M	4	0,2	3	125
9	3	4240	1	0,05	3	125
10	3	4240	2	0,1	4	150
11	3	4240	3	0,15	1	75
12	3	4240	4	0,2	2	100
13	4	H13A	1	0,05	4	150
14	4	H13A	2	0,1	3	125
15	4	H13A	3	0,15	2	100
16	4	H13A	4	0,2	1	75
<b>TZM</b>						
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150
5	2	KC522M	1	0,05	2	100
6	2	KC522M	2	0,1	1	75
7	2	KC522M	3	0,15	4	150
8	2	KC522M	4	0,2	3	125
9	3	4240	1	0,05	3	125
10	3	4240	2	0,1	4	150
11	3	4240	3	0,15	1	75
12	3	4240	4	0,2	2	100
13	4	H13A	1	0,05	4	150
14	4	H13A	2	0,1	3	125
15	4	H13A	3	0,15	2	100
16	4	H13A	4	0,2	1	75
<b>MHC</b>						
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150
5	2	KC522M	1	0,05	2	100
6	2	KC522M	2	0,1	1	75
7	2	KC522M	3	0,15	4	150
8	2	KC522M	4	0,2	3	125
9	3	4240	1	0,05	3	125
10	3	4240	2	0,1	4	150
11	3	4240	3	0,15	1	75
12	3	4240	4	0,2	2	100
13	4	H13A	1	0,05	4	150
14	4	H13A	2	0,1	3	125
15	4	H13A	3	0,15	2	100
16	4	H13A	4	0,2	1	75

## **6.4. TERSİNE MÜHENDİSLİK İLE KESİCİ TAKIMIN MODELLENMESİ**

### **6.4.1. Kesici Takım Modelinin Hazırlanması**

İşleme esnasında kesici takımın maruz kaldığı yükler kesme işleminin ekonomikliğini ve ihtiyacımız olan gücün belirlenmesi açısından en önemli parametredir. Kesici takım ve kesici takımların kesme esnasında maruz kaldığı yükler kesici takımlardaki aşınmalar açısından çok önemli bir etmendir. Bu nedenle kesici takımda oluşan gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir [105-107].

### **6.4.2. Tarama Verilerinin Oluşturulması**

Çalışmada kesici takımlara ait veriler 3B tarayıcı yardımıyla alınmıştır. Kesici takımların taranmasında kullanılan tarayıcı 30 mm küçük, 1500 mm büyük görüş alanına sahip, minyatür projeksiyon tekniği ile çalışan, LED ışık kaynaklı (kırmızı, mavi, beyaz ve yeşil), 0,8 ila 8,0 megapiksel arasında değişen beş farklı çözünürlüğe göre ayarlanabilmektedir. Pozlama süresi 1 saniye'den küçük olan tarayıcı BRE, STL, PLY ve VRML veri formatlarını desteklemektedir.

Kesici takımların hassas bir şekilde bilgisayar ortamında modelini oluşturabilmek için parçanın en ince detayına kadar görüntüsünü almak gerekmektedir. Metal parçaların taranması sırasında oluşan yansımalar parçanın bazı bölgelerinde eksik veri oluşumuna yol açabilir. Bunu önlemek için bu tür parçalarda yansıma önleyici sprey kullanılarak parça boyama işlemi yapılır. Sprey ile boyanan kesici takımların, eşleştirmeyi kolaylaştırmak için her iki yüzeyine de işaretleme yapılmıştır. Tarama işlemi Aicon Smart Scan marka tarayıcı ile yapılmıştır Şekil 6.10'da tarama sürecinin fotoğrafı gösterilmektedir.





Şekil 6.10. Tarama süreci görüntüsü.

Tarama işlemini tamamladıktan sonra tarayıcının göremediği boşluklar program tarafından en küçük boşluktan başlayarak doldurulmuştur. Doldurma işlemi tamamlandıktan sonra görüntü STL (Stereographic) formatında kaydedilmiştir.

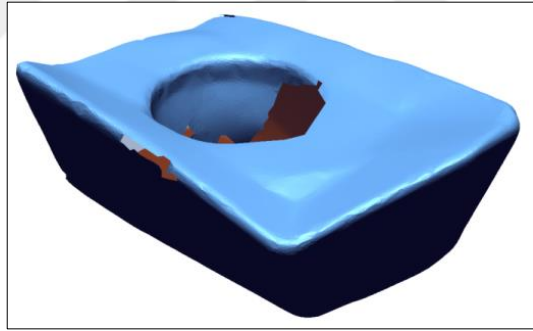
#### **6.4.3. 3B Modelin İnşa Edilmesi**

Bu bölümde kesici takımın, sonlu elemanlar analizi için gerekli olan 3B (üç boyutlu) modelinin tersine mühendislik yazılımı ile elde edilmesi anlatılmaktadır. Modelin tekrar oluşturulması ile ilgili işlemler için Geomagic Design X yazılımı kullanılmıştır. Aicon Smart Scan tarayıcı ile taranıp tarayıcı yazılımında oluşturulan kesici takıma ait koordinat bilgilerini içeren nokta bulutu Geomagic Design yazılımında açılarak üzerinde gerekli işlemler yapılmaktadır. Geomagic Design X yazılımı içerisine alınan nokta bulutu verisi StereoLithography (STL) formatındadır. Kesici takım üzerinden elde edilen nokta sayısı 230077 adettir. Şekil 6.11’de kesici takımdan elde edilen nokta bulutu veri görüntüsü gösterilmiştir.



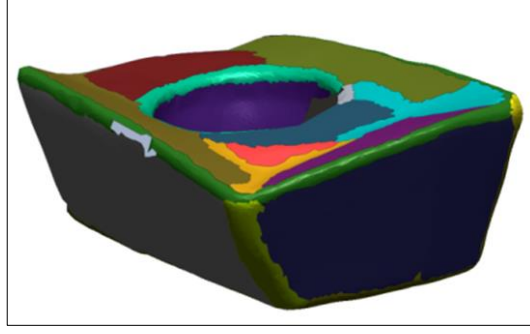
Şekil 6.11. Nokta bulutu veri görüntüsü.

Nokta bulutu üzerinden tekrar modelleme yapılabilmesi için noktalar arasına ağ model oluşturulmalıdır. Bunun için Mesh Building Wizard yardımı ile ağ boyutları ve noktalar arasındaki en yüksek ve en düşük uzunluk bilgisine göre ağ model oluşturulur. Ağ yapısı, en büyük ağ boyutu 2,5 mm ve noktalar arası en fazla uzaklığı 0,1 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 6.12’de ağ örgü model görüntüsü görülmektedir.



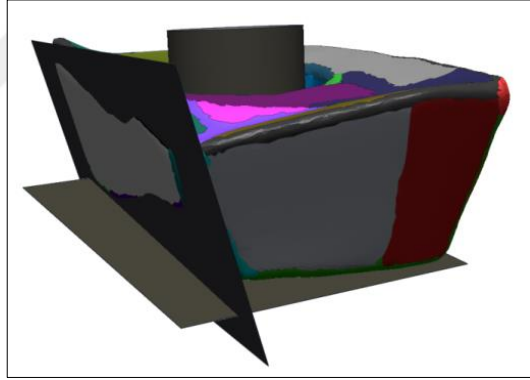
Şekil 6.12. Ağ örgü model görüntüsü.

Ağ modeli, noktaların birbirleri ile uzaklık değişimleri dikkate alınarak eğrisellik ve yarıçap dönüşümlerine göre bölgelere ayrılır. Bölgelerin ayrıştırılmasının nedeni, parça üzerindeki pah, yarıçap, düzlem veya eğrisel formların tespit edilerek, bu bölgelerin buna uygun olacak şekilde modellenmesidir. Şekil 6.13’te Geomagic Design X yazılımının izin verdiği yoğunluk değişkeni %75 olacak şekilde ayrıştırılan bölge taraması verilmiştir. Bu hesaplama süresini belirleyen en önemli değişkenler, bilgisayar işlemci kapasitesi, ağ yapısı boyutu ve düzenidir. Bölgelerin ayrıştırılmasının ardından kesici takımın çalışma eksenin ve çalışma düzleminin belirlenmesi gerekmektedir.



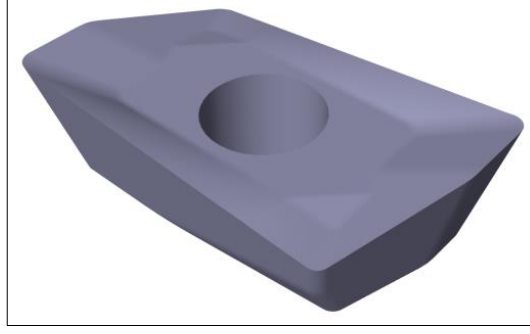
Şekil 6.13. Bölgesel tanımlanmış ağ örgüsü model görüntüsü.

Bölge tanımlaması ile parça üzerinde düzlem ve silindirik yapıların ayrıştırılması sağlanmıştır. Belirlenen bu form yapılarından yararlanılarak, parçanın yan yüzeyine düzlem ve ortasına bir düzlemsel yüzey oluşturulur. Bunun için Surface Primitives komutundan ilgili bölge ve oluşturulmak istenen form yapısı seçilir. Şekil 6.14'te kesici takımın bağlantı merkezine oluşturulan silindir ve düzlem yüzey gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Tanımlanmış temel yüzey elemanlarının oluşturulması.

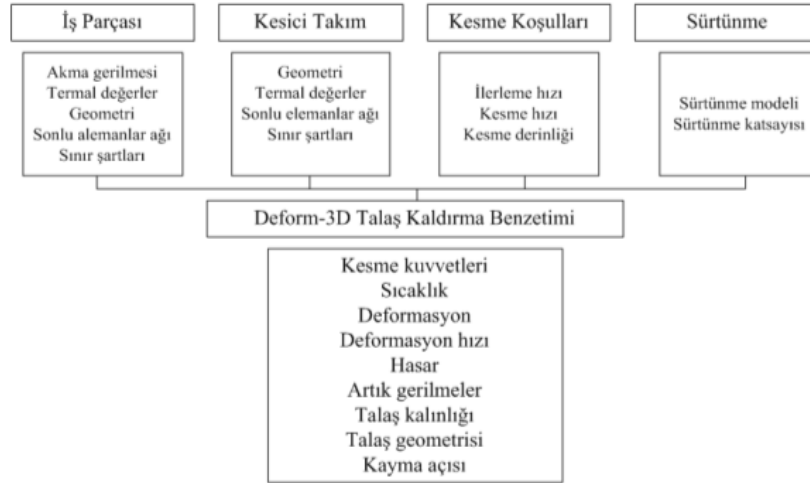
Elde edilen 3B kesici takım modeli ile nokta bulutu verisi arasındaki sapma miktarının minimize edilmesi çok önemlidir. Bunun için bölge tanımlamaları ile elde edilen tüm yüzeyler için sapma analizinin (deviation analysis) yapılması gerekmektedir. Sapma analizi parça boyutu, çalışma hassasiyeti ve bölgesel kararlılık değişkenleri dikkate alınarak incelenir. Bu kesici takımlar için izin verilen en yüksek sapma miktarı 0,05 mm'dir. Bu nedenle oluşturulan her yüzeyde bu analiz kontrolü yapılmıştır. Şekil 6.15'te nihai 3B kesici takım geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.15. 3B model görüntüsü.

## 6.5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULANIŞI

Talaşlı imalat işleminin de sonlu elemanlar analizini (SEA) gerçekleştirmek için kullanılan programa takım ile iş parçasının mekanik ve termal değerleri, kesme parametreleri, sürtünme cinsi ve katsayısı, işlemin mekanik ve termal sınır şartları gibi verilerin girilmesi gerekmektedir. Bu veriler ne kadar doğru olursa, ortaya çıkan sonuçlar da deneysel sonuçlarla o kadar uyumlu olacaktır [103]. Şekil 6.16’da talaşlı imalat işlemlerinde SEA uygulanabilmesi için gerekli olan giriş ve çıkış parametreleri gösterilmiştir.



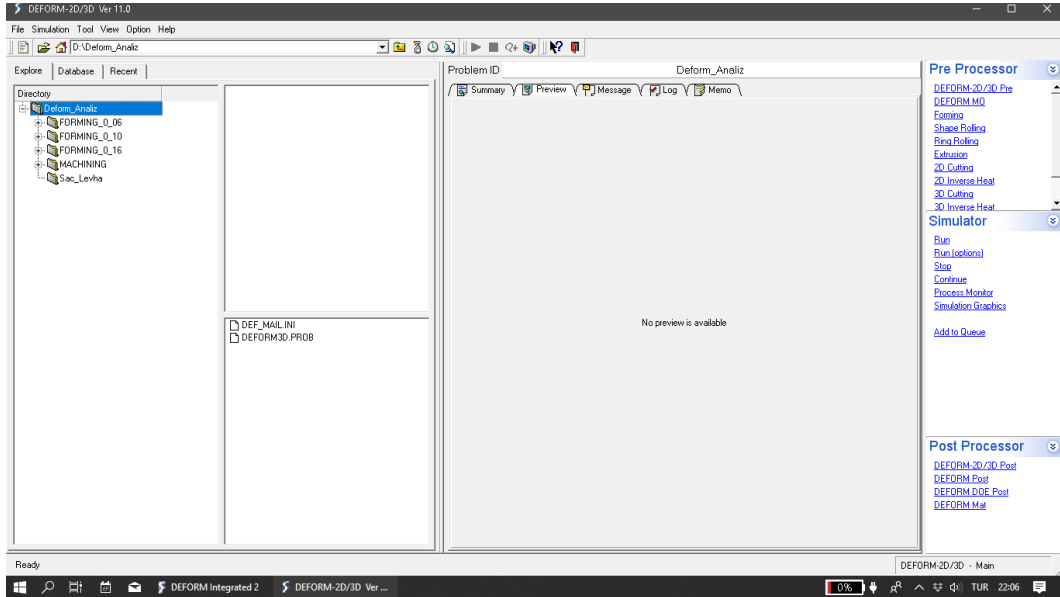
Şekil 6.16. SEA giriş ve çıkış parametreleri [102].

Talaşlı imalat işlemlerinin bilgisayar yardımıyla analizlerin gerçekleştirilme süreleri oldukça fazladır. Hesaplama süresi, yapılacak operasyonun çeşidi ve hassasiyeti ile

doğru orantılıdır. Bu nedenle operasyon durumu, hassasiyet ve gereksinimlerin net olarak belirlenmesi simülasyon süresinin belirlenmesinde en belirleyici unsurdur.

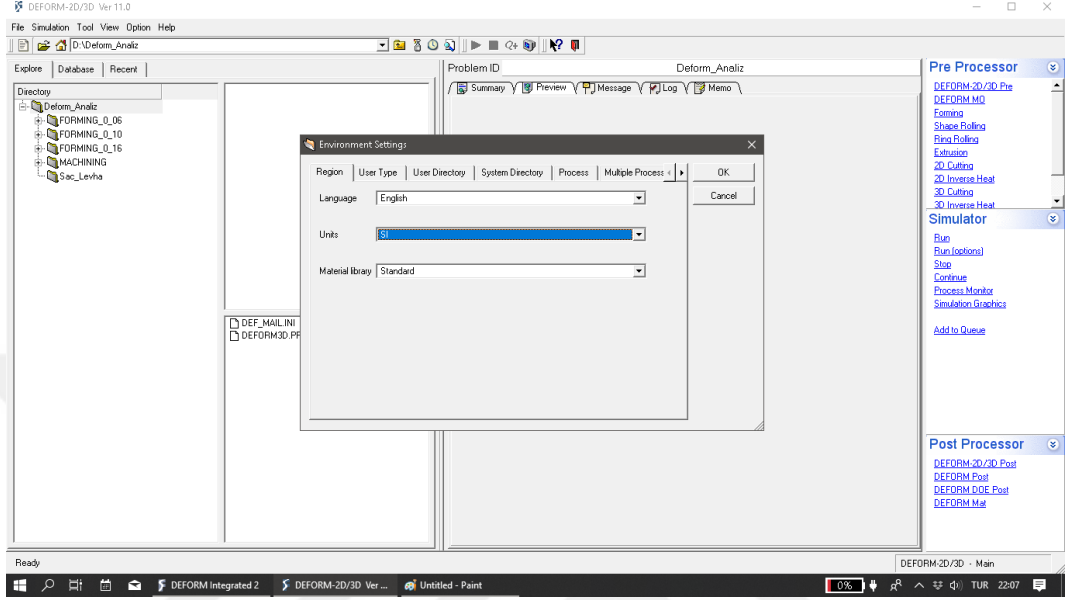
Bu çalışmada yapılacak SEA ile talaşlı imalat işlemi esnasında kesici takım üzerinde etkili olan yükleri tespit etmek amaçlanmıştır. Bu nedenle tüm unsurların doğru şekilde tanımlanması ve konumlandırılması önemlidir. Kesici takım tersine mühendislik yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Takım tutucu ve kesici takım birleştirilerek yekpare bir parça gibi dönme ve öteleme hareketleri verilmiştir. Simülasyon sonuçlarının doğru sonuçlara yaklaşabilmesi için gerekli olan en uygun mesh yapısı ve boyutu verilmelidir. Deney verilerine uyumlu olarak kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinlikleri verilerek yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ile simülasyon sonuçları mukayese edilmiştir.

SEA DeForm – 3D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmış, analiz yapılış sıralaması ve programa girilen veriler özetlenmeye çalışılmıştır. DeForm – 3D SEA programı çalıştırıldığında ilk olarak Şekil 6.17’de gösterilen ana ekran (açılış sayfası) gelir.



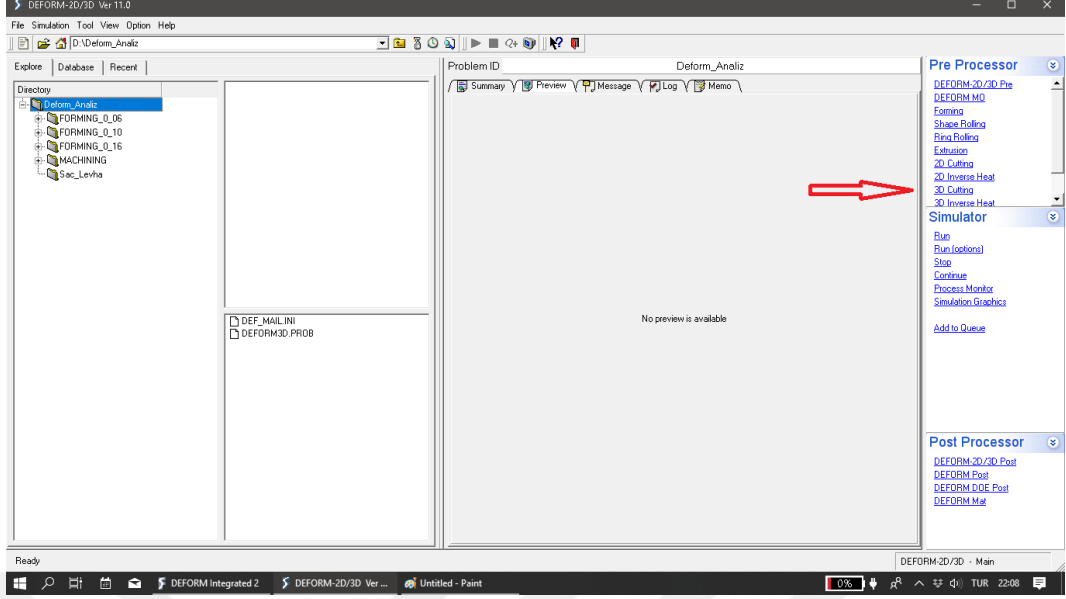
Şekil 6.17. DeForm – 3D ana ekranı.

Analizde kullanılacak birim sistemi “Environment Setting” penceresinden "SI" birim sistemi olarak seçilir ve “OK” kutucuğu işaretlenerek onaylama yapılmış olur. Şekil 6.18’de Deform – 3D birim sistemi ayarlama ara yüzü gösterilmektedir.



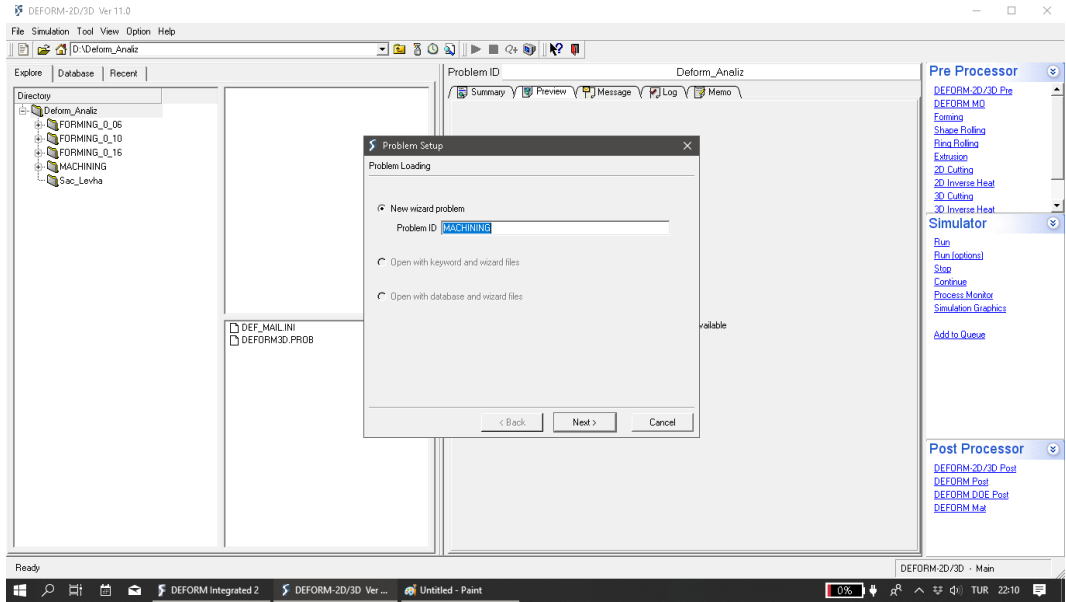
Şekil 6.18. DeForm – 3D birim sistemi ayarlama.

Birim sistemi ayarlamaları yapıldıktan sonra ana ekranda “Pre Processor” başlığı altında bulunan “3D cutting” seçilerek analiz tipi olan 3 boyutlu kesme işlemi analizi süreci başlatılır. Şekil 6.19’da ana ekran üzerinde “3D cutting” sekmesi görülmektedir.



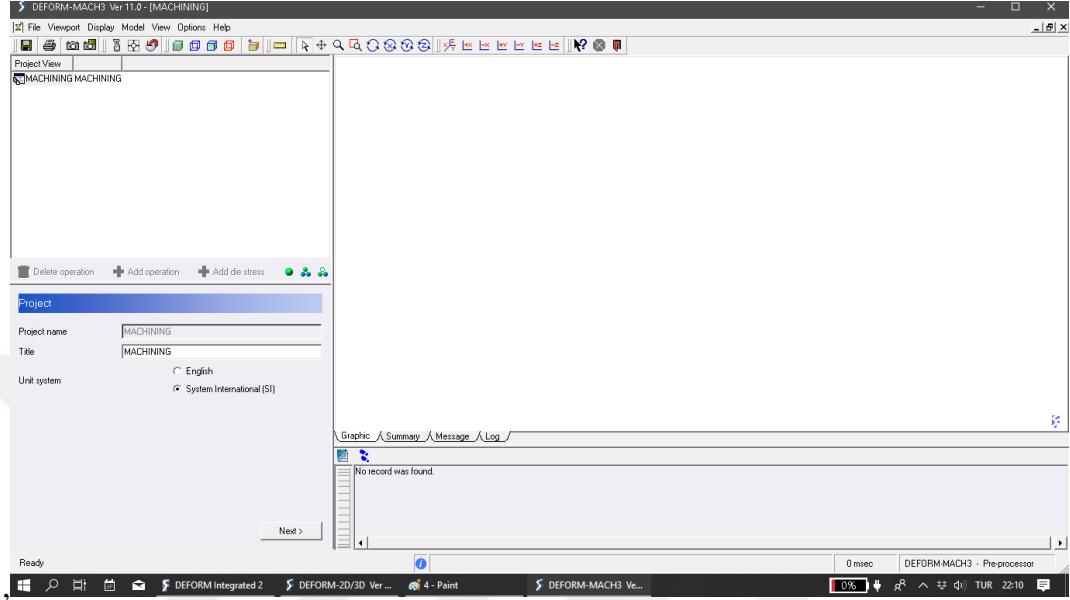
Şekil 6.19. 3D cutting sekmesi.

Analiz tipi belirlendikten sonra “Problem setup” sekmesi gelir. Bu sekmede bu problem için bir isim (machining) verilir ve “NEXT” kutucuğu ile bir sonraki işleme geçilir. Şekil 6.20’de yeni bir problem için isim verme aşaması gösterilmektedir.



Şekil 6.20. Probleme isim tanımlama.

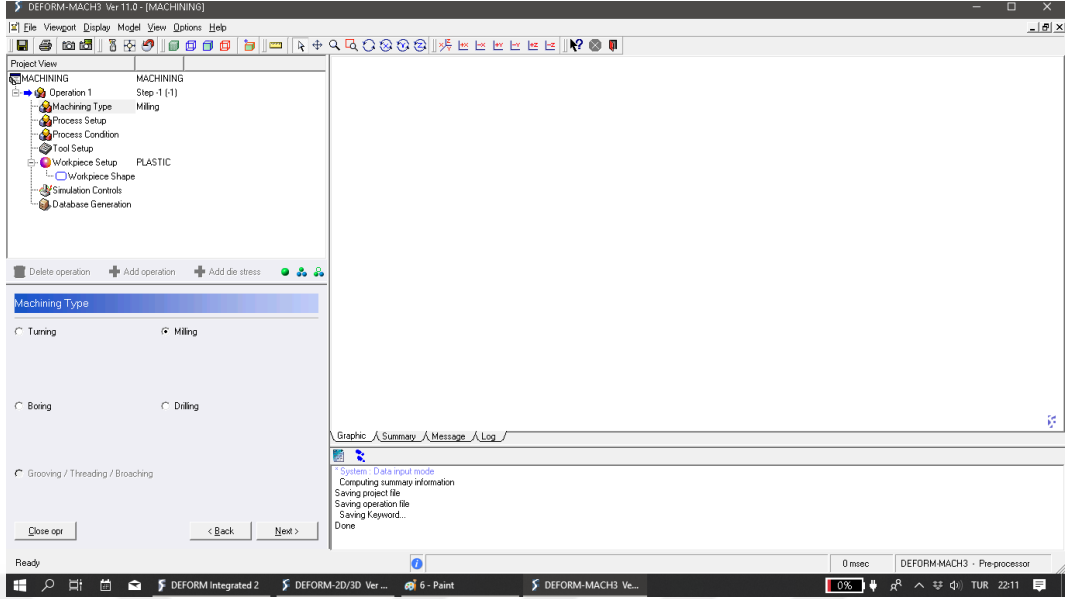
Bu penderede problem için kullanılacak birim sistemi ayarları belirlenir. Bu problem için “SI” birim sistemini kullanılmıştır. “SI” birim sistemi seçilir ve “NEXT” kutucuğunu onaylayarak devam edilir (Şekil 6.21)



Şekil 6.21. Birim sistemi seçme arayüzü.

Bu işleme süreci içerisinde farklı operasyon tipleri analiz edilebilir. Gelen pencereden operasyonlar için isimler verilebilir. Bu çalışmada tek bir operasyon olacaktır. Operasyon için bir isim verilir ve “NEXT” kutucuğu ile onaylanır ve gelen pencereden işleme tipi olan frezeleme “Milling” seçilir (Şekil 6.22)



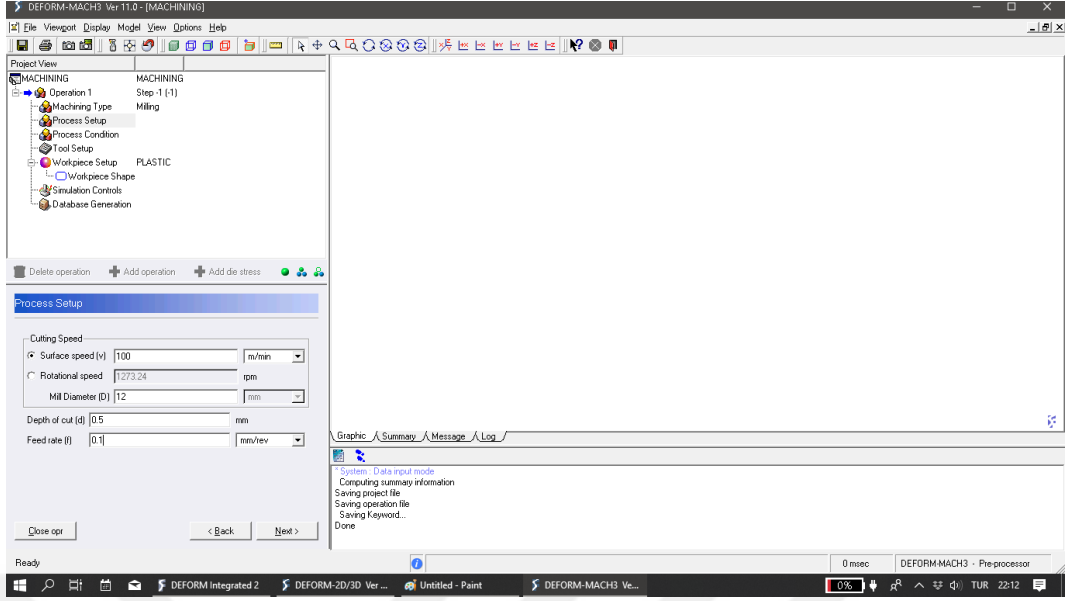


Şekil 6.22. Frezeleme operasyonunu seçimi.

Devam eden pencerede frezeleme ayarlarının yapıldığı “Process Setup” ara yüzü gelir. Burada kesme hızı, takım çapı, talaş (kesme) derinliği ve ilerleme miktarları ile ilgili bilgiler birimlerine dikkat edilerek girilir (Şekil 6.23) “NEXT” seçilerek bir sonraki işleme devam edilir. Çizelge 6.7’de sonlu elemanlar analizinde kullanılan hız değerleri verilmiştir.

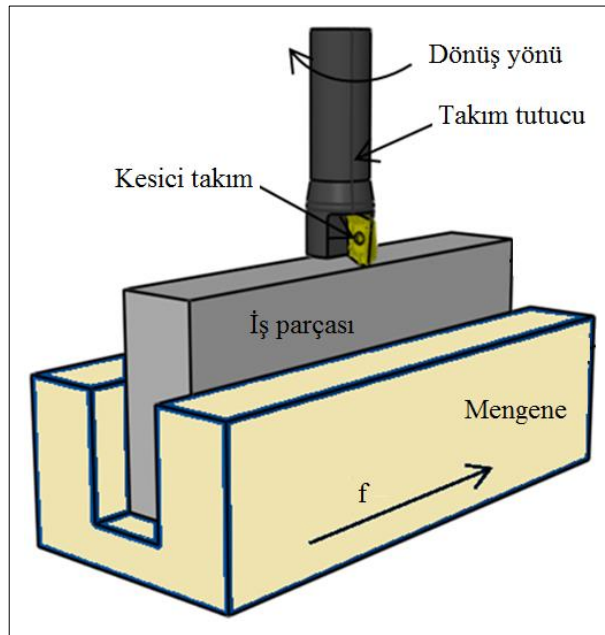
Çizelge 6.7. SEA için kullanılan hız değerleri.

Analiz seviyesi	Kesme hızı (m/dak)	Kesme hızı (m/s)	İlerleme miktarı (mm/diş)	Devir (dev/dak)	Devir (dev/s)
Analiz 1	75	1,250	0,05	1990	33,16
Analiz 2	100	1,666	0,1	2654	44,23
Analiz 3	125	2,083	0,15	3317	55,28
Analiz 4	150	2,50	0,2	3981	66,35



Şekil 6.23. Frezeleme ayarları.

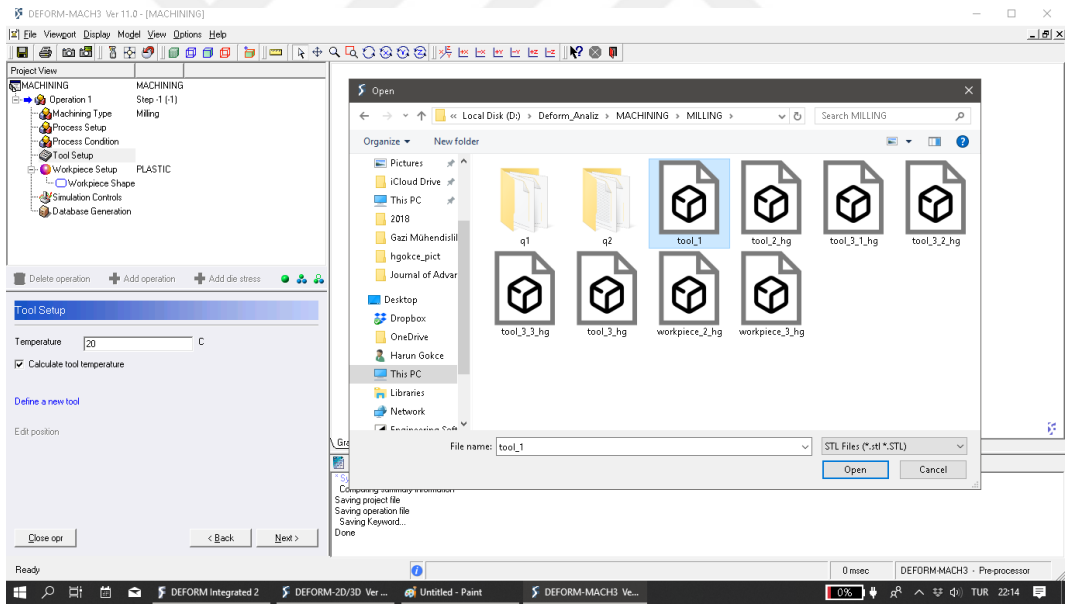
Kesici takım her üç ekseninde de (X, Y ve Z) sınırlandırılmış (sabitlenmiş) ve sadece dönme hareketi verilmiştir. İş parçasına ise sadece X ekseninde hareket verilmiştir. İş parçası, takıma doğru  $f$  ilerleme miktarı ile X ekseninde hareket etmekte, kesici takım ise dönme hareketini (devir) gerçekleştirecektir. Şekil 6.24'te iş parçası ve kesici takım hareketleri verilmiştir.



Şekil 6.24. İş parçası ve kesici takım hareketleri.

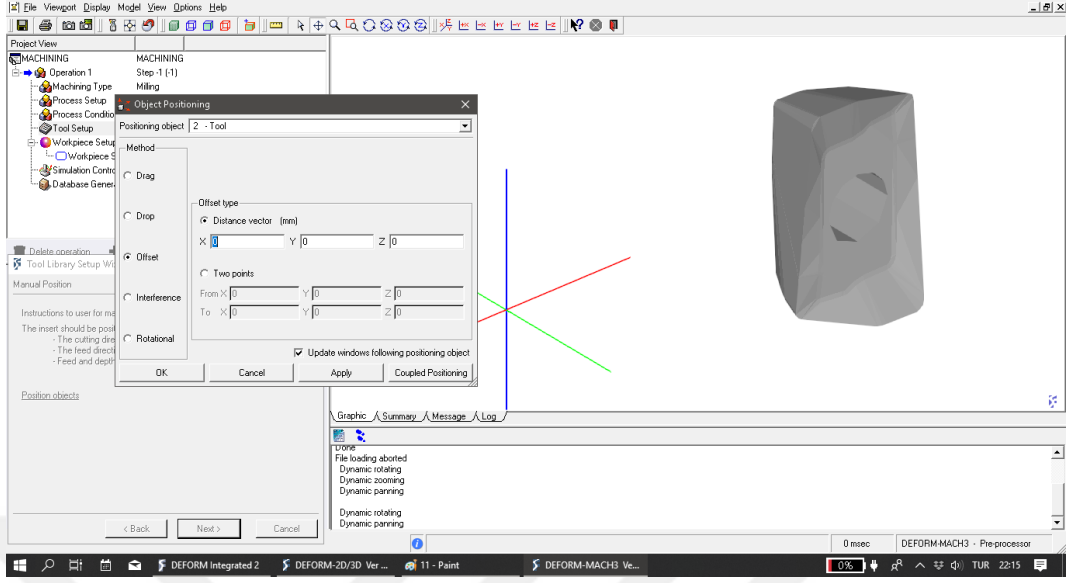
İşleme durumu için diğer verilerin girildiği bu pencerede çalışma ortamının sıcaklığı, kaplama varsa ısı iletim katsayısı, takım – iş parçası arasındaki ısı iletim katsayısı ve sürtünme katsayısı gibi bilgiler girilerek işleme devam edilir. Analiz sonuçlarında ısı ile ilgili sonuç istiyorsak bu bilgilerin kesin olarak girilmesi gerekmektedir. Bu çalışma sonucunda kesme kuvvetleri değerlendirileceğinden, burada yapılacak olası hatalar ve/veya eksiklikler sonuçlar üzerinde önemsenmeyecek seviyelerde olacaktır.

Devam eden işlem basamağında kesici takım geometrisi ve özellikleri gelmektedir. İş parçası ve kesici takım geometrileri bir “STL” dosyasından aktarılabilir. Bu çalışmada kesici takım tersine mühendislik yöntemleri ile tasarlanmış ve “STL” dosya biçimine çevrilerek DeForm – 3D programının kullanabileceği formatta kaydedilmiştir. Kesici takım Şekil 6.25’te gösterilen ekrandan seçilerek probleme eklenir.



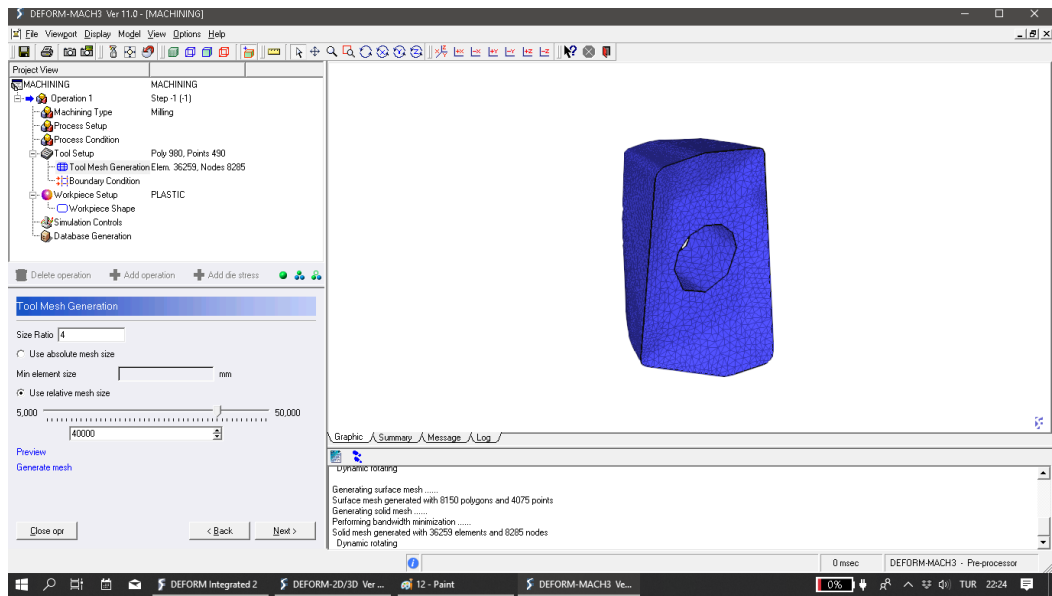
Şekil 6.25. Kesici takım seçim ekranı.

Kesici takımın çalışma düzleminde nereye konumlandırılacağı bilgisi Şekil 6.26’daki pencere yardımıyla girilir. Talaşlı imalat bir plastik deformasyon sürecidir. Bundan dolayı iş parçası “plastik”, kesici takım ve takım tutucunun ise “rijid” olarak tanımlanmaları gerekir. Kesici takımın malzeme seçimi DeForm – 3D programının kütüphanesi yardımı ile yapılmıştır ancak bu seçim kesici takım rijid seçildiğinden istediğimiz analiz sonuçları üstünde etkisi olmayacaktır.



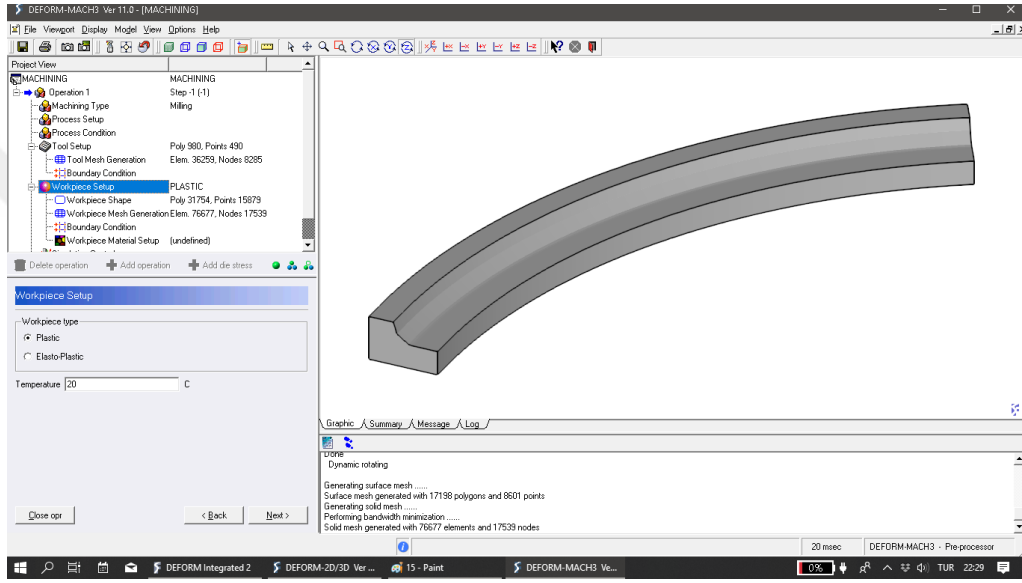
Şekil 6.26. Kesici takım konumlandırma ekranı.

Talaşlı imalat analizleri esnasında, materyalin ve kafesin bozulması nedeniyle yüzlerce kez bir düz örgü yeniden oluşturacaktır. Analiz sonuçlarının hassasiyetini etkilemeden kesici takımın ve deforme olacak iş parçasının gerekli olan kısımlarının mesh örgüsü (bölgesel mesh) daha sık üretilmelidir. Bölgesel mesh yapısı analiz hesaplamalarının süresini kısaltmak için yapılır. Şekil 6.27’de kesici takım için belirlenen mesh örgüsü gösterilmiştir.

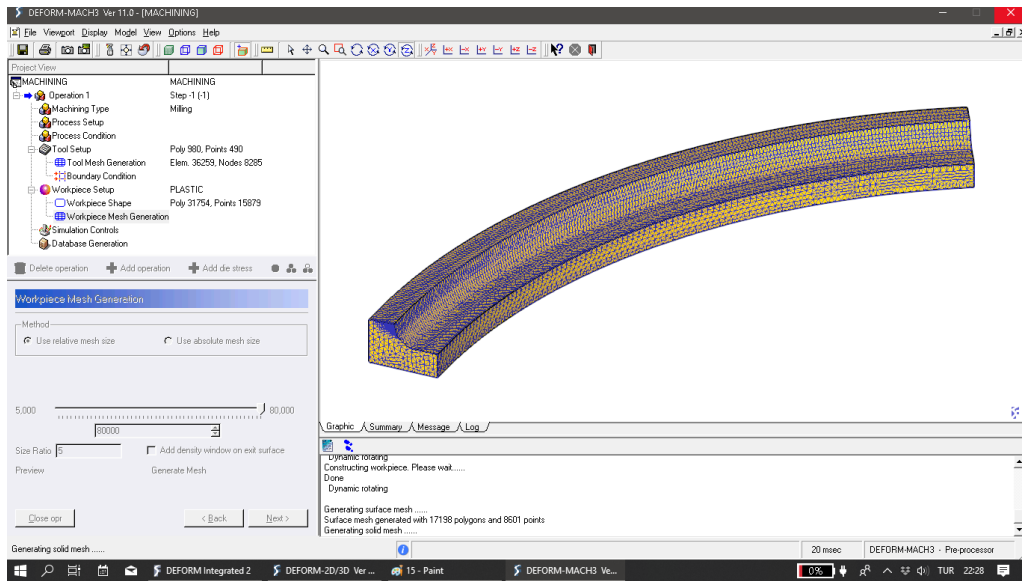


Şekil 6.27. Kesici takım mesh örgüsü.

Şekil 6.28’de iş parçası ile ilgili bilgiler sırası ile girilmiştir. İş parçası plastik şekil değiştireceği için “Plastic” seçilmiş, geometrik bilgileri girilmiş, mesh tanımlamaları (bölgesel mesh) yapılmış, sınır koşullar verilmiş (her eksen için sabitleme yapılmış) ve malzeme ataması DeForm – 3D kütüphanesinden seçilerek kesici takım ile ilgili işlem tamamlanmıştır. Şekil 6.29’da iş parçası mesh örgüsü gösterilmiştir. Kesici takım 40 000 eleman, iş parçası ise 80 000 eleman kullanılarak mesh işlemi gerçekleştirilmiştir.

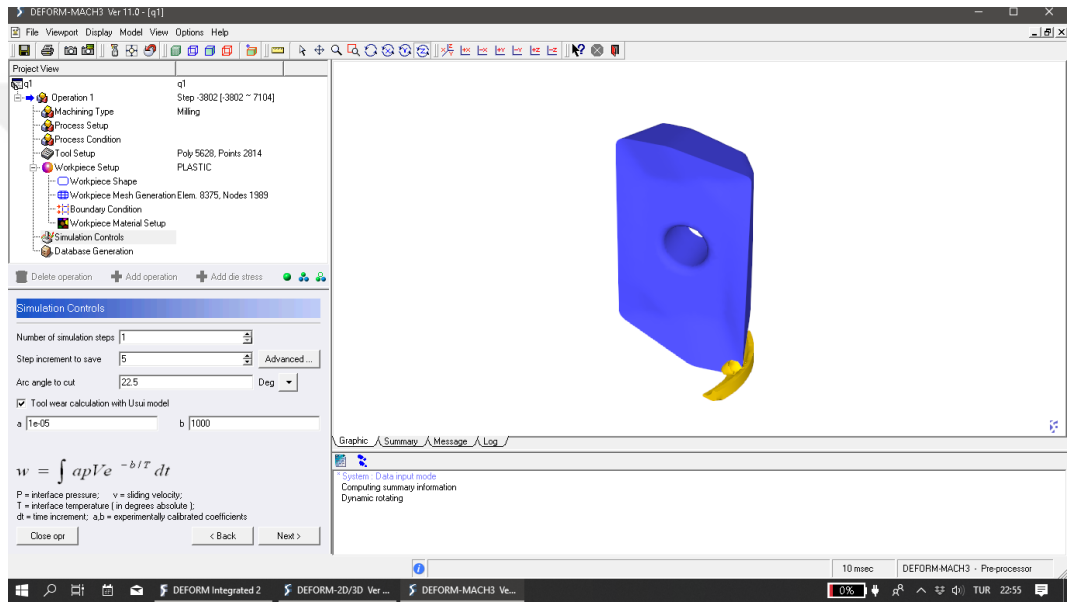


Şekil 6.28. İş parçası tasarlama ve konumlandırma.



Şekil 6.29. İş parçası mesh örgüsü.

Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken iş parçası üzerinde, deformasyon işleminin gerçekleştiği alanda sonlu elemanlar ağı daha sık, deformasyon bölgesinden uzakta olan alanda ise daha kaba olarak oluşturulmuştur. Kesici takımın mesh yapısı, iş parçası mesh yapısı kadar kritik değildir. Rijid bir nesne için deformasyon hesaplamalarında “STL” geometrisi daima muhafaza edilir. Mesh örgüsü sadece sıcaklık hesaplamaları için kullanılır [94]. İş parçası ve kesici takım bilgileri girilmiş, hareket ve sınır şartları belirlenmiştir. Bundan sonra ilgili kontrol ve ayarlamalar yapılarak analiz başlatılır (Şekil 6.30)



Şekil 6.30. Analiz ayarları ekranı.

## BÖLÜM 7

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, üç farklı molibden alaşımı (saf molibden, TZM ve MHC) üzerinde frezeleme yöntemi ile işleme deneyleri yapılmıştır. İşleme esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri için en uygun kesici takım ve kesme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Kesici takım (Kt), kesme hızı ( $V_c$ ) ve ilerleme miktarı (f) kontrol faktörleri olarak belirlenmiş ve her kontrol faktörü için 4 farklı seviye seçilmiştir. Deney tasarımında Taguchi metodunun L16 dikey dizini kullanılmıştır. Kontrol faktörleri ve kontrol faktörlerinin seviyeleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Birim	Kod	Seviyeler			
			1	2	3	4
Kesici takım (Kt)	-	A	VP15TF	KC522M	4240	H13A
İlerleme miktarı (f)	mm/diş	B	0,05	0,1	0,15	0,2
Kesme hızı ( $V_c$ )	m/dak	C	75	100	125	150

Her malzeme için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri kalite karakteristiği olarak belirlenmiştir. Kesici takım ve kesme parametrelerinin optimizasyonu için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Kontrol faktörlerinin uygun seviyelerini belirlemek için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin en küçük olduğu durum belirlenmelidir. Bu amaçlar S/N oranının hesaplanmasında Eşitlik 4.1’de verilen “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

Saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının frezelenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri ve “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu ile elde edilen S/N oranları Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. L16 dikey dizinine göre deney sonuçları ve S/N oranları.

Deney no	Kontrol faktörleri					Deney sonuçları		S/N oranı		
	A	Kesici takım (Kt)	B	İlerleme miktarı (mm/diş)	C	Kesme hızı (m/dak)	F <sub>c</sub> (N)	R <sub>a</sub> (μm)	S/N - F <sub>c</sub> (dB)	S/N - R <sub>a</sub> (dB)
<b>Saf molibden</b>										
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75	256	3,898	-48,1648	-11,8168
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100	330	4,354	-50,3703	-12,7778
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125	360	3,693	-51,1261	-11,3476
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150	441	2,375	-52,8888	-7,5133
5	2	KC522M	1	0,05	2	100	426	4,070	-52,5882	-12,1919
6	2	KC522M	2	0,1	1	75	441	4,542	-52,8888	-13,1449
7	2	KC522M	3	0,15	4	150	491	3,420	-53,8216	-10,6805
8	2	KC522M	4	0,2	3	125	504	3,071	-54,0486	-9,7456
9	3	4240	1	0,05	3	125	323	2,865	-50,1841	-9,1425
10	3	4240	2	0,1	4	150	391	2,593	-51,8435	-8,2761
11	3	4240	3	0,15	1	75	390	4,487	-51,8213	-13,0391
12	3	4240	4	0,2	2	100	459	4,176	-53,2363	-12,4152
13	4	H13A	1	0,05	4	150	356	3,207	-51,029	-10,1220
14	4	H13A	2	0,1	3	125	386	3,668	-51,7317	-11,2886
15	4	H13A	3	0,15	2	100	421	4,322	-52,4856	-12,7137
16	4	H13A	4	0,2	1	75	480	4,437	-53,6248	-12,9418
Ortalama							403	3,699	-51,9908	-11,1973
<b>TZM</b>										
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75	199	4,315	-45,9771	-12,6996
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100	267	4,502	-48,5302	-13,0681
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125	289	3,589	-49,2180	-11,0995
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150	387	2,299	-51,7542	-7,2308
5	2	KC522M	1	0,05	2	100	251	4,334	-47,9935	-12,7378
6	2	KC522M	2	0,1	1	75	286	3,985	-49,1273	-12,0086
7	2	KC522M	3	0,15	4	150	367	1,418	-51,2933	-3,0335
8	2	KC522M	4	0,2	3	125	399	2,742	-52,0195	-8,7613
9	3	4240	1	0,05	3	125	284	2,838	-49,0664	-9,0602
10	3	4240	2	0,1	4	150	361	2,120	-51,1501	-6,5267
11	3	4240	3	0,15	1	75	340	4,726	-50,6296	-13,4899
12	3	4240	4	0,2	2	100	419	4,502	-52,4443	-13,0681
13	4	H13A	1	0,05	4	150	290	2,414	-49,2480	-7,6547
14	4	H13A	2	0,1	3	125	350	3,189	-50,8814	-10,0731
15	4	H13A	3	0,15	2	100	354	4,942	-50,9801	-13,8781
16	4	H13A	4	0,2	1	75	413	5,915	-52,3190	-15,4391
Ortalama							329	3,614	-50,1645	-10,6143
<b>MHC</b>										
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75	243	4,821	-47,7121	-13,6627
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100	234	4,204	-47,3843	-12,4733
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125	324	4,083	-50,2109	-12,2196
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150	376	3,484	-51,5038	-10,8416
5	2	KC522M	1	0,05	2	100	281	4,353	-48,9741	-12,7758
6	2	KC522M	2	0,1	1	75	329	3,940	-50,3439	-11,9099
7	2	KC522M	3	0,15	4	150	390	2,769	-51,8213	-8,8465
8	2	KC522M	4	0,2	3	125	421	2,654	-52,4856	-8,4780
9	3	4240	1	0,05	3	125	316	3,060	-49,9937	-9,7144
10	3	4240	2	0,1	4	150	344	2,813	-50,7312	-8,9834
11	3	4240	3	0,15	1	75	357	5,372	-51,0534	-14,6027
12	3	4240	4	0,2	2	100	431	4,793	-52,6895	-13,6121
13	4	H13A	1	0,05	4	150	281	2,838	-48,9741	-9,0602
14	4	H13A	2	0,1	3	125	351	3,510	-50,9061	-10,9061
15	4	H13A	3	0,15	2	100	359	3,846	-51,1019	-11,7002
16	4	H13A	4	0,2	1	75	399	5,570	-52,0195	-14,9171
Ortalama							340	3,882	-50,4941	-11,5440



Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini belirlemek için deney sonuçlarına %95 güven aralığında ANOVA uygulanmıştır. Taguchi metodu ve ANOVA Minitab17 programı ile yapılmıştır.

Üç farklı malzemenin aynı kontrol faktörleri ile işlenmesi sonucunda elde edilen ortalama kesme kuvvetleri; saf molibden için 403 N, TZM için 329 N ve MHC için 340 N olurken, ortalama pürüzlülük değerleri de saf molibden, TZM ve MHC için sırasıyla 3,699  $\mu\text{m}$ , 3,614  $\mu\text{m}$  ve 3,882  $\mu\text{m}$  olmuştur.

### **7.1. KESME KUVVETLERİ**

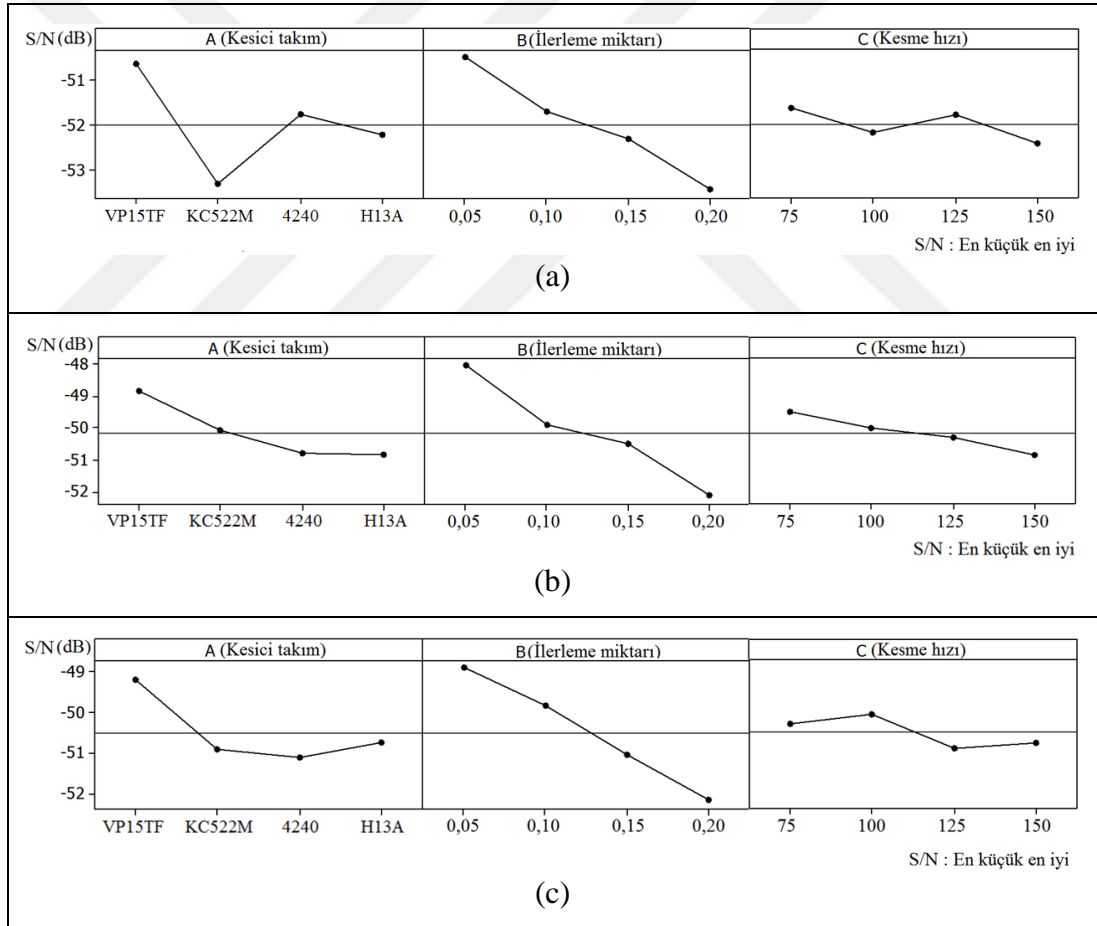
Üç farklı malzeme gurubunun aynı kontrol faktörleri ile işlenmesi sonucunda elde edilen ortalama kesme kuvvetleri; saf molibden için 403 N, TZM için 329 N ve MHC için 340 N olmuştur. Bu sonuçlar kesme kuvvetlerinin işlenen malzemeye göre önemli derecede değiştiğini göstermektedir (Çizelge 7.2).

Her bir malzeme gurubu için gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen S/N için ana etki grafikleri Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Aynı zamanda Çizelge 7.3'te kesme kuvvetleri için hesaplanan ortalama S/N oranlarının kontrol faktörlerine göre dağılımı verilmiştir.

Şekil 7.1'deki ana etki grafikleri ve Çizelge 7.3'teki S/N oranlarının en yüksek ve en düşük noktaları incelendiğinde kesme kuvvetleri üzerinde etkili olan en önemli kontrol faktörünün ilerleme miktarı (f) olduğu görülmektedir. Çizelge 7.3 incelendiğinde, saf molibden, TZM ve MHC'nin işlenmesinde meydana gelen kesme kuvvetleri üzerinde etkili olan kontrol faktörlerinin önem sırası sırasıyla ilerleme miktarı (f), kesici takım (Kt) ve kesme hızı ( $V_c$ ) olduğu görülmektedir. Ayrıca, önem sırasının da her deney malzemesi için aynı olduğu görülmektedir.

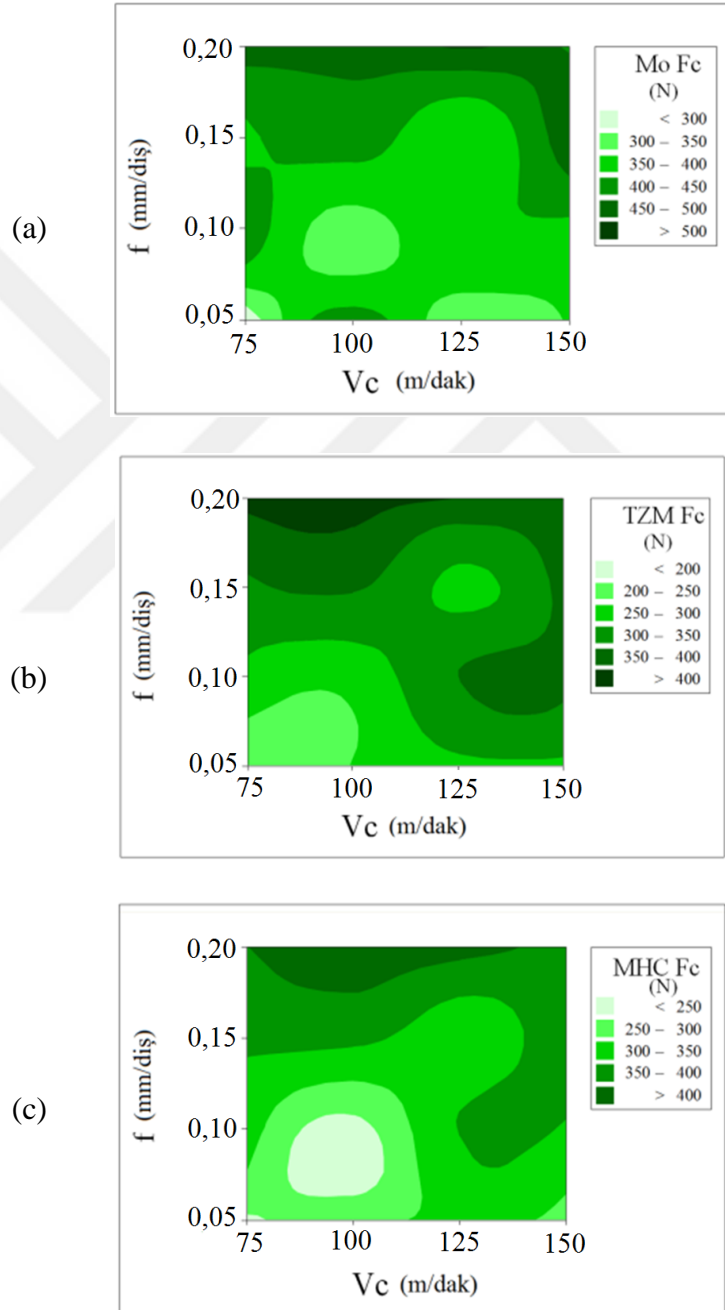
Çizelge 7.3. Kesme kuvvetlerinin ortalama S/N oranları için kontrol faktörlerinin önem sırası.

Kontrol faktörleri	S/N oranları (dB)				Mak - Min	Önem sırası
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4		
<b>Saf molibden</b>						
Kt	-50,64	-53,34	-51,77	-52,22	2,70	2
f (mm/diş)	-50,49	-51,71	-52,31	-53,45	2,96	1
V <sub>c</sub> (m/dak)	-51,62	-52,17	-51,77	-52,40	0,77	3
<b>TZM</b>						
Kt	-48,87	-50,11	-50,82	-50,86	1,99	2
f (mm/diş)	-48,07	-49,92	-50,53	-52,13	4,06	1
V <sub>c</sub> (m/dak)	-49,51	-49,99	-50,30	-50,86	1,35	3
<b>MHC</b>						
Kt	-49,20	-50,91	-51,12	-50,75	1,91	2
f (mm/diş)	-48,91	-49,84	-51,05	-52,17	3,26	1
V <sub>c</sub> (m/dak)	-50,28	-50,04	-50,90	-50,76	0,86	3



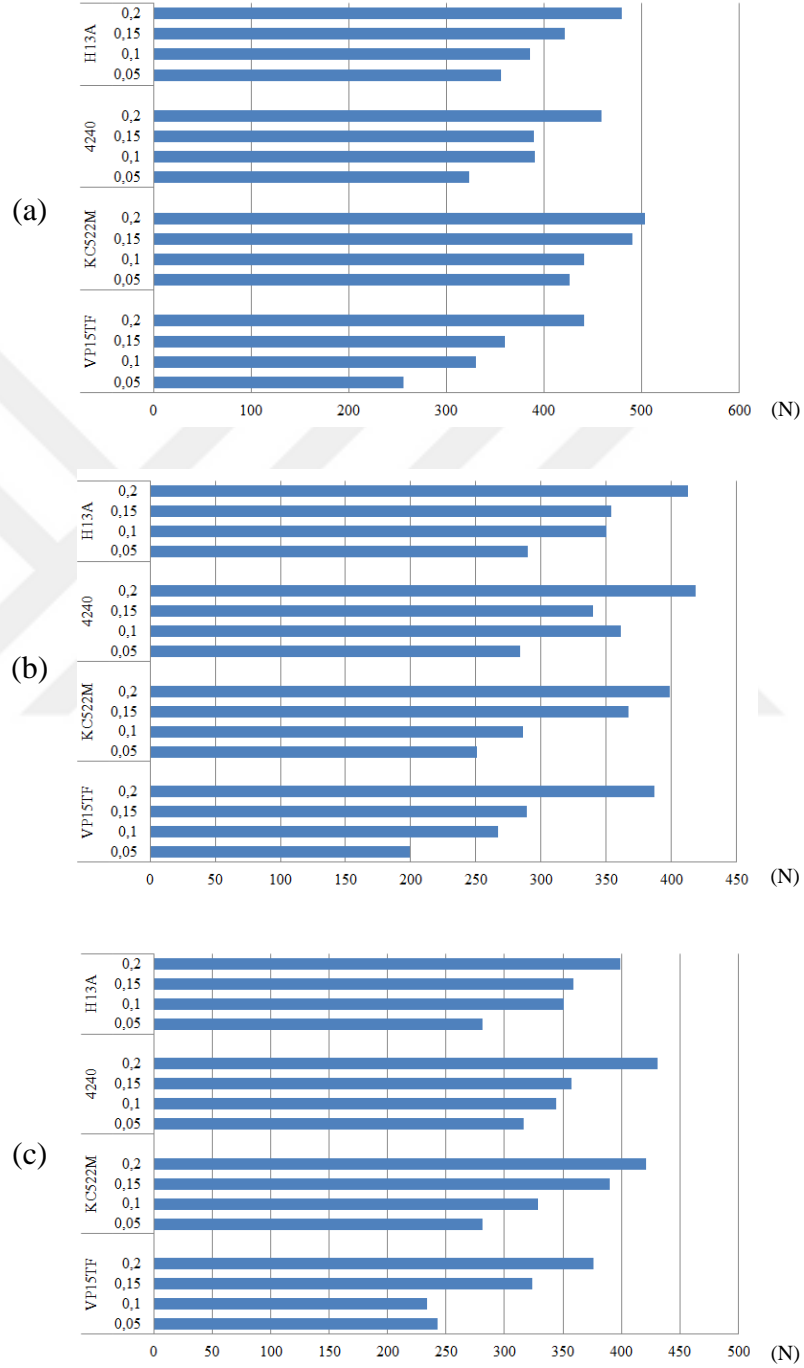
Şekil 7.1. Kesme kuvvetlerinin S/N oranları için ana etki grafikleri a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

3 farklı malzemenin 4 farklı takımla işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvveti değerlerinin kesme hızı – ilerleme miktarı etkileşimine göre değişimleri yüzey grafikleri şeklinde Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’teki grafikler ilerleme miktarının artmasıyla kesme kuvvetleri değerlerinin de arttığını ortaya koymakla beraber, istatistiksel sonuçları da doğrular niteliktedir.



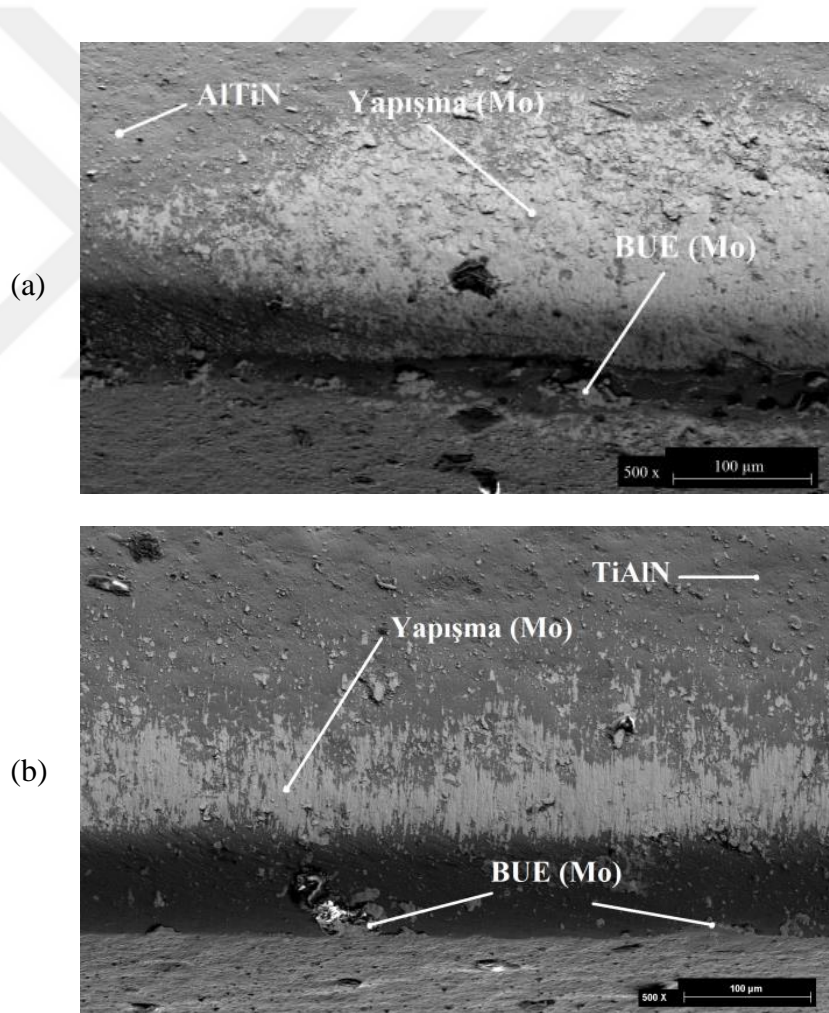
Şekil 7.2. Kesme hızı – ilerleme miktarı etkileşiminin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

İlerleme miktarının artması ile talaş kesit alanı artacağından talaş kaldırmak için daha fazla güce ihtiyaç duyulur. Bundan dolayı ilerleme miktarının artmasıyla kesme kuvvetleri değerlerinin yükselmesi beklenen bir sonuçtur.



Şekil 7.3. İlerleme miktarına bağlı kesme kuvvetlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

Çizelge 7.2 ve Şekil 7.3'teki grafikler incelendiğinde en yüksek ortalama kesme kuvvetinin saf molibdenin işlenmesi esnasında oluştuğu görülmektedir. Saf molibdenin diğer alaşımlara göre düşük sertliği ve düşük dayanım değerleri nispeten yüksek sünekliğinin bir göstergesidir (Çizelge 6.1) Yüksek süneklik talaşlı imalat işlemlerinde kesici takım talaş yüzeyine (ikinci deformasyon bölgesine) daha fazla talaşın yapışmasına neden olur ve bu durum da kesme kuvvetlerini artırır [13]. Şekil 7.4'te VP15TF kodlu kesici takımla aynı kesme parametreleri ile ( $V_c$ : 75 m/dak ve  $f$ : 0,05 mm/diş) işlenmesi sonucu oluşan yapışmanın SEM görüntüleri gösterilmektedir. Saf molibdenin işlenmesi sonucu kesici takımda meydana gelen yapışma yoğunluğu, TZM alaşımının işlenmesinde oluşan yapışma miktarından daha fazladır.



Şekil 7.4. Kesici takımda meydana gelen yapışma a) saf molibden ve b) TZM.

Kontrol faktörlerinin kesme kuvvetleri üzerinde etki seviyelerini belirleyebilmek için ANOVA yapılmış ve sonuçlar Çizelge 7.4'te verilmiştir. Bu tabloda serbestlik

derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), F oranı, kontrol faktörlerinin  $F_c$  üzerindeki anlamlılık düzeyini belirten P değeri ve yüzde katkı oranları verilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre P değerinin 0,05'ten küçük olması kontrol faktörlerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir.

Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4 incelendiğinde her malzeme gurubunda da kesme kuvveti üzerinde en önemli kontrol faktörünün ilerleme miktarı (saf molibden %50,2, TZM %69,9 ve MHC %65,1) olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.4. Kesme kuvvetlerinin S/N oranlarına göre ANOVA sonuçları.

Kontrol faktörleri	Serbestlik derecesi, SD	Kareler toplamı, KT	Kareler ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% katkı
<b>Mo-<math>F_c</math></b>						
Kt	3	14,9717	4,9906	18,49	0,002	41,2
f (mm/diş)	3	18,2396	6,0799	22,52	0,001	50,2
Vc (m/dak)	3	1,5104	0,5035	1,87	0,236	4,2
Artık Hata	6	1,6196	0,2699			4,5
Toplam	15	36,3413				100,0
<b>TZM-<math>F_c</math></b>						
Kt	3	10,3680	3,4560	56,73	0,000	21,4
f (mm/diş)	3	33,8166	11,2722	185,04	0,000	69,9
Vc (m/dak)	3	3,8348	1,2783	20,98	0,001	7,9
Artık Hata	6	0,3655	0,0609			0,8
Toplam	15	48,3849				100,0
<b>MHC-<math>F_c</math></b>						
Kt	3	9,1641	3,0547	9,86	0,010	24,6
f (mm/diş)	3	24,2155	8,0718	26,05	0,001	65,1
Vc (m/dak)	3	1,9474	0,6491	2,10	0,202	5,2
Artık Hata	6	1,8588	0,3098			5,0
Toplam	15	37,1858				100,0

Kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı olan diğer bir kontrol faktörü de kesici takımıdır (saf molibden için %41,2, TZM için %21,4 ve MHC için %24,6) (Çizelge 7.3, Çizelge 7.4 ve Şekil 7.3) Talaşlı imalat işlemlerinde oluşan kesme kuvvetleri kesici takım geometrisinden, kaplamasından ve kesici takımın yüzeyinden etkilenir. Bu çalışmada kullanılan kesici takımların geometrisi ana hatlarıyla aynıdır. Ancak, bu takımlar farklı üreticilerden temin edilmiştir ve aynı üreticiden temin edilen iki kesici takımın bir tanesi kaplamalı ve diğeri de kaplamasızdır. Bu takımların kesme yapan uç kısımları ve talaş kırıcı geometrileri de farklılık göstermektedir (Çizelge 6.4) Kesme yapan uç kısmın ve talaş kırıcı geometrisinin farklı olması, kesme kuvvetlerinin de değişken olmasına neden olur.

Ayrıca, iki farklı kesici takımın geometrisi aynı olsa bile kesici takıma uygulanan kaplama da kesme kuvvetleri üzerinde etkilidir.

Taguchi metodunda, en uygun sonuçları verecek olan kontrol faktörlerinin seviyelerinin belirlenmesinden sonraki aşama, optimizasyonun doğruluğunun test edildiği doğrulama deneylerinin yapılması aşamasıdır. “En küçük en iyi” amaç fonksiyonu ile hesaplanan S/N oranlarına göre kesme kuvvetleri için optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri, saf molibdenin için A1-B1-C1, TZM için A1-B1-C1 ve MHC için A1-B1-C2 olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.1 ve Çizelge 7.3) Bu seviyelere göre elde edilebilecek tahminsel en düşük kesme kuvvetleri ( $F_{c\text{ hes}}$ ) Eşitlik 7.1 ve Eşitlik 7.2 kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 7.5’te verilmiştir.

$$\eta_G = \bar{\eta}_G + (\bar{A}_0 - \bar{\eta}_G) + (\bar{B}_0 - \bar{\eta}_0) + (\bar{C}_0 - \bar{\eta}_G) \quad (7.1)$$

$$F_{c(hes)} = 10^{-\eta^G/20} \quad (7.2)$$

Optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri ile yapılan doğrulama deneyi sonuçları Eşitlik 7.3’ten hesaplanan güven aralığı değeri (CI) dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

$$CI = \sqrt{F_{0,05,(1, \nu_e)} Ve (1/\eta_{eff} + 1/r)} \quad (7.3)$$

Deney tekrar sayısının hesaplanması, toplam deney sayısı ve kesme kuvvetleri üzerinde anlamlı etkisi olan kontrol faktörlerinin serbestlik dereceleri toplamı Eşitlik 7.4’te yerine konulduğunda 1,6 olarak hesaplanmış ve dolayısıyla deney tekrarı sayısı ( $\eta_{eff}$ ) 2 (iki) olarak uygulanmıştır.

$$\eta_{eff} = N/1 + \nu_T \quad (7.4)$$

$F_{0,05,(1, \nu_e)}$  değeri, Çizelge 7.4’teki hata serbestlik derecesi dikkate alınarak ilgili F tablosundan tespit edilmiştir. Eşitlik 7.3’teki hata varyansı ( $Ve$ ), Çizelge 7.4’teki veriler yardımıyla belirlenmiştir.

Bulunan değerler Eşitlik 7.3'te yerine konulduğunda kesme kuvvetleri için güven aralığı (CI) değerleri, saf molibden için 1,5573 dB, TZM için 0,7397 dB ve MHC için 1,6684 dB olarak hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin optimum seviyelerine göre yapılan doğrulama deneyi sonucu ile Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 7.2 yardımıyla hesaplanan değerlerin karşılaştırılması Çizelge 7.5'te verilmiştir.

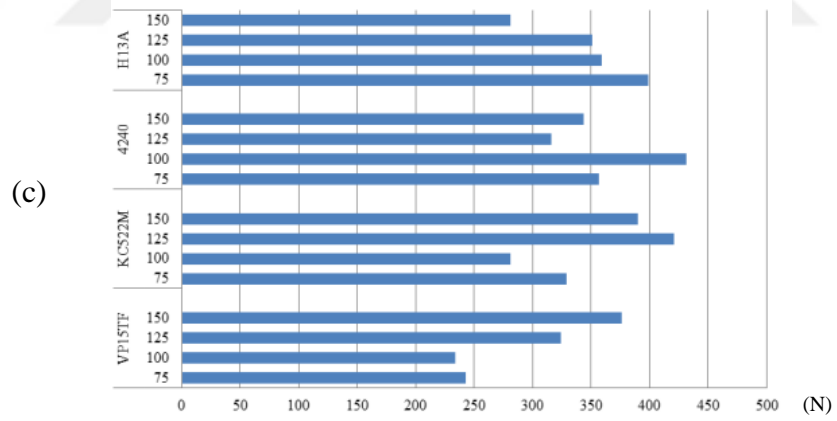
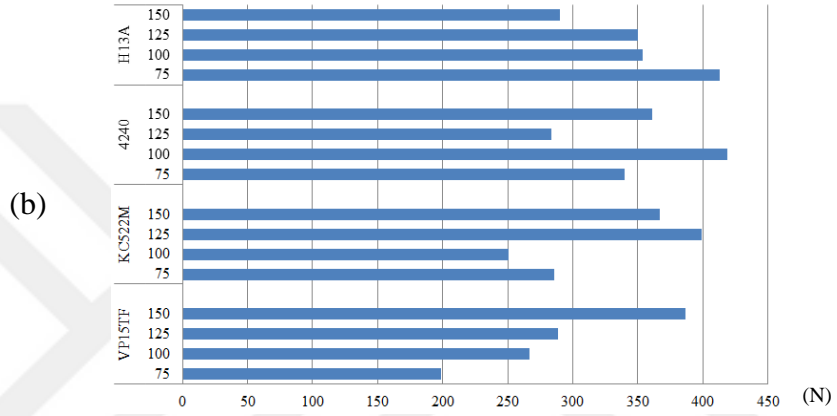
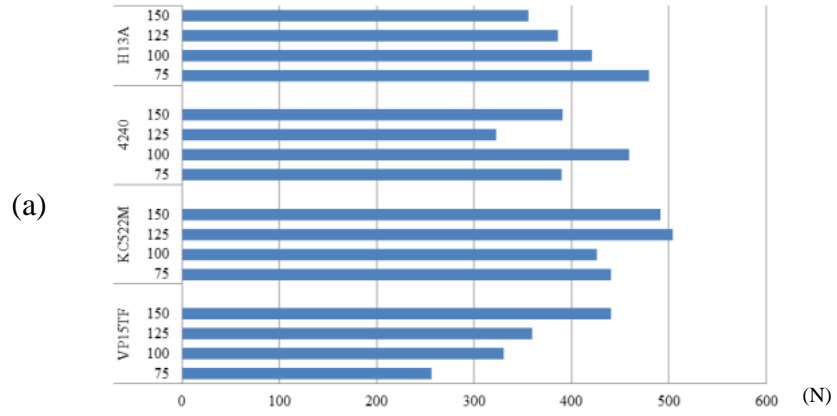
Çizelge 7.5. Kesme kuvvetleri için doğrulama deneyi sonucu ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.

Malzeme	Doğrulama deneyi sonuçları		Hesaplanan tahminsel değerler		Farklar	
	$F_c$ ölç (N)	S/N ( $\eta_{ölç}$ , dB)	$F_c$ hes (N)	S/N ( $\eta_{hes}$ , dB)	$F_c$ ölç - $F_c$ hes	$\eta_{ölç}$ - $\eta_{hes}$
Saf molibden	256	-48,1648	272	-48,7722	16	0,6074
TZM	199	-45,9771	194	-46,1253	5	0,1482
MHC	226	-47,0822	221	-47,1656	5	0,0834

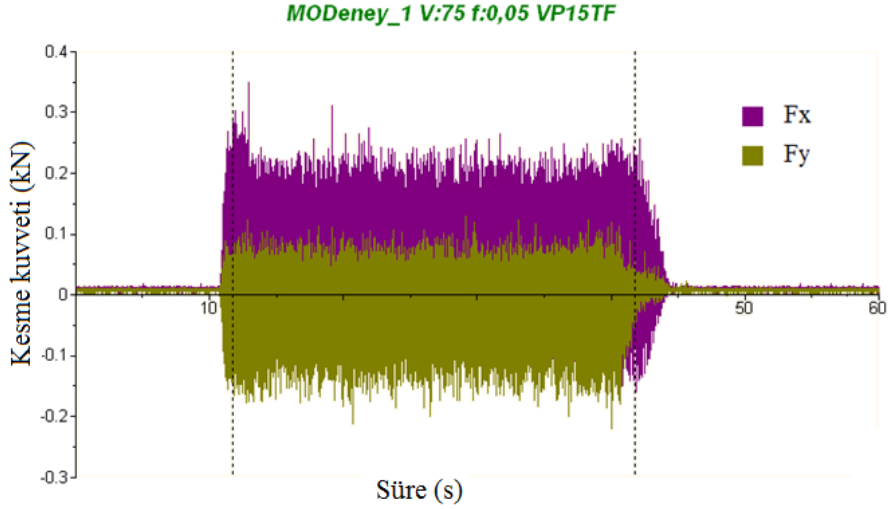
Doğrulama deneylerinden elde edilen kesme kuvvetleri ve sonuçları Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 7.2 kullanılarak hesaplanan S/N oranları arasındaki farkların saf molibden için 0,6074 dB, TZM için 0,1482 dB ve MHC için 0,0834 dB olduğu Çizelge 7.5'te görülmektedir. Bu değerler karşılaştırıldığında, hesaplanan değerlerin güven aralığı değerlerinden (CI) küçük olduğu görülür. Bu sonuç kesme kuvveti için gerçekleştirilen optimizasyonun uygun olduğunu göstermektedir. Üçüncü bir kontrol faktörü olan kesme hızının saf molibden ve MHC üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir (Çizelge 7.4) TZM üzerindeki etkisi ise istatistiksel olarak anlamlı görülmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinde kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinin az miktarda da olsa azalması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur [108].

Şekil 7.5'te kesme hızına bağlı kesme kuvvetlerindeki değişimler verilmiştir. Çizelge 7.3 ve Şekil 7.5'te kesme kuvvetlerinin kesme hızından önemli ölçüde etkilenmediği görülmektedir. Şekil 7.6'da görüldüğü gibi kesme kuvvetlerindeki dalgalanmalar yapışma eğilimini kanıtlar niteliktedir [109].





Şekil 7.5. Kesme hızına bağlı kesme kuvvetlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

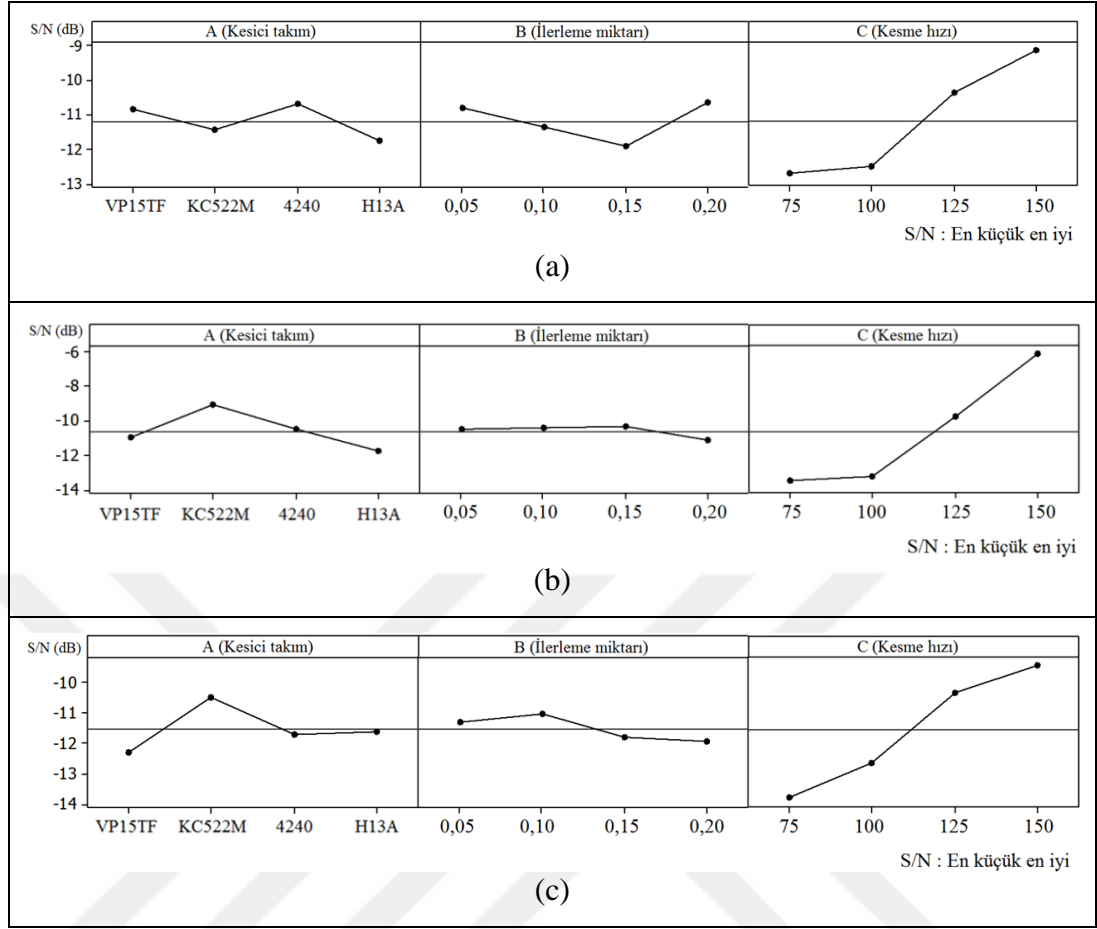


Şekil 7.6. Saf molibdenin işlenmesinde ölçülen kesme kuvveti grafiği.

## 7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının aynı kontrol faktörleri ile karbür takımlarla işlenmesinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri saf molibden için 3,699  $\mu\text{m}$ , TZM için 3,614  $\mu\text{m}$  ve MHC için 3,882  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür (Çizelge 7.2) Her üç malzeme gurubu için de elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen S/N oranları için ana etki grafikleri Şekil 7.7'de verilmiştir. Çizelge 7.6'da ise yüzey pürüzlülüğünün ortalama S/N oranları ve kontrol faktörlerinin önem sırası verilmiştir.

Saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının frezelenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen en önemli kontrol faktörlerinin başında kesme hızının ( $V_c$ ) geldiği tespit edilmiştir (Şekil 7.7) S/N oranlarının en yüksek ve en düşük olduğu noktalar arasındaki fark bu tespiti doğrulamaktadır (Çizelge 7.6) TZM ve MHC için yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kontrol faktörlerinin önem sırası; kesme hızı ( $V_c$ ), kesici takım (Kt) ve ilerleme miktarı (f) iken saf molibden için de; kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesici takım olduğu görülmektedir.

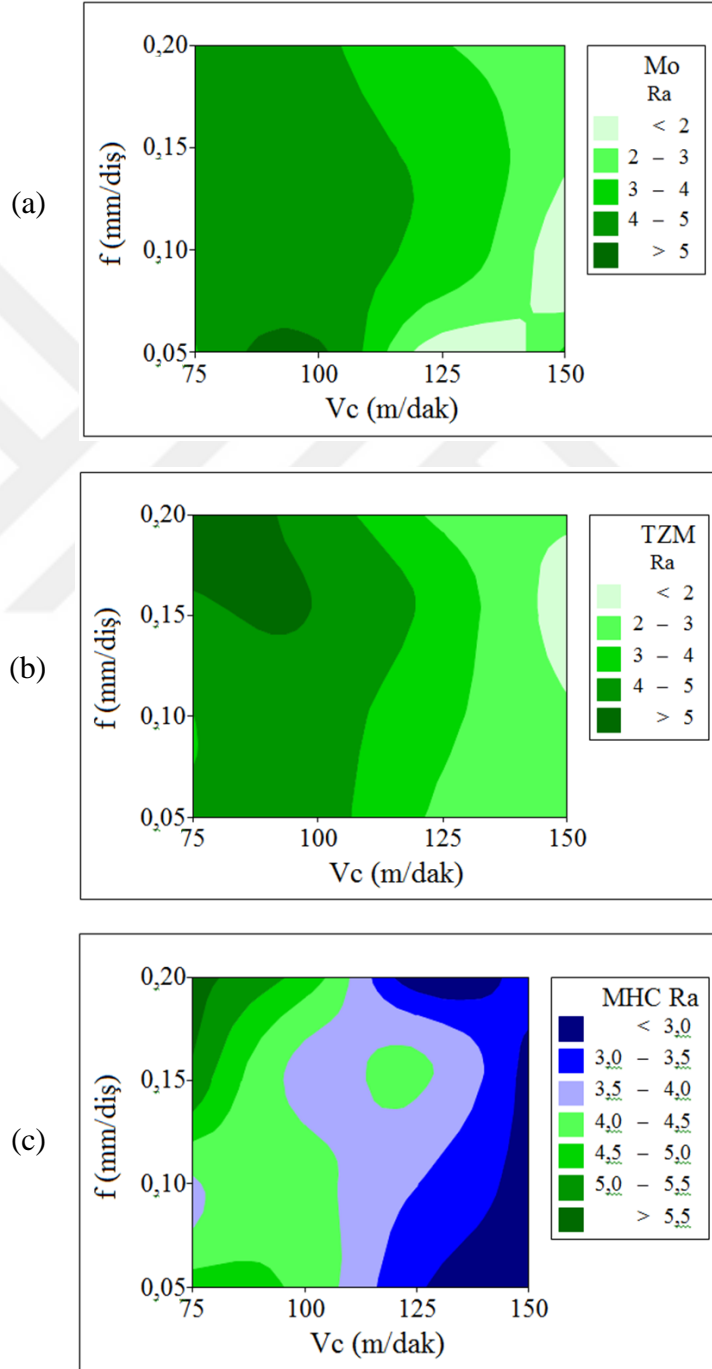


Şekil 7.7. Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranları için ana etki grafikleri a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

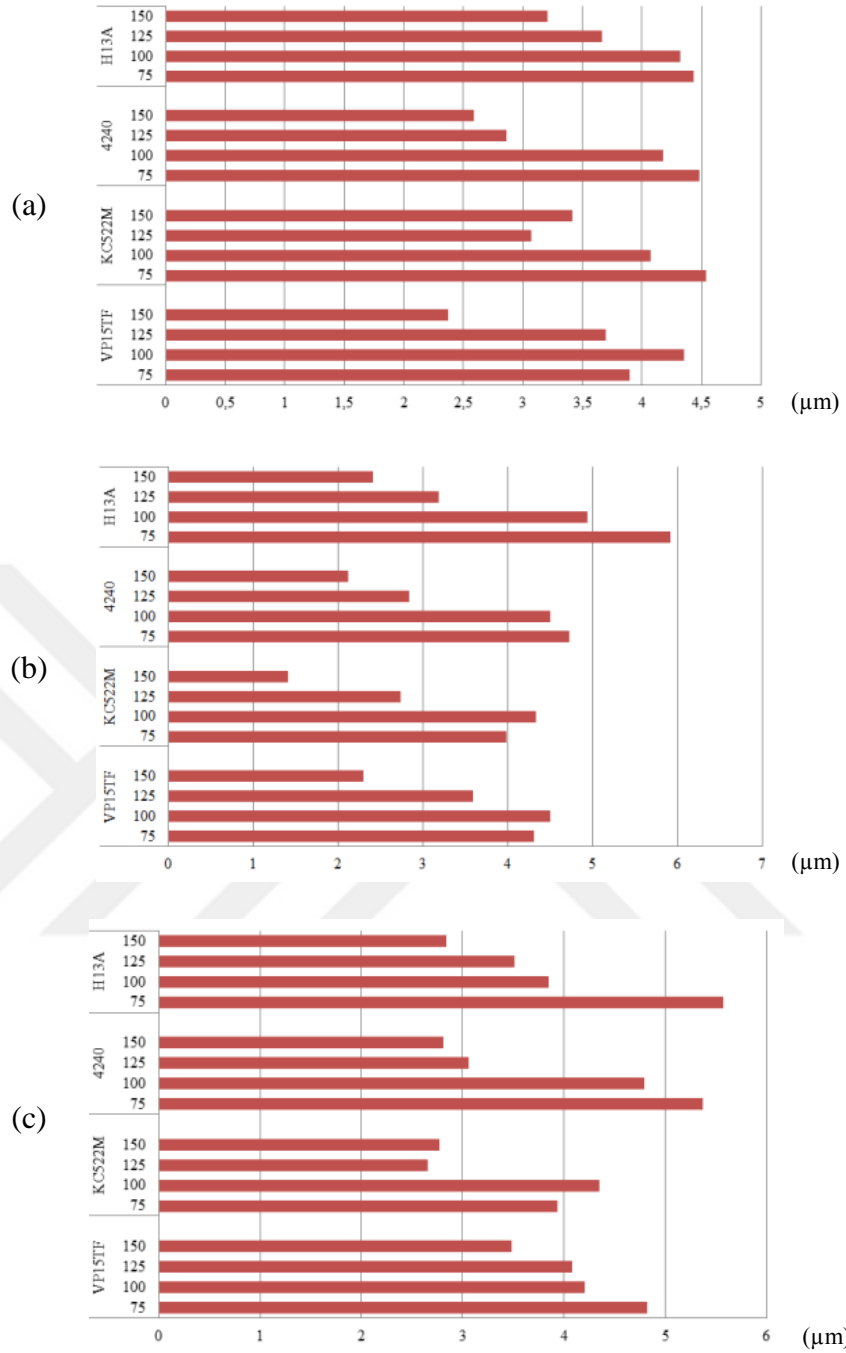
Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülüğünün ortalama S/N oranları ve kontrol faktörlerinin önem sırası.

Kontrol faktörleri	S/N oranları (dB)				Mak – Min	Önem sırası
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4		
<b>Saf molibden</b>						
Kt	-10,864	-11,441	-10,718	-11,767	1,048	3
f (mm/diş)	-10,818	-11,372	-11,945	-10,654	1,291	2
V <sub>c</sub> (m/dak)	-12,736	-12,525	-10,381	-9,148	3,588	1
<b>TZM</b>						
Kt	-11,024	-9,135	-10,536	-11,761	2,626	2
f (mm/diş)	-10,538	-10,419	-10,375	-11,125	0,750	3
V <sub>c</sub> (m/dak)	-13,409	-13,188	-9,749	-6,111	7,298	1
<b>MHC</b>						
Kt	-12,299	-10,503	-11,728	-11,646	1,797	2
f (mm/diş)	-11,303	-11,068	-11,842	-11,962	0,894	3
V <sub>c</sub> (m/dak)	-13,773	-12,640	-10,330	-9,433	4,340	1

Şekil 7.8’de her malzeme için yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı – ilerleme miktarı etkileşimine bağlı olarak değişimi yüzey grafikleri şeklinde verilmiştir. Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’daki grafikler incelendiğinde, kesme hızı değerlerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma olduğu açıkça görülmektedir ve bu sonuçlar istatistiksel çıkarımları da desteklemektedir.



Şekil 7.8. Kesme hızı – ilerleme miktarı etkileşiminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.



Şekil 7.9. Kesme hızına bağlı yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

Kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde etki seviyelerini belirleyebilmek için uygulanan ANOVA sonuçları Çizelge 7.7’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için en fazla öneme sahip kontrol faktörünün kesme hızı (saf molibden için %75,3, TZM için %85,5 ve MHC için %73,2) olduğu görülmektedir.

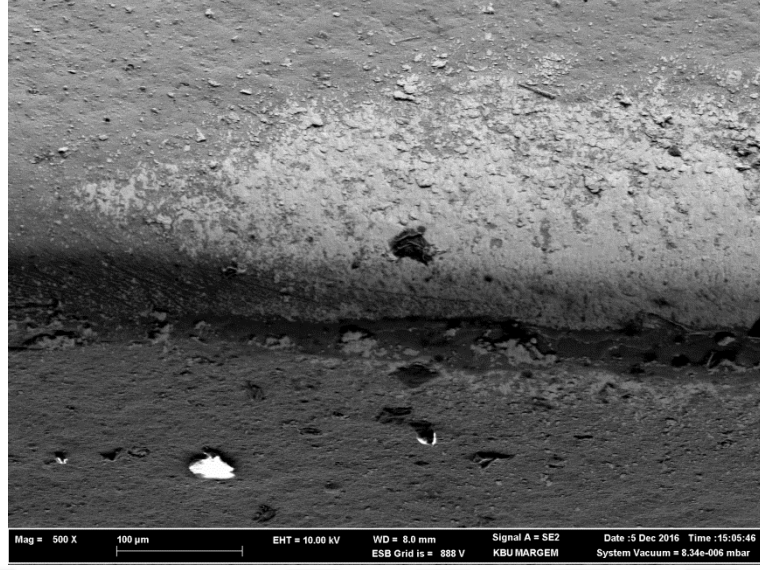
Çizelge 7.2 incelediğinde her üç malzeme için de elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamalarının birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Ayrıca, bu değerlerin oldukça yüksek olduğu da görülmektedir. Deneye tabi tutulan üç malzeme içerisinde en yüksek sünekliğe sahip olan malzeme saf molibden olsa da TZM ve MHC'nin de sünekliklerinin yüksek olduğu Çizelge 6.1'den anlaşılabilir. Sünek malzemelerin işlenmesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek çıkması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Çünkü yüksek süneklik özellikle TZM ve MHC'nin işlenmesinde kesici uçta büyük ve kararsız yığıntı talaş (BUE) oluşturma eğilimini artırır [109]. Büyük ve kararsız yığıntı talaş da yüksek yüzey pürüzlülük değerlerine neden olur.

Çizelge 7.7. Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranlarına göre ANOVA sonuçları.

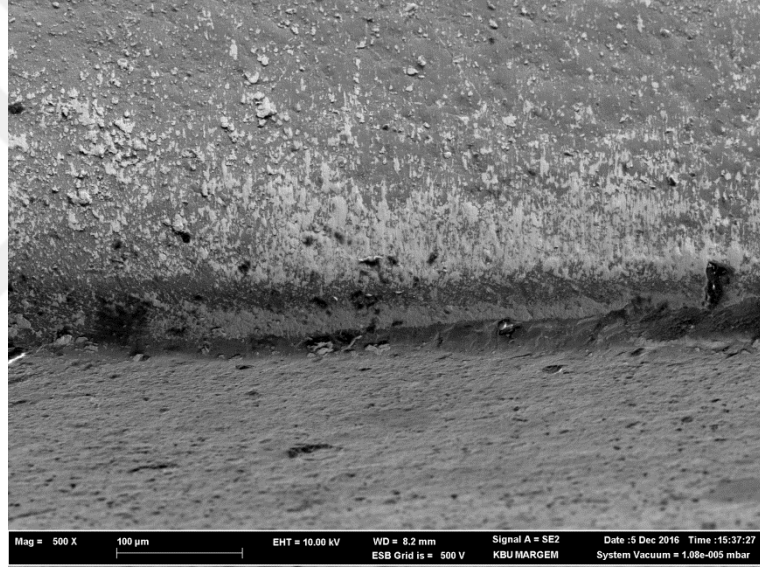
Kontrol faktörleri	Serbestlik derecesi, SD	Kareler toplamı, KT	Kareler ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% katkı
<b>Mo-R<sub>a</sub></b>						
Kt	3	2,8958	0,9653	1,21	0,384	6,1
f (mm/diş)	3	4,1149	1,3716	1,72	0,262	8,6
Vc (m/dak)	3	35,9779	11,9926	15,04	0,003	75,3
Artık Hata	6	4,7837	0,7973			10
Toplam	15	47,7723				100,0
<b>TZM-R<sub>a</sub></b>						
Kt	3	14,709	4,903	3,77	0,078	8,9
f (mm/diş)	3	1,447	0,482	0,37	0,777	0,9
Vc (m/dak)	3	141,845	47,282	36,35	0,000	85,5
Artık Hata	6	7,803	1,301			4,7
Toplam	15	165,804				100,0
<b>MHC-R<sub>a</sub></b>						
Kt	3	6,798	2,266	1,55	0,295	10,3
f (mm/diş)	3	2,193	0,731	0,50	0,695	3,3
Vc (m/dak)	3	48,410	16,137	11,07	0,007	73,2
Artık Hata	6	8,745	1,458			13,2
Toplam	15	66,146				100,0

Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin azalması yüksek kesme hızlarında yığıntı talaş oluşma eğiliminin azalmasıyla açıklanabilir. Özellikle kesici takım ucu yüksek kesme hızından dolayı aşınmaya maruz kalmadıkça yüzey pürüzlülük değeri artan kesme hızıyla azalır [11,108]. Şekil 7.10'da saf molibdenin VP15TF kesici takımla işlenmesi sonucu takım üzerindeki yapışma SEM görüntülerinde gösterilmektedir. Literatüre uyumlu olarak, 75 m/dak kesme hızında yoğun olarak görülen yapışma miktarı kesme hızının 150 m/dak çıkartılması ile önemli ölçüde azalmıştır.

(a)



(b)



Şekil 7.10. Saf molibdenin VP15TF kesici takımla işlenmesi sonucu takım üzerindeki yapışma miktarı a)  $V_c:75$  m/dak b)  $V_c:150$  m/dak.

Kesme kuvvetlerinde ele alınan yöntemlere uygun olarak, yüzey pürüzlülüğü optimizasyon geçerliliğinin test edildiği doğrulama deneyleri yapılmıştır. Çizelge 7.6 ve Şekil 7.7 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri sırasıyla; saf molibden için A3-B4-C4, TZM için A2-B3-C4 ve MHC için A2-B2-C4 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sıralamalara göre oluşabilecek en düşük yüzey pürüzlülük değerleri Eşitlik 7.1 ve Eşitlik 7.2 yardımıyla hesaplanmıştır. Eşitlik 7.3 ile hesaplanan güven aralığı değerleri (CI) dikkate alınarak, optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri ile yapılan doğrulama deney sonuçları

değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için CI değerleri, saf molibden için 7,2480 dB, TZM için 9,2586 dB ve MHC için 9,8014 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 7.8’de yüzey pürüzlülüğü için doğrulama deneyi sonuçları ile hesaplanan S/N oranlarının karşılaştırılması verilmiştir. Doğrulama deneylerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ile Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 7.2 kullanılarak hesaplanan S/N oranları arasındaki farklar (saf molibden için -0,2173 dB, TZM için 1,3598 dB ve MHC için -0,1226 dB) yüzey pürüzlülüğü için Eşitlik 7.3 ile hesaplanan CI değerlerinden (saf molibden için 2,6765 dB, TZM için 3,4190 dB ve MHC için 3,6194 dB) oldukça küçüktür. Bu sonuçlar, yüzey pürüzlülüğü için Taguchi yöntemine dayalı optimizasyonun uygunluğunu göstermektedir.

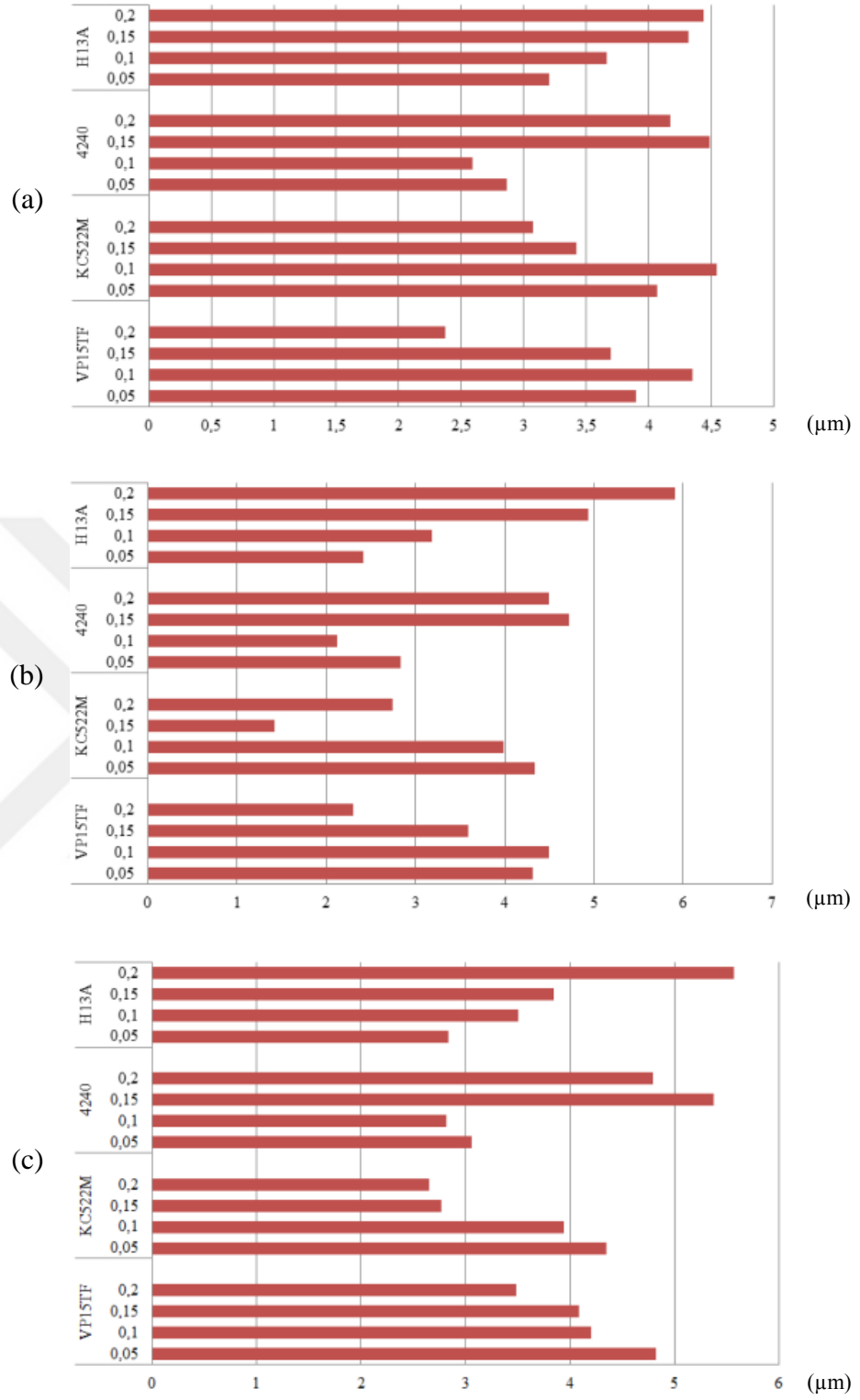
Çizelge 7.8. Yüzey pürüzlülüğü için doğrulama deneyi sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.

Malzeme	Doğrulama deneyi sonuçları		Hesaplanan tahminsel değerler		Farklar	
	$R_a$ ölç (N)	S/N ( $\eta_{ölç}$ , dB)	$R_a$ hes (N)	S/N ( $\eta_{hes}$ , dB)	$R_a$ ölç - $R_a$ hes	$\eta_{ölç}$ - $\eta_{hes}$
Saf molibden	2,613	-8,3428	2,546	-8,1255	0,067	-0,2173
TZM	1,418	-3,0335	1,623	-4,3933	-0,205	1,3598
MHC	2,523	-8,0383	2,258	-7,9157	0,265	-0,1226

Saf molibden için, ilerleme miktarı ve kesici takımın yüzey pürüzlülüğüne % katkı oranlarının düşük ve birbirlerine yakın değerlerde olduğu ANOVA sonuçlarından görülmektedir (Çizelge 7.7) TZM ve MHC’de ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkiye sahip değildir. Ancak, kesici takım yüzey pürüzlülüğü üzerinde yaklaşık olarak %10 civarında bir etkiye sahiptir. Şekil 7.11’de ilerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimler verilmektedir.

İşleme esnasında kesici uçta oluşan ve yüzey pürüzlülüğünü artıran yığıntı talaş kesici uç geometrisinden, kesici takımın kaplamalı/kaplamasız olmasından ve kaplamanın türünden etkilenir. Ayrıca, kesici ucu yuvarlatılmış ve/veya pah kırılmış kesici takımların yığıntı talaş oluşturma eğilimini artırdığı bilinmektedir [57].





Şekil 7.11. İlerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimler a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC.

İşleme deneylerinin yapıldığı 4240 ve H13A kodlu kesici takımlar aynı geometriye sahip olmakla beraber 4240 kaplamalı, H13A ise kaplamasız takımdır. Bu takımlarla

yapılan işleme deneylerinde ölçülen kesme kuvvetleri, kaplamalı takımda kaplamasız takıma nazaran düşük çıkmaktadır. Bu durum kaplamanın yapışma üzerinde etkin olduğunu ve yapışma eğilimini azaltarak kesme kuvvetlerinde düşümlere sebep olması ile açıklanabilir.

Bu çalışmada kullanılan kesici takımlar farklı kaplamalara sahiptirler ve ayrıca bu takımlar üç farklı üreticiden temin edildiği için kesici uç geometrilerinde de farklılıklar olması muhtemeldir. İşleme esnasında oluşan ve yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen yığıntı talaş oluşumunda farklı kaplamaların ve farklı uç geometrilerinin yüzey pürüzlülük değerlerinde değışkenliğe sebep olması oldukça muhtemeldir.

### **7.3. TAKIM AŞINMASI**

Takım aşınması deneyleri, yüzey pürüzlülüğü için elde edilen kontrol faktörlerinin optimum seviyelerine göre yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri sırasıyla; saf molibden için (A3-B4-C4) 4240 kodlu kesici takım, 0,2 mm/diş ilerleme miktarı ve 150 m/dak kesme hızı, TZM için (A2-B3-C4) KC522M kodlu kesici takım, 0,15 mm/diş ilerleme miktarı ve 150 m/dak kesme hızı ve MHC için (A2-B2-C4) KC522M kodlu kesici takım, 0,1 mm/diş ilerleme miktarı ve 150 m/dak kesme hızı değerleridir.

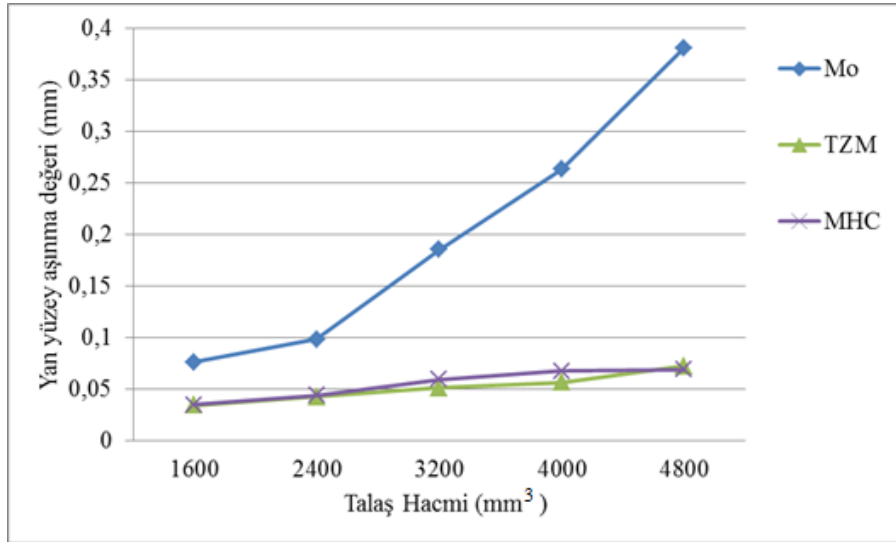
Her malzeme gurubundan ilk olarak 1600 mm<sup>3</sup> talaş kaldırılmış, aşınma tipi belirlenmiş ve miktarı ölçülmüştür. Deneylerde saf molibdende yan yüzey aşınması, TZM ve MHC alaşımlarında ise krater aşınması olmak üzere iki farklı aşınma tipi gözlemlenmiştir. Krater aşınmasında yan yüzey aşınması gibi CAD programları kullanılarak ölçülmüştür. Kesici takım üzerinde ölçüsü kesin olarak bilinen bir geometrinin (kalınlık, uzunluk veya çap değeri) değeri baz alınarak orantı kurulmuştur. Yan yüzey aşınması uzunluğu ve genişliği ve/veya kraterin oluştuğu yüzey alanı dikkate alınarak aşınma değerleri hesaplanmıştır.

Deneylere yan yüzey aşınması 0,4 mm değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Saf molibden için yan yüzey aşınması giderek artarken TZM ve MHC alaşımlarının

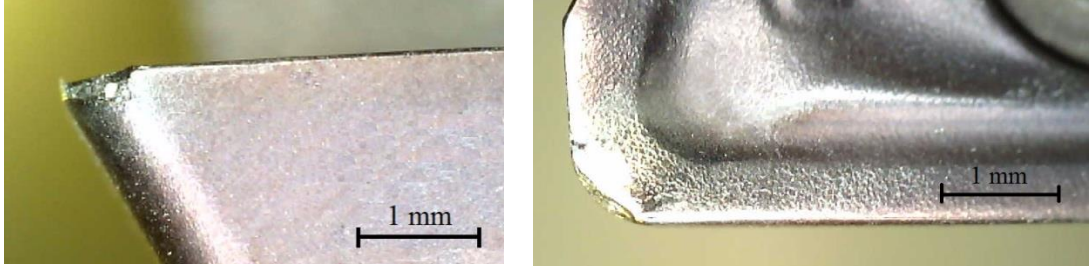
işlenmesinde yan yüzey aşınması önemli oranda artmamıştır. Çizelge 7.9 ve Şekil 7.12’de yan yüzey aşınma miktarları verilmiştir. Deneylere sırasıyla 2400, 3200, 4000 ve 4800 mm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyelerinde devam edilmiş ve her seviyede takım aşınma değerleri ölçülmüştür. Deneylere saf molibden için yan yüzey aşınması değeri 0,4 mm mertebelerine çıkına kadar devam edilmiştir. Şekil 7.13’te saf molibdenin 4240 kodlu kesici takımla 4800 mm<sup>3</sup> talaş hacmi sonunda oluşan yan yüzey aşınma miktarı görülmektedir. Şekil 7.14’te ise TZM ve MHC alaşımının KC522M kodlu kesici takımla 4800 mm<sup>3</sup> talaş hacmi sonucunda meydana gelen krater aşınmaları görülmektedir.

Çizelge 7.9. Yan yüzey aşınma miktarı.

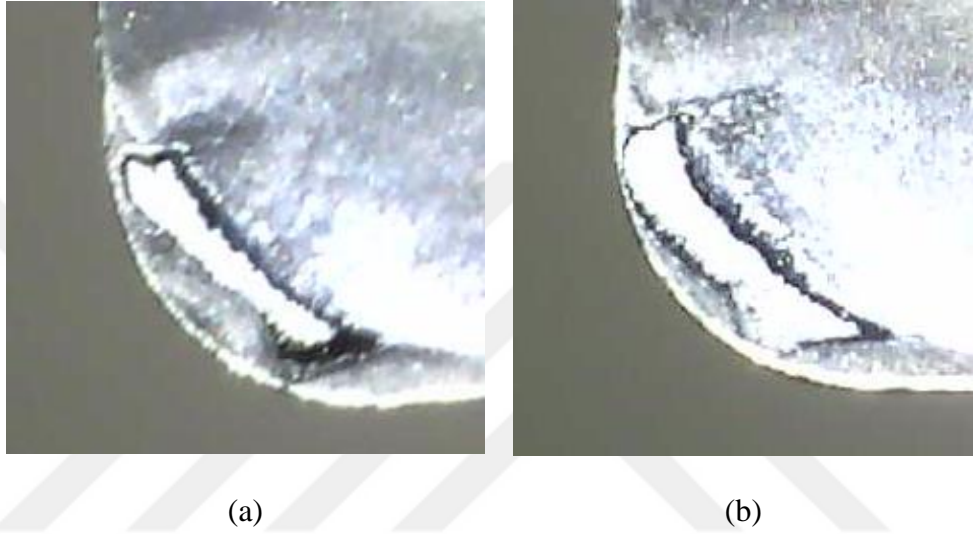
Talaş Hacmi (mm <sup>3</sup> )	Mo (aşınma-mm)	TZM (aşınma-mm)	MHC (aşınma-mm)
1600	0,076	0,0343	0,0347
2400	0,098	0,042	0,0436
3200	0,185	0,0511	0,059
4000	0,263	0,056	0,0674
4800	0,381	0,0722	0,0686



Şekil 7.12. Yan yüzey aşınma değeri.



Şekil 7.13. Saf molibdenin işlenmesinde oluşan yan yüzey aşınması.



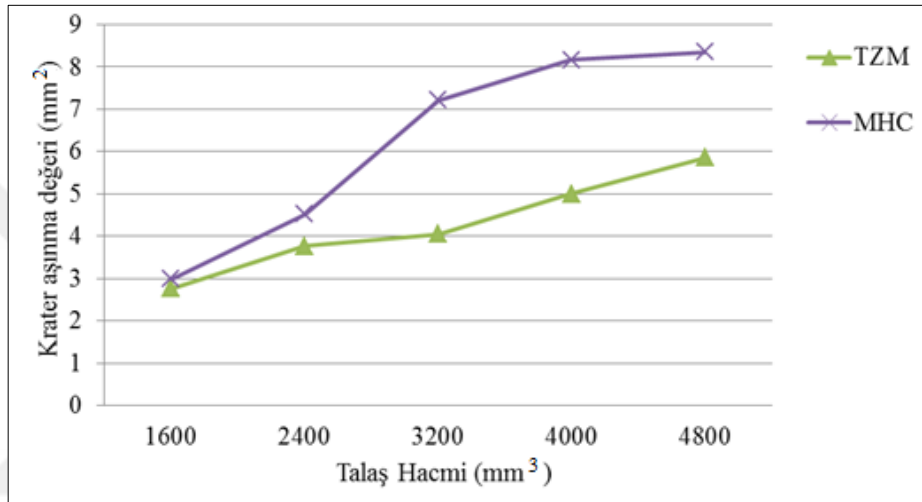
Şekil 7.14. Kesici takımında oluşan krater aşınması a) TZM ve b) MHC.

Genellikle büyük olmayan bir krater aşınması takım ömrü üzerinde çok etkili değildir. Krater oluşumu kesici takım talaş açısının etkinliğini artırarak kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olur. Ancak aşırı krater aşınması kesme kenarını zayıflatarak kırılmalara sebep olur. Krater aşınması takım geometrisini değiştirerek talaş açısının artmasına sebep olmuştur. TZM ve MHC’de ortalama kesme kuvvetlerinin düşmesi artan talaş açısı ile açıklanabilir (Çizelge 7.2)

TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde oluşan takım aşınma deneyleri, kesici takımlarda kırılma olmadığından saf molibden de kaldırılan toplam talaş hacmi dikkate alınarak yapılmıştır. Çizelge 7.10’da TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde 2400, 3200, 4000 ve 4800 mm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyelerinde oluşan krater aşınmasının değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.10. Krater aşınması miktarı.

Talaş Hacmi (mm <sup>3</sup> )	TZM (aşınma-mm <sup>2</sup> )	MHC (aşınma-mm <sup>2</sup> )
1600	2,757	2,99
2400	3,76	4,523
3200	4,046	7,215
4000	4,999	8,166
4800	5,85	8,348

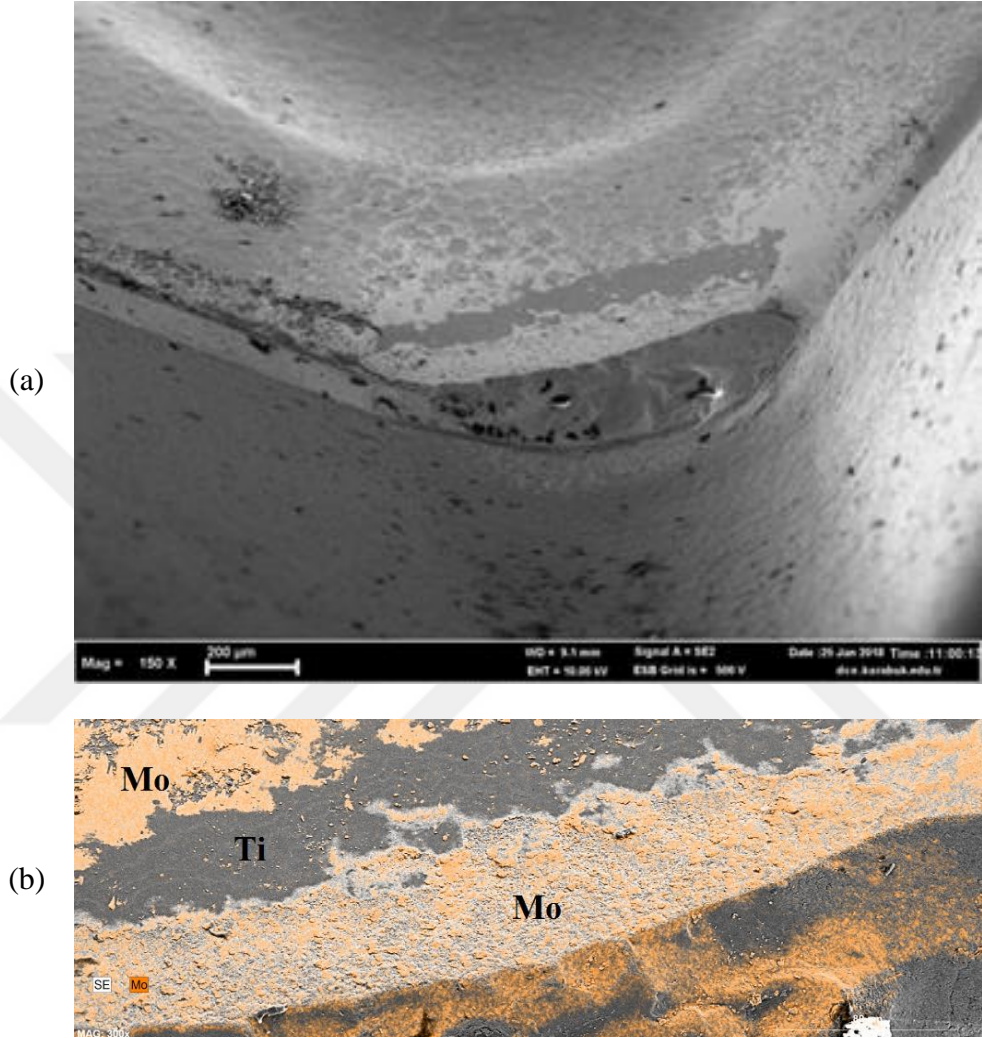


Şekil 7.15. TZM ve MHC işlenmesinde oluşan krater aşınma değeri.

Şekil 7.15'teki grafikte TZM ve MHC alaşımları için krater aşınması değerleri görülmektedir. Krater aşınması 1600 mm<sup>3</sup> talaş hacminde TZM ve MHC için yaklaşık 3 mm<sup>2</sup> olurken, talaş hacmi arttıkça krater aşınması da artmaya devam etmiştir. Krater aşınması, her talaş hacminde MHC alaşımında, TZM alaşımına nazaran daha yüksektir. 4800 mm<sup>3</sup> talaş hacminde TZM alaşımında 6 mm<sup>2</sup> çıkan krater aşınması MHC alaşımında ise 8 mm<sup>2</sup>'nin üzerine çıkmıştır (Şekil 7.14 ve Çizelge 7.10)

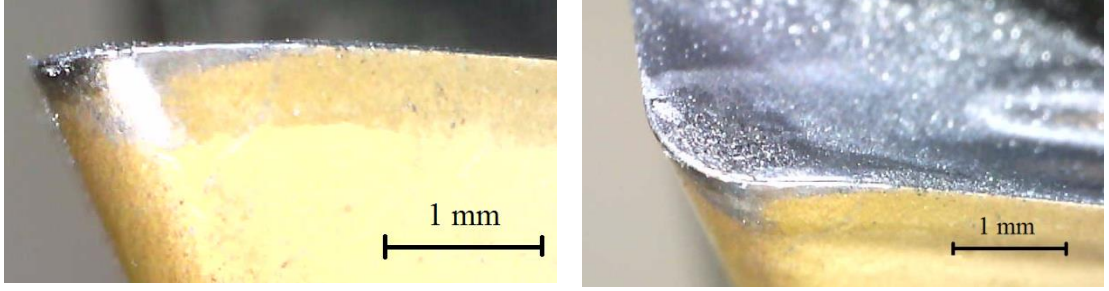
Saf molibdenin 4240 kodlu kesici takım ile 150 m/dak kesme hızında 0,2 mm/diş ilerleme miktarında işlenmesi sonucunda kesici takımında meydana gelen yan yüzey aşınmasının SEM görüntüleri ve EDX analizi Şekil 7.16'da verilmiştir. Şekil 7.16 EDX analizinde görüldüğü gibi takımın molibden kalıntıları gözlemlenmiştir. Saf molibdenin işlenmesi sürecinde iş parçası malzemesi kesici takım üzerine yapışma

eğilimine girmiştir. Sünek malzemelerin işlenmesinde bu durumla sıklıkla karşılaşılır. Bu durum kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülük değerlerinin yükselmesine sebep olmaktadır.



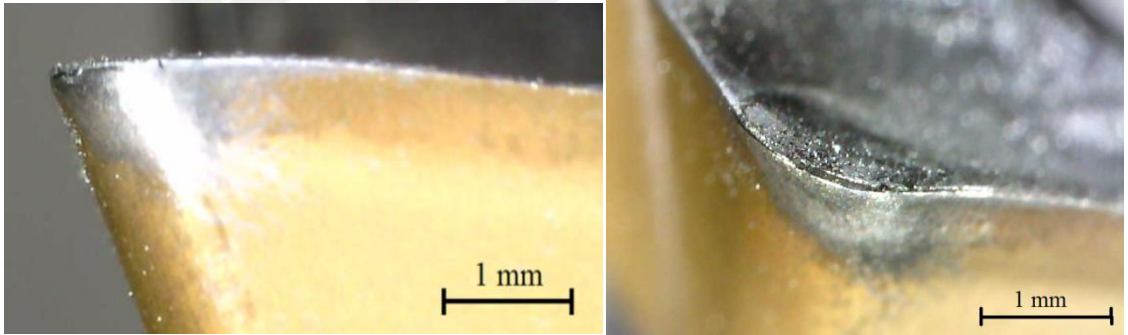
şekil 7.16. Saf molibden işlenmesinde kesici takımında oluşan aşınmanın a) SEM görüntüsü ve b) EDX analizi.

şekil 7.17'de TZM alaşımının KC522M kodlu kesici takımıyla 150 m/dak kesme hızında 0,15 mm/diş ilerleme miktarında işlenmesi sonucu kesici takımında oluşan yan yüzey aşınması verilmiştir. şekil 7.12 ve şekil 7.17 kesici takımında önemsenecek miktarda yan yüzey aşınması olduğunu açıkça görülmektedir.



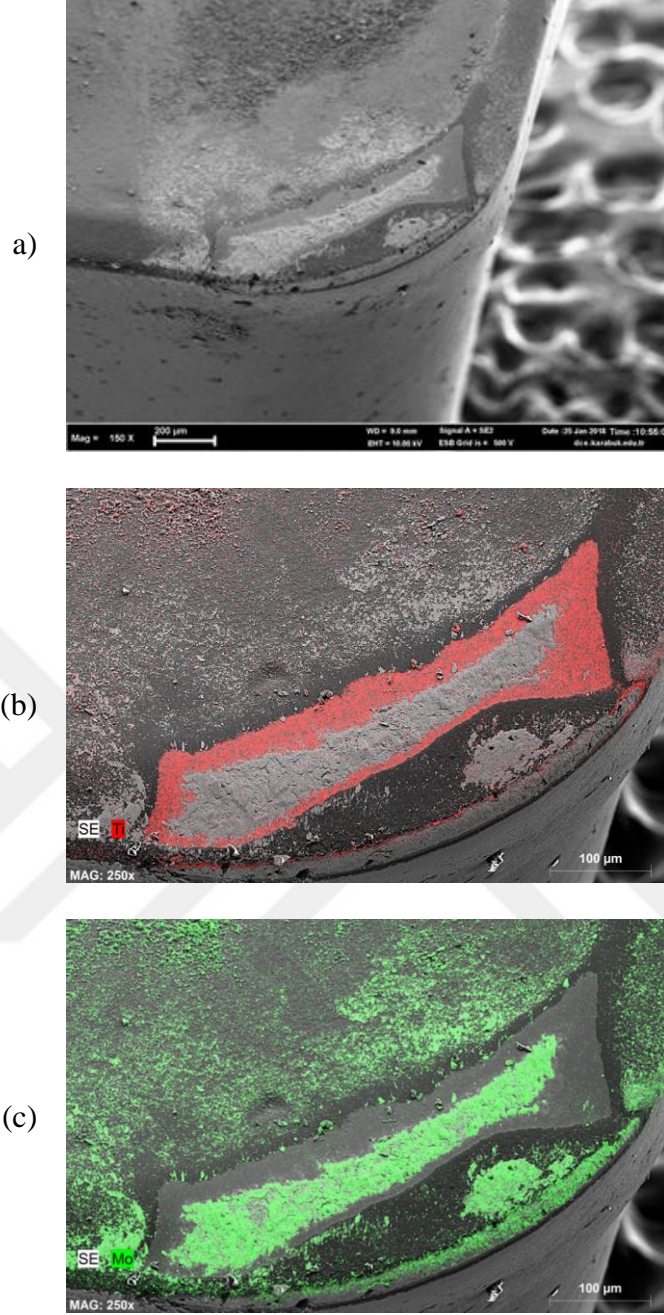
Şekil 7.17. TBM alaşımı işlenmesinde oluşan yan yüzey aşınması.

Şekil 7.18’de MHC alaşımının KC522M kodlu kesici takımla 150 m/dak kesme hızında 0,10 mm/diş ilerleme miktarında işlenmesi sonucu kesici takımda oluşan yan yüzey aşınması verilmiştir. TBM alaşımında olduğu gibi, Şekil 7.12 ve Şekil 7.18 kesici takımda önemsenmeyecek düzeyde yan yüzey aşınması meydana geldiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 7.18. MHC alaşımı işlenmesinde oluşan yan yüzey aşınması.

Şekil 7.19 a) TBM alaşımı işlenmesi sürecine kesici takımda oluşan krater aşınmasının SEM görüntüsü ve EDX analizi verilmiştir. KC522M kodlu kesici takım PVD (AlTi)N kaplamalıdır. Şekil 7.19 b) EDX analizlerinde kraterin kenarlarında kaplama malzemesi olan titanyum kırmızı renkte görülmektedir. Şekil 7.19 c) EDX analizlerinde ise iş parçasının ana elementi olan molibden yoğun olarak kraterin tabanında ve az miktarda ise kesici takımın yüzeyine yapışmış halde görülmektedir.

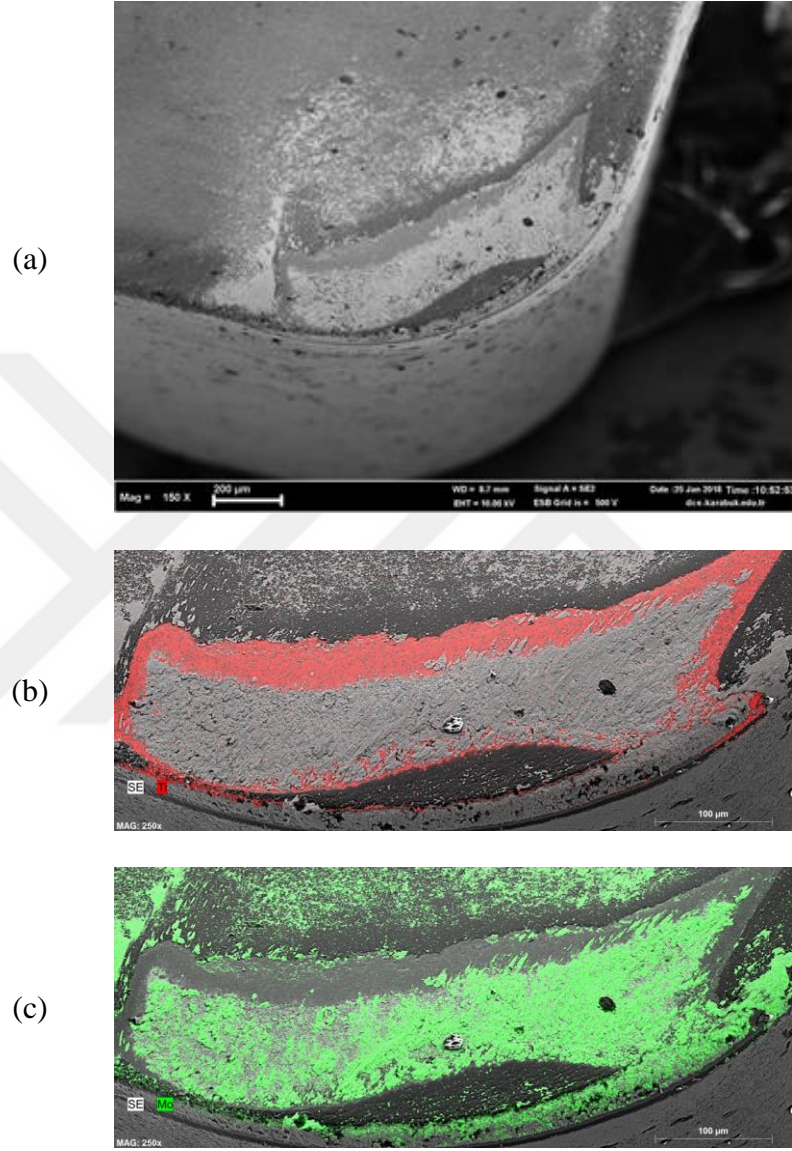


Şekil 7.19. TZM alaşımı işlenmesinde kesici takımında oluşan aşınmanın a) SEM görüntüsü b) EDX analizi (titanyum) ve c) EDX analizi (molibden).

Şekil 7.20 a) MHC alaşımı işlenmesi sürecine kesici takımında oluşan krater aşınmasının SEM görüntüsü ve EDX analizi verilmiştir. KC522M kodlu kesici takım PVD (Al.Ti)N kaplamalıdır. Şekil 7.20 b) EDX analizlerinde kraterin kenarlarında kaplama malzemesi olan titanyum kırmızı renkte görülmektedir. Şekil 7.20 c) EDX analizlerinde iş parçasının ana elementi olan molibden yoğun olarak kraterin tabanında ve az miktarda ise kesici takımın yüzeyine yapışmış halde görülmektedir.

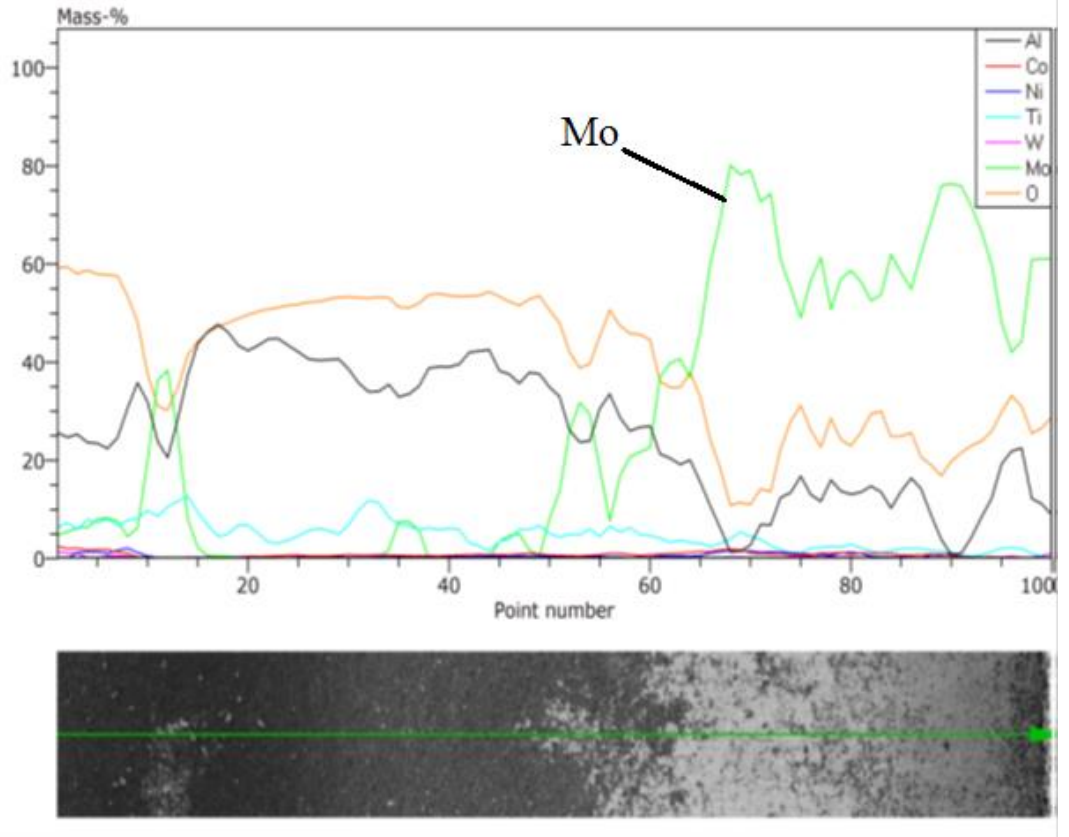
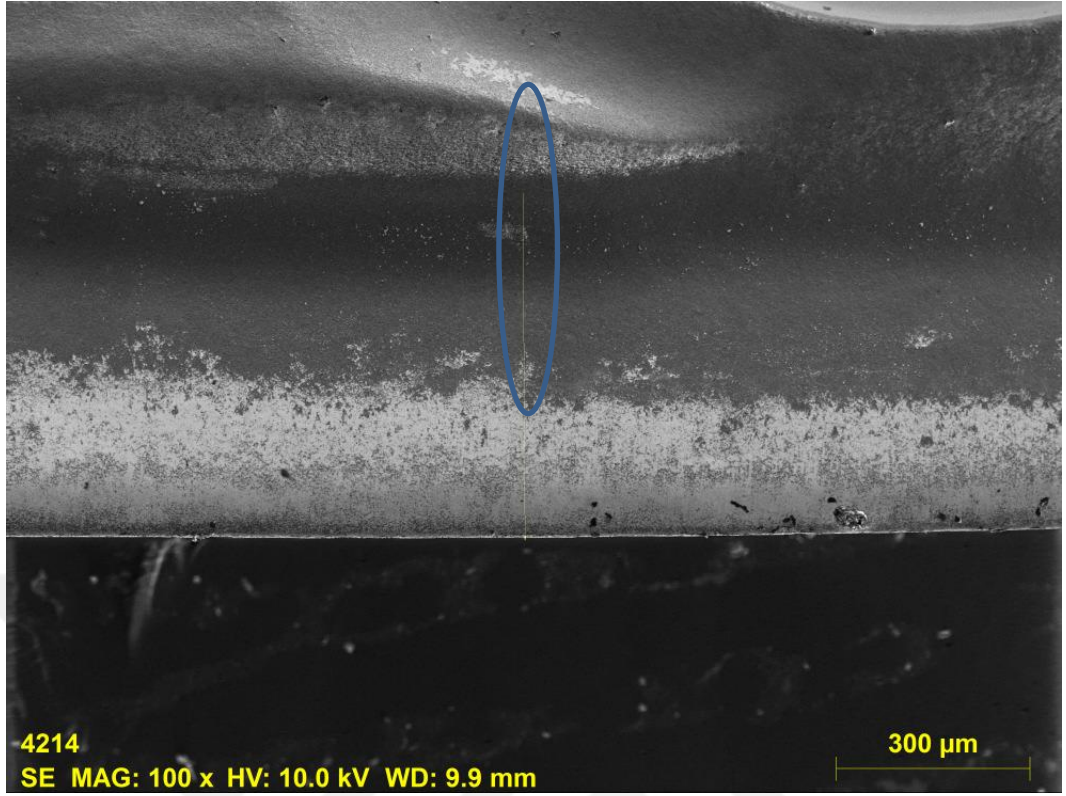


Kraterin büyüklüğünü göz önüne aldığımızda deneylere devam edilirse kısa süre sonra kesici ucun kırılacağı ve/veya aşırı derecede aşınacağı yine SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.



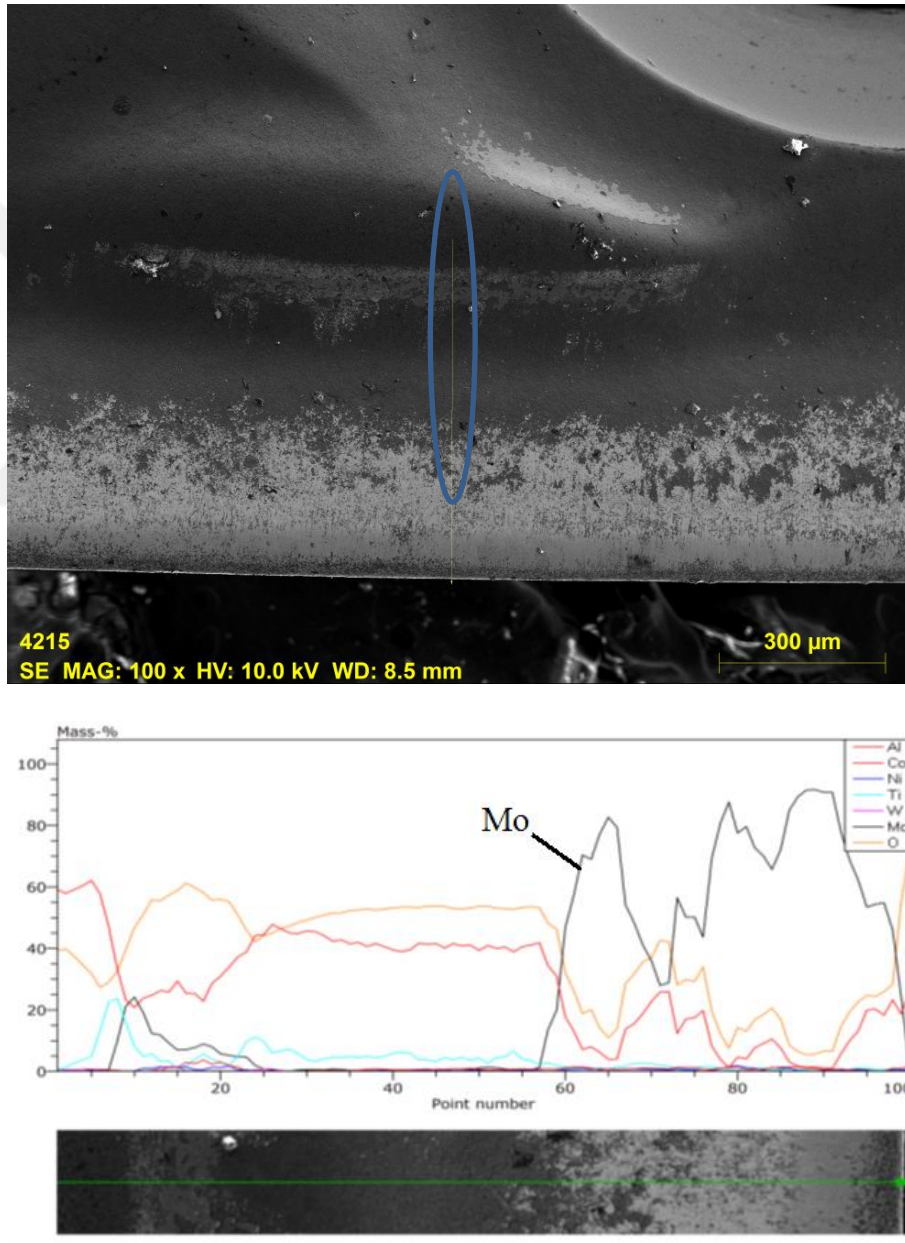
Şekil 7.20. MHC alaşımı işlenmesinde kesici takımında oluşan aşınmanın a) SEM görüntüsü ve b) EDX analizi (titanyum) c) EDX analizi (molibden).

Şekil 7.21'de TZM alaşımı işlenirken oluşan yapışmanın EDX çizgi analizinde molibden seviyesinin kesici takım üzerinde önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. İş parçası malzemesinin kesici takım üzerinde önemli ölçüde yapışması, kesmeyi zorlaştırıp, kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır.

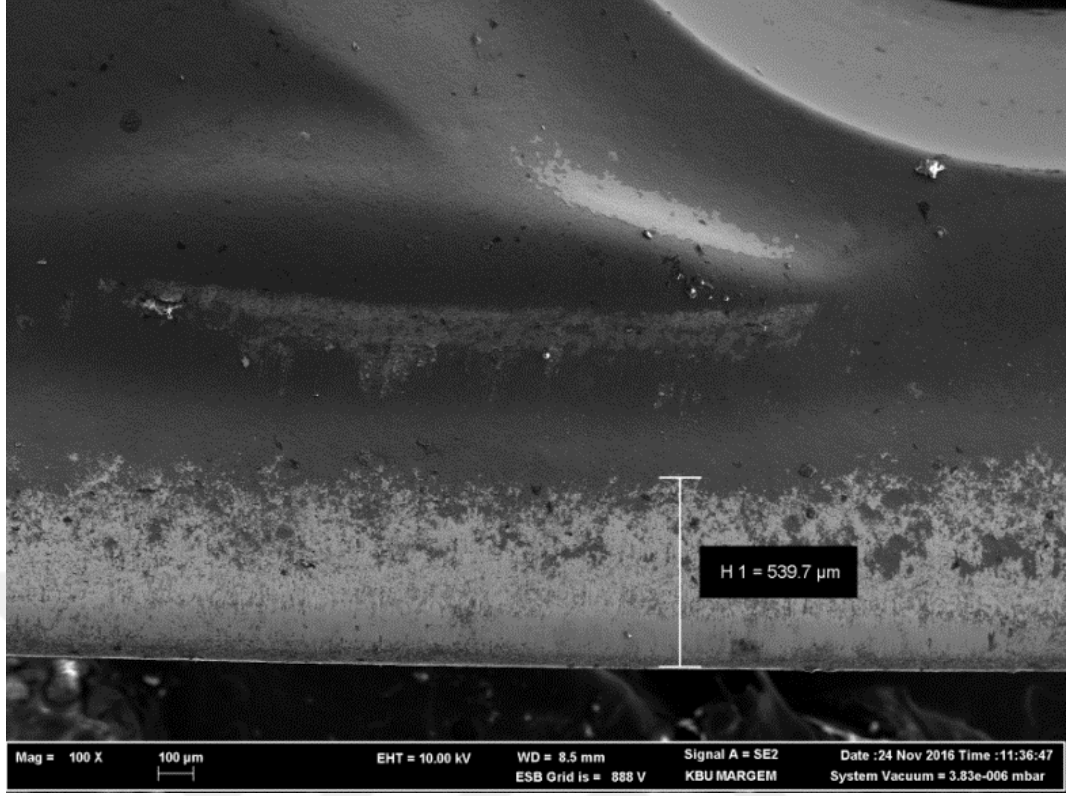


Şekil 7.21. TZM alaşımının işlenmesinde oluşan yapışmanın EDX analizi.

Şekil 7.22’de MHC alaşımı işlenirken oluşan yapışmanın EDX çizgi analizinde molibden seviyesinin kesici takım üzerinde önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Buda iş parçası malzemesinin kesici takım üzerinde önemli ölçüde yapışması kesmeyi zorlaştırır ve kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 7.23’te bu aşınmanın büyüklüğü görülmektedir. Bu yapışma talaş derinliğinden yüksek bir değerdedir ( $0,5 < 0,5397$  mm) Bunun nedeni de kayma düzlem açısı olarak düşünülmektedir.



Şekil 7.22. MHC alaşımının işlenmesinde oluşan yapışmanın EDX analizi.



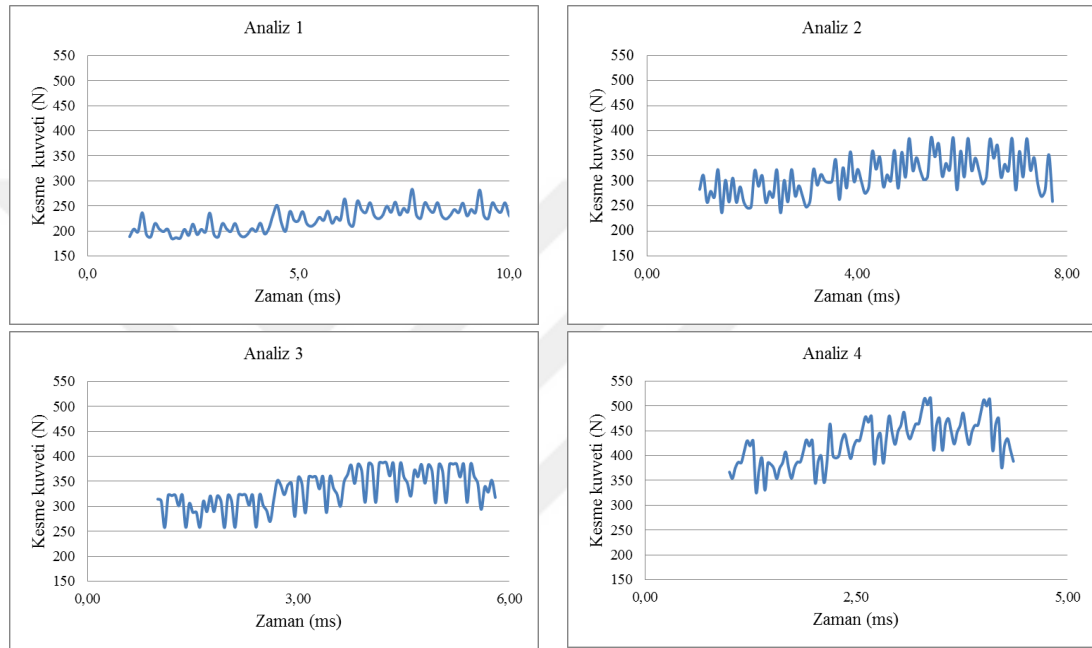
Şekil 7.23. MHC alaşımının işlenmesinde oluşan yapılaşma ve büyüklüğü.

#### 7.4. SEA VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Kesme esnasında kesici takım üzerinde meydana gelen kuvvetler kurulan sonlu elemanlar modeli üzerinden tespit edilmiştir. Kesme işleminin temelinde kesme kuvvetleri üç bileşene ayrılmaktadır. Genellikle esas kesme kuvveti bu üç bileşenin en büyük olanıdır. Deneysel ve SEA ile elde edilen kesme kuvvetleri Çizelge 7.11’de verilmiştir. SEA sonucu elde edilen veriler Şekil 7.24’teki grafikler yardımıyla belirlenmiştir. Kesme kuvvetleri kuvvetlerin kararlı olduğu bölgelerden alınan verilerin ortalamaları hesaplanarak elde edilmiştir.

Çizelge 7.11. Deneyler sonucu elde edilen kesme kuvvetleri.

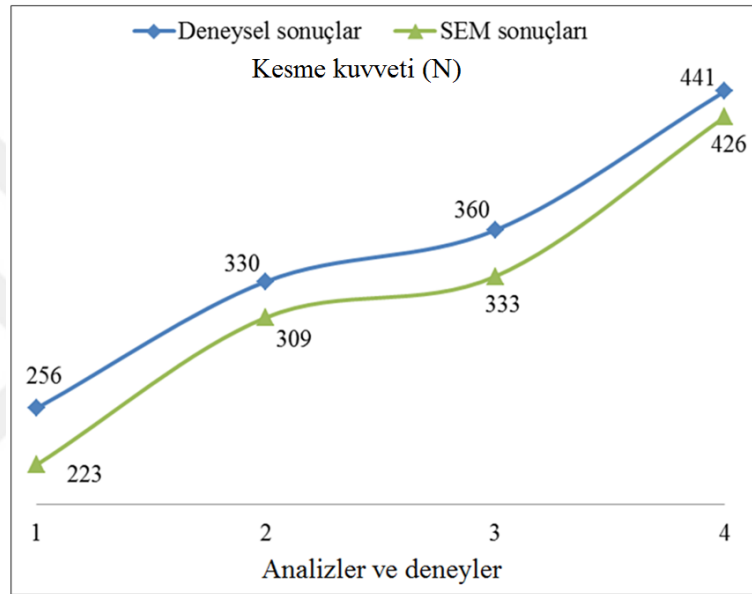
Deney No	Kesme hızı ( $V_c$ )	İlerleme miktarı (f)	Devir sayısı (N)	Kesme kuvveti ( $F_f$ ) (Deneysel)	Kesme kuvveti ( $F_f$ ) (SEA)
	m/dak	mm/diş	dev/dak	N	N
1	75	0,05	1990	256	223
2	100	0,1	2654	330	309
3	125	0,15	3317	360	333
4	150	0,2	3981	441	426



Şekil 7.24. SEA sonucu elde edilen kesme kuvveti grafikleri.

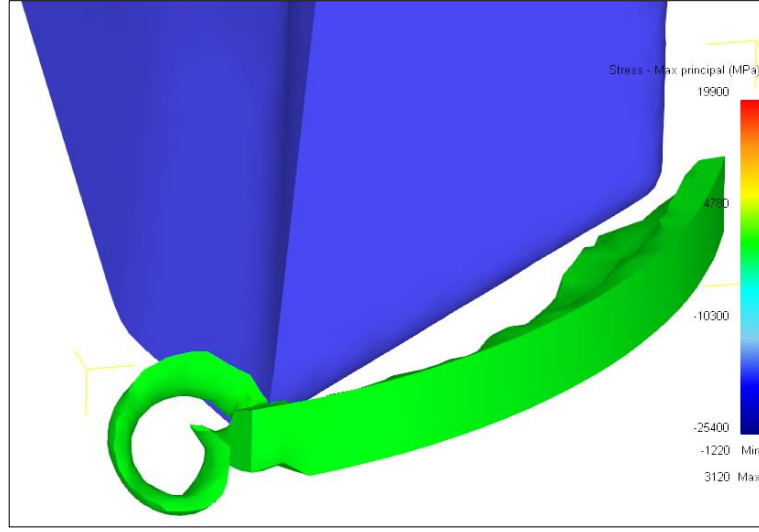
Şekil 7.25'te deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırması grafiklerle gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın ve grafik sonucu elde edilen eğriler birbiri ile oldukça tutarlıdır. SEA sonucu elde edilen kesme kuvvetleri, deneysel çalışma sonucu elde edilen kesme kuvveti değerlerinden düşük çıkmıştır. Deney sonuçları ve analiz sonuçları arasında %10 mertebelerinde farklılıklar görülmüştür. Bunun muhtemel sebebi iş parçası malzeme modeli için girilen Johnson Cook parametrelerindeki katsayıların literatürden elde edilmesi ve gerçek malzeme modelinin elde edilememesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, iş parçası ve kesici takım arasında oluşan ısı transfer katsayısının, deneysel ortam şartlarına göre farklılık göstermesidir.

Kesme hızlarının ve ilerleme miktarının artması ile kesme kuvvetlerinde artış olduğu görülmektedir. İlerleme miktarının artması ile kesme kuvvetlerin artması, talaşlı imalatta beklenen bir durumdur. Bu durumu; ilerleme hızının artışı sonucunda artan talaş kesiti ile ilişkilendirmek mümkündür [110]. Talaş kesitinin artması sonucu, talaşı kaldırmak için gerekli olan enerjinin de artması demektir. Enerjinin artması da aksel kuvvetlerin artmasına sebep olmaktadır [111]. Benzer durumu kesme hızları açısından da söylemek mümkündür.



Şekil 7.25. Deneysel ve SEA sonucu elde edilen sonuçların karşılaştırması.

Frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetlerini etkileyen bir diğer faktör talaş tipidir. Talaşın kontrollü bir şekilde işleme bölgesinden uzaklaştırılması önemlidir. Bu nedenle çıkan talaşın önceden belirlenmesi önem arz etmektedir. Şekil 7.26'da analizin 0 – 0,5 ms arasında oluşan talaş formu gösterilmiştir. Şekil 7.27'de ise deneysel çalışma sonucu oluşan talaş şekilleri gösterilmiştir. Deneysel çalışma sonucu oluşan talaşın ve SEA sonucu oluşan talaş formunun birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Elde ettiğimiz talaş tipleri, sünek malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan talaş tiplerine benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.26. Analiz sürecinde oluşan talaş geometrisi.



Şekil 7.27. Saf molibden talaşları.

## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üç farklı molibden esaslı malzeme (ticari saflıktaki molibden, TZM ve MHC) kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin tespit edilebilmesi için 4 farklı kesici takım, 4 farklı kesme hızı ve 4 farklı ilerleme miktarı ile Taguchi L16 dikey dizisi kullanılarak işlenebilirlik deneylerine tabi tutulmuşlardır. Kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri ve takım aşınması deneyleri yapılmıştır. SEA yapılarak deneysel çalışma ile analiz sonuçları karşılaştırılmış ve aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir.

- a) Kesici takım aşınmaları SEM altında incelendiğinde, aşınma türü olarak saf molibden için yan yüzey aşınması, TZM ve MHC alaşımlarında ise krater aşınması olduğu tespit edilmiştir.
- b) Her malzeme gurubunda ilerleme miktarının artması, kesme kuvvetlerinde beklenen yükselmeye sebep olmuştur. En yüksek kesme kuvveti değeri saf molibdenin frezelenmesinde gerçekleşmiştir. Bu sonuç saf molibdenin yüksek sünekliği ile açıklanmıştır.
- c) TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde oluşan krater aşınması, kesici takım üzerindeki kaplamanın kesintili kesmeden dolayı kırılması ve molibdenin takım malzemesi olan karbon ile etkileşime girerek olduğu kanaatine varılmıştır. MHC alaşımı işlenirken daha yüksek olan krater aşınmasının en etkin sebebinin hafniyum karbürlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.



- d) Kesici takım üzerinde yapışmanın oranının saf molibdenin işlenmesi esnasında oluşması, diğer alaşımlara nazaran düşük sertliğe sahip olması ile açıklanmıştır.
- e) Her üç malzeme gurubu içinde kesme kuvveti ( $F_c$ ) üzerinde en fazla öneme sahip kontrol faktörünün ilerleme miktarı, yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) üzerindeki en önemli kontrol faktörünün ise kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.
- f) Artan ilerleme miktarı ile birlikte kesme kuvvetleri artmıştır. En düşük kesme kuvveti; saf molibden için 256 N, TZM alaşımı için 199 N ve MHC alaşımı için 234 N olarak ölçülmüştür.
- g) Artan kesme hızı ile birlikte yüzey pürüzlülük değerleri her üç malzeme için de azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme miktarının kayda değer bir etkisi görülmemiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri; saf molibden için 2,375  $\mu\text{m}$ , TZM alaşımı için 1,418  $\mu\text{m}$  ve MHC alaşımı için 2,654  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.
- h) SEA için kurulan modelde meydana gelen kesme kuvvetleri, deneysel sonuçlara nazaran düşük bulunmuştur. Bunun nedenleri ise işlenmiş yüzeyin durumundan, takım aşınmasından, takım – talaş arayüzündeki sürtünmeden, sıcaklığın etkisinden ve iş parçasının elastik davranışından etkilenmektedir.

**Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler:**

Molibden ve alaşımlarının işlenebilirliğinin incelendiği bu çalışma konusuyla alakalı olarak daha sonraki çalışmalara ışık tutması amacıyla aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- a) Deneylerde kullanılan kesici takımların uç yarıçapları küçültülerek kesme işlemi kolaylaştırarak kesme kuvvetleri düşürülebilir.

- b) Daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde etmek için daha yüksek kesme hızlarında işlem yapılabilir.
- c) Kaplama daha kalın seçilirse krater aşınmasının azalacağı ve takımın daha uzun ömürlü olacağı düşünülmektedir.
- d) Molibden ve alaşımlarının işlenmesi üzerinde literatürde geniş bilgi bulunmamakla beraber yapılacak her çalışma literatürde yerini bulacaktır.
- e) SEA'de ana başvuru kaynağı olarak kullanılması ancak malzeme, sürtünme ve ısı modellerinin gerçekçi olması ile mümkün olacaktır. Malzeme modeli üzerinde daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Pöhl, C., Schatte, J. and Leitner, H., “Metallographic characterization of the molybdenum based alloy MHC by a color etching technique”, *Materials Characterization*, 77: 63-69 (2013).
2. Kuljanic, E., Sortino, M. and Totis, G., “Machinability of difficult machining materials”, *14th International Research/Expert Conference – Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, Mediterranean Cruise, I1-I14 (2010).
3. Shi, H. J., Korn, C. and Pluvinage, G., “High temperature isothermal and thermomechanical fatigue on a molybdenum-based alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 247: 180-186 (1998).
4. Fan, J., Lu, M., Cheng, H., Tian, J. and Huang, B., “Effect of alloying elements Ti, Zr on the property and microstructure of molybdenum”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27: 78-82 (2009).
5. Warren, J., “The 700 °C tensile behavior of Mo-0.5Ti-0.08Zr-0.025C (TZM) extruded bar measured transverse and parallel to the billet extrusion axis”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 16: 149-157 (1998).
6. Calderon, H. A., Kostorz, G. and Ullrich, G., “Microstructure and plasticity of two molybdenum-based alloys (TZM)”, *Materials Science and Engineering A*, 160 (2): 189-199 (1993).
7. Raffo, P. L., “Thermomechanical processing of molybdenum–hafnium–carbon alloys”, *NASA Technical Note TN D-5645*, Washington D.C. (1970).
8. Eremenko, V. N., Shabanova, S. V. and Velikanova, T. Y., “Structure of alloys and the phase equilibrium diagram of the Hf-Mo-C system VI. isothermal section of the Hf-Mo-C system at 1400 °C”, *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 16: 772–777 (1977).
9. Rowe, D., “Refractory metals”, *Heat Treating/Thermal Equipment*, Brentwood United Kingdom, 56-60 (2003).
10. İnternet: ED Fagan Inc., “General Guide to Machining Molybdenum and molybdenum Alloy”, [http://www.edfagan.com/litPDF/Machining\\_Guide\\_Molybdenum\\_Moly\\_Alloys.pdf](http://www.edfagan.com/litPDF/Machining_Guide_Molybdenum_Moly_Alloys.pdf) (2017).

11. Sortino, M., Totis, G. and Prospero, F., “Dry turning of sintered molybdenum”, *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 1179-1190 (2013).
12. Kalpakjian, S. and Schmid, S. R., “Manufacturing Engineering and Technology 6th ed.”, *Pearson Education* (2009).
13. Trent, E. M. and Wright, P. K., “Metal Cutting 4th ed.”, *Butterworth Heineman* (2000).
14. Wang, W., Kweon, S. H. and Yang, S. H., “A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by miniaturized machine tool”, *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 702-708 (2005).
15. Işık, Y., “Talaşlı imalatta kesici takımların kırılma öncesi davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9 (1): 103-110 (2004).
16. Akkurt, M., “Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgahları”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 67-71 (1991).
17. Günay, D., “Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri”, *Sakarya Üniversitesi Yayınları*, Adapazarı (1993).
18. Kocacıbaşı, Ü. ve Çalışkan, M., “Makine tasarımında sonlu elemanlar yöntemi”, *Makine & Metal Teknolojisi*, Adapazarı (1996).
19. Hinton, E. and Owen, D. R. J., “An introduction to finite element computations”, *Pineridge Press Limited*, Swansea U.K. (1985).
20. İnternet: IJRMHM, “International Journal of Refractory Metals and Hard Materials”, <https://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-refractory-metals-and-hard-materials> (2018).
21. Johnson, A. W., “Refractory metals and alloys”, ASM handbook 2 properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials”, *ASM International*, U.S.A., 1747-1769 (1990).
22. McCoy, H. E., Stephenson, R. L. And Weir, J., R., “Mechanical properties of some refractory metals and their alloys”, *OAK Ridge National Laboratory*, Tennessee U.S.A. (1964).
23. İnternet: MatWeb material property data web, “Molybdenum, Mo, Annealed”, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ef57c33963404798ad0301a05692312a&ckck=1> (2018).
24. İnternet: Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı”, <http://www.maden.org.tr/meslegimiz/oik640.pdf>, 18-28 (2001).

25. Kılıç, O., “Refrakter tantalyum metalinin katı ortamda bor kaplanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü**, Gebze, 1-5 (2007).
26. Taşaltın, N., “Palladyum, niyobyum, tantalyum nanotellerinin üretilmesi ve hidrojen gazını algılama özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü**, Gebze, 20-21 (2010).
27. Kahraman, Z., “Renyum nitrür ve renyum katkılı nanokompozit yapıları sert seramik kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu”, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-11 (2010).
28. Denizalp, F., “Yüksek safiyette molibden tozunun spark plazma sinterleme yöntemi ile şekillendirme şartlarının belirlenmesi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul**, 3-8 (2012).
29. Walser, H., A. and Shields J., “Traditional and emerging applications of molybdenum metal and its alloys”, **International Molybdenum Association. IMO Newsletter**, 1-16 (2007).
30. İnternet: ASTM International, “Designation: B387-10, Standart specification for molybdenum and molybdenum alloy bar, rod and wire”, <https://www.astm.org/Standards/B387.htm> (2015).
31. Shields J. A., “Applications of molybdenum metal and its Alloys” **IMO**, 1-44, (2013).
32. Johnston, J., R., Signorelli, R., A. and Freche, J., C., “Performance of rocket nozzle materials with several solid propellants” **NASA Technical Note, Washington** (1966).
33. Park, J. B. and Lakes R. S., “Biomaterials”, **Planum Pres**, New York and London, 66-115 (2007).
34. İnternet: Plansee materials, “Molybdenum”, <http://www.plansee.com/en/Materials-Molybdenum-402.htm> (2015).
35. Ghoniem, N. M., “Assesment of high-temperature refractory metals”, **UCLA – Apex meeting**, 1-76 (1998).
36. Majundar, S. and Sharma, I. G., “Development of Mo base TZM (Mo-0.5Ti-0.1Zr-0.02C) alloy and its shapes”, **Feature Article**, 312: 21-27 (2010).
37. Çiftçi, İ., “Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2003).
38. İpekçioğlu, N., “Frezecilik”, **Milli Eğitim Basımevi**, İstanbul, 1-3 (1984).

39. Ay, M., “CNC freze tezgahında frezeleme esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin ve titreşimlerin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 22-35 (2003).
40. Çiftçi, İ., “URT406-Talaşlı Üretim Prensipleri Ders Notları”, *Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği*, Karabük (2016).
41. Gezgin, A., “Prizmatik parçaların frezelenmesi esnasında, kesici uç sayısının takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2007).
42. Demirtaş, D., “Talaş kaldırma şartlarının belirlenmesinde çok amaçlı karar verme yöntemler”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 54-65 (1995).
43. Çakır, C. M., “Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri”, *Vipaş A.Ş.*, Bursa, 232–235 (2000).
44. Şeker, U., Kurt, A. and Çiftçi, İ., “Design and construction of a dynamometre for measurement of cutting forces during machining with linear motion”, *Materials and Design*, 23: 355-360 (2002).
45. Dombovari, Z. and Stepan, G., “On the bistable zone of milling processes” *Philosophical Transactions*, 373: 1-17 (2015).
46. Che, D., Ehmann, K. and Cao, J., “Analytical modelling of heat transfer in polycrystalline diamond compact cutters in rock turning processes”, *Journal of Manufacturing Science*, 137(3), 031005 (2015).
47. Taylan, F., “Sert malzemelerin frezelenmesinde takım aşınma davranışlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta (2009).
48. Dinler, S., “Talaş Kaldırmada Takım Aşınması ve Takım Ömrü”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1993).
49. DeGarmo, E. P., Black, J. T. and Kohser, R. A., “Materials and processes in manufacturing”, *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, 214-652 (1997).
50. Çiftçi, İ., “URT317-Talaşlı İmalat Teknolojileri Ders Notları”, *Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği*, Karabük (2016).
51. Lindberg, R., A., “Processes and materials of manufacture”, 4th edition, *Prentice-Hall* (1990).
52. Groover, M. P., “Fundamentals of modern manufacturing – materials, processes and systems”, *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, 220-639 (1996).

53. Yaman, B. ve Mandal, H., “SiAlON seramikleri ve Fe-esaslı alaşımlar arasında meydana gelen kimyasal etkileşimlerin incelenmesi” *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22-2 (2009).
54. Boothroyd, G. and Knight, W. A., “Fundamentals of machining and machine tools”, 2nd edition, Marcel Dekker, New York (1989).
55. Amstead, B. H., Ostwald, P. F. and Begeman, M. L., “Manufacturing Processes”, 8th edition, *John Wiley & Sons*, New York, 457 (1987).
56. Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., Saoubi, R. M., Aspinwall, D. K., Outeiro, J. C., Mayer, D., Umbrello, D. and Jayal, A. D., “Surface integrity in material removal processes: Recent advances”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 60: 603-626 (2011).
57. Sandvik Koromant, “Modern metal cutting – A practical handbook”, English Edition, *Sandvik Coromant*, Sweden, I-III (1994).
58. Shaw, M. C., “Metal cutting principles”, *Oxford University Press*, Oxford, 1-9 (1989).
59. Kopaji, J. and Bahor, M., “Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product”, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-92: 381-387 (1999).
60. Zlatin, N., Field, M. and Gould, J., “Machining of refractory materials”, Armed Services Technical Information Agency, *ASD Interim Report Unclassified*, Virginia, 7-532a(IX) (1963).
61. Chandler, H. E., “Machining of specific metals and alloys”, ASM Handbook 16 Machining, *ASM International*, U.S.A., 858-870 (1990).
62. Demir, L., “İstatistiksel deney tasarımı yöntemi ve bir tekstil işletmesinde uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli (2004).
63. Dervişoğlu, N. ve Muluk, F. Z., “Taguchi tasarımının uygulanması ve klasik kesirli çok etkenli tasarımla karşılaştırılması”, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8: 65-78 (2007).
64. İnternet: ISO 16336:2014 “Applications of statistical and related methods to new technology and product development process - Robust parameter design (RPD)”. <https://www.iso.org/standard/56183.html> (2014).
65. Saat, M., “Kalite denetiminde taguchi yaklaşımı”, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3: 97-108 (2000).

66. Kackar, R. N., “Taguchi’s quality philosophy: analysis and commentary”, *Quality Progress*, 21-29 (1986).
67. Noori, H. and Russell, R., “Production and operations management”, *McGraw-Hill Inc.*, New York, (1995).
68. Gunter, B., “A perspective on the taguchi method”, *Quality Progress*, 44-52 (1987).
69. Box, G. and Bisgard, S., “The scientific context of quality improvement”, *Quality Progress*, , 54-61 (1978).
70. Kumar, S., Kumar P. and Shan, H., S., “Optimization of tensile properties of evaporative pattern casting process through taguchi’s method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 204: 59-69 (2008).
71. Taguchi, G. and Clausing, D., “Robust quality”, *Harvard Business Review*, 65-75 (1990).
72. Yıldırım, S., “Ürün tasarımı geliştirmesi: Taguchi tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2011).
73. Barker, T., B., “Quality engineering by design: Taguchi’s philosophy”, *Quality Progress*, 32-33 (1986).
74. Ghani, J. A., Choudhury, I. A. and Hassan, H. H., “Application of taguchi method in the optimization of end milling parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 84–92 (2004).
75. Park, J. Y., Kim, Y. D., Kim, S. R., Han, S. Y. and Maeng, J. S., “Robust design of an active micro-mixer based on the taguchi method”, *Sensors and Actuators B*, 129: 790-798 (2008).
76. Darwin, J. D., Lal, D. M. and Nagarajan, G., “Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18%Cr martensitic stainless steel by Taguchi method”, *Journal of Material Processing Technology*, 195: 241-247 (2008).
77. Günay, M., “AISI 316L çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (3): 437-444 (2013).
78. Gökler, M. İ. and Ozanözü, A. M., “Experimental investigation of effects of cutting parameters on surface roughness in the wire EDM process”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40: 1831-1848 (2000).
79. Fish, J. and Belytschko, T., “A first course in finite elements”, *John Wiley & Sons*, Chichester, England, 1-9 (2007).



80. Ekinci, S., “Gemi pervane yüzeyinde tabaka kavitasyonunun sayısal olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
81. Moaveni, S., “Finite element analysis: Theory and application with ANSYS”, *Prentice Hall*, New Jersey (1999).
82. Gökçe, H., “Prediction of nonlinear dynamic impact force history by finite element method”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 11 (2): 32-37 (2018).
83. Hughes, T. J. R., “The finite element method linear static and dynamic finite element analysis” *Dover Publications*, New York (1987).
84. Sekmen, M., “Talaş açısının kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmeler üzerindeki etkilerinin simülasyonu ve deneysel olarak doğrulanması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2013).
85. Liu, G. R. and Quek, S. S., “The finite element method: a practical course”, *Ed: Liu G.R. and Quek S.S. Butterworth Heinemann*, Oxford, 1-11 (2003).
86. Güler, M. S. ve Şen, S., “Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler”, *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5-1: 56-66 (2015).
87. Cook, R. D., “Finite element modeling for stress analysis”. *Wiley*, New York, 1-15 (1995).
88. Taşkınsel, E. ve Gümüş, H. Ö., “Sonlu elemanlar stres analizi ve restoratif diş hekimliğinde kullanımı” *Atatürk üniversitesi diş hekimliği fakültesi dergisi*, 131-135 (2014).
89. Sakaguchi, R. L. and Powers, J. M., “Craig’s restorative dental materials” *Elsevier 13th. ed*, Texas (2012).
90. İnternet: AUTODESK, Taşdemir, T. E., “Analiz mühendisinin el kitabı”, [http://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/analiz\\_el\\_kitabi.pdf](http://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/analiz_el_kitabi.pdf) (2008).
91. Karagüzel, U., “Zirkonyum esaslı kalın camsı metalin frezelenmesinin sonlu elemanlar analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2010).
92. Mackerle, J., “Finite element analysis and simulation of machining: an addendum A bibliography (1996-2002)”, *Machine Tools and Manufacture*, Sweden (2003).

93. Komvopoulos, K. and Erpenbeck, S. A., “Finite element modeling of orthogonal metal cutting”, *The American Society of Mechanical Engineers* 113 (3): 253-267 (1991).
94. Kurt, A. ve Şeker, U., “Kesici takım gerilmelerinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (4): 491-497 (2005).
95. Villumsen, M. F. and Fauerholdt, T. G., “Prediction of cutting forces in metal cutting, using the finite element method, alagrangian approach” *LS-DYNA Anwenderforum*, C-III-1, Bamberg (2008).
96. Pius, O., Benjamin, O. and Nnaemeka, O., “Analytical modeling of temperature distribution in metal cutting: Finite element approach”, *International Journal of Engineering Science Invention*, 2 (4): 17-33 (2013).
97. Varlık, T., Özdemir, K. ve Çakır, M. C., “Dönel takımlar ile tornalama işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi”, *5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Bursa (2014).
98. Laakso, S., and Niemi, E., “Using FEM simulations of cutting for evaluating the performance of different johnson cook parameter sets acquired with inverse methods”, *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Wolverhampton, UK (2015).
99. Kaplanlıoğlu, B. ve Gemalmayan, N., “Sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemler kullanılarak bulunan gerilmelerin karşılaştırılması” *Mühendis ve Makina*, 56-665: 62-72 (2015).
100. Aydın, M., “Dik kesme işleminde kalıcı gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 19 (3): 297-304 (2016).
101. Cui, X., Wang, D. and Guo, J., “Influences of tool rake angle and cutting speed on ceramic tool failure in continuous and intermittent turning of hardened steel”, *Ceramics International*, 12390-12400 (2016).
102. Brinksmeier, E., Preuss, W., Riemer, O. and Rentsch, R., “Cutting forces, tool wear and surface finish in high speed diamond machining”, *Precision Engineering*, 293-204 (2017).
103. Gökçe, H., Yavuz, M., Gökçe, H. ve Şeker, U., “Orijinal matkap geometrisinde delme performansının sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması” *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3: 1-8 (2017).
104. Thepsonthi, T. and Özel, T., “3-D finite element simulation of micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy”, *7 th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Mold* Antalya, 169-174 (2013).

105. Mamedov, A. ve Lazoğlu, İ., “CNC ile talaşlı işlemede kuvvet ve titreşimin ölçümü”, **8. Ulusal Ölçübilim Kongresi** (2013).
106. Taşgetiren, S., Aslantaş, K. ve Kurt, A., “Torna kesme kaleminde gerilmeler: Sürtünme katsayısının etkisi”, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi**, 2 (3): 1–10 (2000).
107. Shatla, M., Kerk, C. and Altan, T., “Process modelling in machining part II: Validation and applications of the determined flow stress data”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 41: 1659-1680 (2001).
108. Çiftçi, İ., “Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 20: 205-209 (2005).
109. Ezugwu, E. O. and Kim, S. K., “The performance of cermet cutting tools when machining an Ni-Cr-Mo (En 24) steel”, **Lubrication Engineering**, 51 (2): 139-145 (1995).
110. Çakıroğlu, R., “Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2011).
111. Yağmur, S., Acır, A., Şeker, U. ve Günay, M., “Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin kesme bölgesindeki sıcaklığa etkisinin deneysel incelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 28 (1): 1-6 (2013).

## ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin GÖKÇE 1982 yılında Çankırı’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Konya’da tamamladı. Meram Anadolu Meslek Lisesi CNC bölümünü bitiren Gökçe, 2005 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü’nden mezun oldu. 2007 yılında Selçuk Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde yüksek lisansını bitirmiş ve aynı yıl Ankara’da askerlik görevini tamamlamıştır. Otomotiv yedek parça üretimi, dökümhane otomasyon sistemleri, CNC-CAD-CAM sistemleri konularında özel sektör tecrübesi olan Gökçe, 2009 yılında Çankırı Karatekin Üniversitesi’nde göreve başlamış ve halen aynı kurumda görevine devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Çankırı Karatekin Üniversitesi  
Meslek Yüksekokulu  
Taşmescid Mevkii / ÇANKIRI

Tel : (506) 504 09 18

E-posta : [huseyingokce@karatekin.edu.tr](mailto:huseyingokce@karatekin.edu.tr)  
[hg.huseyingokce@gmail.com](mailto:hg.huseyingokce@gmail.com)

### **TEZ ÇALIŞMASI İLE İLGİLİ YAYINLAR**

**Uluslararası indekslerde taranmış (sci expanded vb.)**

1. Gökçe, H., Çiftçi, İ. and Demir, H., “Cutting parameter optimization in shoulder milling of commercially pure molybdenum”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40: 360 (2018).
2. Gökçe, H., ve Çiftçi, İ., “Molibden alaşımlarının işlenmesinde kesici takım ve kesme parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonu”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, (2018).

