



**DIN 1.2343 ÇELİĞİNİN SERT  
TORNALAMASINDA İŞLENEBİLİRLİK  
PARAMETRELERİNİN ANALİZ EDİLMESİ VE  
MODELLENMESİ**

**Emrah ŞAHİN**

**2022  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**DIN 1.2343 ÇELİĞİNİN SERT TORNALAMASINDA İŞLENEBİLİRLİK  
PARAMETRELERİNİN ANALİZ EDİLMESİ VE MODELLENMESİ**

**Emrah ŞAHİN**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**KARABÜK  
Eylül 2022**

Emrah ŞAHİN tarafından hazırlanan “DİN 1.2343 ÇELİĞİNİN SERT TORNALAMASINDA İŞLENEBİLİRLİK PARAMETRELERİNİN ANALİZ EDİLMESİ VE MODELLENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsmail ESEN

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 30/09/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Akif KOÇ (SUBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. İsmail ESEN (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Selami SAĞIROĞLU (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. İbrahim ÇAYIROĞLU (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Recep KILIÇ (SUBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Emrah ŞAHİN

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **DIN 1.2343 ÇELİĞİNİN SERT TORNALAMASINDA İŞLENEBİLİRLİK PARAMETRELERİNİN ANALİZ EDİLMESİ VE MODELLENMESİ**

**Emrah ŞAHİN**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İsmail ESEN**

**Eylül 2022, 107 sayfa**

Sert malzemelerin tornalanması işlemi zahmetli bir işlemdir. Bu yüzden, son yıllarda imalat endüstrisinde sert malzemeleri taşlamak yerine, çok daha verimli bir işlem olan sert tornalama tercih edilmektedir. Çok cazip bir yöntem olan sert tornalama, araştırmacılarında vazgeçilmezi haline gelmiştir. Bu deneysel çalışmada, ısıl işleme 50 HRC sertliğine ulaşan DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliği, iki farklı takım uç yarıçapında, PVD kaplı karbür takım kullanılarak CNC torna tezgahında işlenmiştir. Deneyler; 0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm kesme derinliği; 0,05 mm/dev, 0,09 mm/dev, 0,13 mm/dev ilerleme hızı; 140 mm/dk, 160 mm/dk, 180 mm/dk kesme hızı ve 0,4 mm, 0,8 mm takım uç yarıçapı değerleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Deney tasarım modeli olarak, tam faktöriyel tasarım kullanıldı. Bu tasarıma göre toplam 54 deney

modellendi. Girdi parametrelerinin, ses şiddeti seviyesi, enerji tüketimi, yüzey pürüzlülüğü ve elektrik akımı değeri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizler, varyans analizi yöntemi ile yanıt yüzeyi yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Optimum kesme parametreleri ve seviyeleri bu optimum değerlere göre belirlenmiştir. Kesme parametreleri ile çıktı değişkenleri arasındaki ilişki iki boyutlu ve üç boyutlu grafiklerle analiz edilmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre takım uç yarıçapı (% 43,81) iken, ses şiddeti seviyesinde en etkili parametrenin kesme hızı (% 30.11) olduğunu göstermektedir. Ayrıca kesme derinliği hem elektrik akımı (% 48,63) hem de enerji tüketimi (% 44,82) üzerinde en etkili parametre olmuştur. Son olarak matematiksel bir model olarak regresyon katsayıları belirlenmiş ve bu tahmin edilen modelin gerçek deneyle elde edilenlere çok benzer sonuçlar verdiği analiz edilmiştir (Korelasyon değerleri: Yüzey pürüzlülüğü için % 97,26, enerji tüketimi için % 98,77, elektrik akımı için % 98,26 ve ses yoğunluğu seviyesi için % 89,53).

**Anahtar Sözcükler :** DIN 1.2343, Sert tornalama, Yüzey pürüzlülüğü, Ses şiddeti seviyesi, Elektrik akımı, Enerji tüketimi

**Bilim Kodu** : 91420

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **ANALYZING AND MODELING OF MACHINABILITY PARAMETERS IN HARD TURNING OF DIN 1.2343 STEEL**

**Emrah ŞAHİN**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İsmail ESEN**

**September 2022, 107 pages**

Turning of hard materials is a laborious process. Therefore, in recent years, hard turning, which is a much more efficient process, is preferred instead of grinding hard materials in the manufacturing industry. It became indispensable for hard turning researchers, which is a very attractive method. In this experimental study, DIN 1.2343 hot work tool steel, which reached 50 HRC hardness by heat treatment, was machined on a CNC lathe using PVD coated carbide tool in two different tool tip radii. Experiments; 0,05mm, 0,10mm, 0,15 mm depth of cut; 0,05 mm/rev, 0,09 mm/rev, 0,13 mm/rev feed rate; 140 mm/min, 160 mm/min, 180 mm/min cutting speed and 0,4mm, 0,8 mm nose radius values were selected. Full factorial design was used as the experimental design model. A total of 54 experiments were modeled

according to this design. The effects of input parameters on sound intensity level, energy consumption, surface roughness and electric current value were investigated. Analyzes were carried out by applying the analysis of variance method and the response surface method. Optimum cutting parameters and levels were determined according to these optimum values. The relationship between cutting parameters and output variables was analyzed with two-dimensional and three-dimensional graphics. As a result, the most effective parameter on the surface roughness was the noise radius (43.81%), while the most effective parameter on the sound intensity level was the cutting speed (30.11%). In addition, the depth of cut was the most effective parameter on both electric current (48.63%) and energy consumption (44.82%). Finally, as a mathematical model, the regression coefficients were determined and it was seen that this estimated model gave very similar results to those obtained by real experiment (Correlation values: 97.26% for surface roughness, 98.77% for energy consumption, 98.26% for electric current, and 89.53% for sound intensity level).

**Key Word** : DIN 1.2343, Surface roughness, Sound intensity level, Electric current, Energy consumption

**Science Code** : 91420



## TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca ve tez çalışmamda desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. İsmail ESEN'e teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu öğretim üyesi Dr. Öğretim Üyesi Abidin ŞAHİNOĞLU'na teşekkür ederim.

Büyük fedakârlıklarla beni büyüten, okutan anne ve babama, manevi olarak ve sabırla doktora sürecini yürütmemde destek olan eşim Pınar DEMİR ŞAHİN'e, kızlarım Deniz ve Ezgi'ye tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	5
LİTERATÜR ARAŞTIRMA .....	5
BÖLÜM 3 .....	29
TAKIM ÇELİKLERİ.....	29
3.1. TAKIM ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ .....	29
3.1.1. Çelikler ve Genel Tanımları .....	29
3.1.2. Takım Çelikleri.....	32
3.1.2.1. Soğuk İş Takım Çelikleri .....	34
3.1.2.2. Sıcak İş Takım Çelikleri .....	34
3.1.2.3. Yüksek Hız Çelikleri.....	36
3.1.2.4. Plastik Kalıp Çelikleri.....	36
BÖLÜM 4 .....	37
İŞLENEBİLİRLİK VE SERT TORNALAMA .....	37

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.1. İŞLENEBİLİRLİK .....	37
4.2. TORNALAMA .....	37
4.2.1. Tornalam İşlemi ve Kesme Parametreleri .....	38
4.2.2. Talaş Oluşumu ve Mekaniği.....	39
4.2.3. Isı ve Sıcaklık .....	39
4.3. SERT TORNALAMA İŞLEMİ .....	40
4.3.1. Sert Tornalama İşlemlerinde Ölçüm Yöntemleri .....	42
4.3.2. Takım Aşınması ve Takım Ömrü .....	42
4.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü .....	43
4.3.4. Kesme Kuvveti .....	43
4.3.5. Diğer Alternatif Ölçüm Metodları (Akım/Enerji Tüketimi/Titreşim/Ses) .....	44
BÖLÜM 5 .....	46
MATERYAL VE YÖNTEM .....	46
5.1. DENEYSEL METOD .....	46
5.2. İSTATİSTİKSEL METOD .....	54
5.2.1. Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülük, Akım, Ses Şiddeti ve Enerji Tüketimi üzerindeki etkileri .....	55
5.2.2. Varyans Analizi (ANOVA) .....	55
5.2.3. Optimum Kesme Parametreleri .....	56
5.3. DENEY DÜZENİĞİ .....	57
BÖLÜM 6 .....	58
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA .....	58
6.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	62
6.2. ELEKTRİK AKIM DEĞERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	69
6.3. SES ŞİDDETİ SEVİYESİ DEĞERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	75
6.4. ENERJİ TÜKETİMİ DEĞERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	80
6.5. REGRESYON DENKLEMLERİ.....	86
6.6. DENEY SONUÇLARI İLE TAHMİNİ MATEMATİKSEL MODELİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	87

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 7 .....	90
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	90
7.1. SONUÇLAR .....	90
7.2. ÖNERİLER .....	93
KAYNAKLAR .....	95
ÖZGEÇMİŞ .....	107

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 3.1. Fe-C denge diyagramı.....	30
Şekil 4.1. Tornalama işlemi ve kesme parametreleri. ....	38
Şekil 4.2. Metalin ortogonal kesiminde oluşan ısı bölgeleri.....	40
Şekil 4.3. Sert tornalama ile geleneksel tornalamanın karşılaştırılması.....	40
Şekil 4.4. a) sertleştirilmiş çeliklerin yüksek hızda işlenmesi esnasında oluşan kesme sıcaklıkları görüntüsü b) sertleştirilmemiş çeliklerin geleneksel işlenmesi . .....	41
Şekil 4.5. Tornalama işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri.....	44
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan CNC torna tezgahı. ....	47
Şekil 5.2. CNC torna tezgahında işlenen iş parçası. ....	48
Şekil 5.3. Kesme takımı ve ölçüleri. ....	49
Şekil 5.4. Takım tutucu ve ölçüleri. ....	50
Şekil 5.5. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve ölçüm esnasındaki görüntüler. ....	51
Şekil 5.6. a) Unit UT- 201 Pens ampermetre b) Pens ampermetre ile akım ölçümü (tek faz) c) faz kablosunun tezgahın önüne alınması d) tezgah önünde ölçülen akım değeri. ....	52
Şekil 5.7. Lutron SL 401 ses şiddeti ölçer ..... 54	54
Şekil 5.8. Deney düzeneği.....	57
Şekil 6.1. Yüzey pürüzlülüğü için pareto grafiği. ....	63
Şekil 6.2. Yüzey pürüzlülüğü için etkileşim grafikleri. ....	64
Şekil 6.3. Yüzey pürüzlülüğü için ana etki grafikleri. ....	65
Şekil 6.4. Yüzey pürüzlülüğü, takım uç yarıçapı ve kesme derinliği için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği. ....	67
Şekil 6.5. Yüzey pürüzlülüğü, takım uç yarıçapı ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	68
Şekil 6.6. Yüzey pürüzlülüğü, takım uç yarıçapı ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	68
Şekil 6.7. Yüzey pürüzlülüğü, kesme derinliği ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	69
Şekil 6.8. Elektrik akımı için pareto grafiği.....	70
Şekil 6.9. Elektrik akımı için etkileşim grafikleri.....	71
Şekil 6.10 Elektrik akımı için ana etki grafikleri.....	72

Şekil 6.11. Elektrik akımı, takım uç yarıçapı ve kesme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği. ....	73
Şekil 6.12. Elektrik akımı, takım uç yarıçapı ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	74
Şekil 6.13. Elektrik akımı, kesme derinliği ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği. ....	74
Şekil 6.14. Elektrik akımı, kesme derinliği ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	75
Şekil 6.15. Elektrik akımı, takım uç yarıçapı ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	75
Şekil 6.16. Ses şiddeti seviyesi için pareto grafiği.....	77
Şekil 6.17. Ses şiddeti seviyesi için etkileşim grafikleri.....	78
Şekil 6.18. Ses şiddeti seviyesi için ana etki grafikleri .....	78
Şekil 6.19. Ses şiddeti seviyesi, takım uç yarıçapı ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği .....	79
Şekil 6.20. Ses şiddeti seviyesi, takım uç yarıçapı ve kesme derinliği için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği .....	80
Şekil 6.21. Enerji tüketimi için pareto grafiği.....	81
Şekil 6.22. Enerji tüketimi için etkileşim grafikleri.....	82
Şekil 6.23. Enerji tüketimi için ana etki grafikleri.....	83
Şekil 6.24. Enerji tüketimi, kesme derinliği ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	84
Şekil 6.25. Enerji tüketimi, kesme derinliği ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	85
Şekil 6.26. Enerji tüketimi, ilerleme ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.....	85
Şekil 6.27. Yüzey pürüzlülüğü için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştırılması	88
Şekil 6.28. Ses şiddeti seviyesi için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştırılması .....	88
Şekil 6.29. Elektrik akımı için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştırılması.....	88
Şekil 6.30. Enerji tüketimi için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştırılması.....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Literatürde sert tornalama ile ilgili deneysel olarak çalışılan, farklı sertlik değerlerindeki bazı sıcak iş takım çelikleri üzerinde kullanılan takım malzemesi ile kesme parametre ve değerleri. ....	5
Çizelge 2.2. Literatürde sert tornalama ile ilgili deneysel olarak çalışılan, farklı sertlik değerlerindeki bazı malzemeler üzerinde kullanılan takım malzemesi ile kesme parametre ve değerleri. ....	7
Çizelge 2.3. Literatürdeki örnek girdi ve çıktı parametreleri ve tahmin modelleri....	26
Çizelge 3.1. Alaşım elementinin çeliğe kazandırdığı özellikler. ....	31
Çizelge 3.2. Takım çelikleri grupları (AISI normunda simgesel gösterimleri) .....	32
Çizelge 3.3. Sıcak iş takım çelikleri sınıflandırılması (Standart: ASTM A681) .....	35
Çizelge 5.1. Deneyde kullanılan sıcak iş takım çeliğinin standartları .....	46
Çizelge 5.2. DIN 1.2343 çelik malzemenin kimyasal bileşimi.....	46
Çizelge 5.3. DIN 1.2343 çeliğin mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 5.4. TTC 630 model CNC torna tezgahı önemli özellikleri.....	47
Çizelge 5.5. Mitutoyo Surfrest 211 marka pürüzlülük ölçüm cihazı teknik özellikleri. ....	51
Çizelge 5.6. Unit UT- 201 Pens ampermetre özellikleri.....	53
Çizelge 5.7. Lutron SL 401 ses şiddeti ölçer teknik özellikleri. ....	54
Çizelge 5.8. Kesme parametre ve seviyeleri. ....	55
Çizelge 6.1. Deney dizaynı. ....	59
Çizelge 6.2. Deneylerin ölçüm sonuçları. ....	61
Çizelge 6.3. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.....	63
Çizelge 6.4. Yüzey pürüzlülüğü için optimum noktalar .....	66
Çizelge 6.5. Elektrik akımı için ANOVA tablosu.....	70
Çizelge 6.6 Elektrik akımı için optimum noktalar .....	73
Çizelge 6.7. Ses şiddeti seviyesi için ANOVA tablosu. ....	76
Çizelge 6. 8. Ses şiddeti seviyesi için optimum noktalar. ....	79
Çizelge 6.9. Enerji tüketimi için ANOVA tablosu. ....	80
Çizelge 6.10. Enerji tüketimi için optimum noktalar.....	83

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $a_p$  : kesme derinliği  
 $V_c$  : kesme hızı  
 $f$  : ilerleme miktarı  
 $r$  : takım uç radius  
 $H$  : sertlik  
 $t$  : işleme süresi  
 $T$  : toplam işleme süresi  
 $D$  : çap  
 $L$  : işleme uzunluğu  
 $N$  : işleme hızı  
max : maksimum  
m : metre  
mm : milimetre  
ml : mililitre  
 $\mu\text{m}$  : mikrometre  
dev : devir  
dk : dakika  
Db : desibel  
A : amper  
Wh : watt saat  
s : saniye  
F : varyans oranı  
P : istatistiksel anlamlılık  
 $R^2$  : belirleme (determinant) katsayısı



## KISALTMALAR

DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Standartları Enstitüsü)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir-Çelik Enstitüsü)
EN	: European Norm (Avrupa Standartları)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı sayısal denetim)
HRC	: Hardness Rockwell C (Rockwell C Sertlik Birimi)
RSM	: Response Surface Methodology (Yanıt Yüzey Yöntemi)
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
CBN	: Cubic Boron Nitride (Kubik Bor Nitrür)
PCBN	: Polycrystalline Cubic Boron Nitride (Polikristal Kubik Bor Nitrür)
DOE	: Design of Experiment (Deney Tasarımı)
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniği)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme Tekniği)
Düz KT	: Adjusted Sums of Squares Adj SS (Düzeltilmiş Kareler Toplamı)
Düz KO	: Adjusted Mean Squares Adj MS (Düzeltilmiş Kareler Ortalaması)
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Rt	: Maksimum Pürüz Yüksekliğinin Ortalaması
Rz	: Profilin En Yüksek ve En Düşük Noktaları Arasındaki Dikey Mesafe
S	: Ses Şiddeti Seviyesi
I	: Makine Elektrik Akımı
E	: Enerji Tüketimi
F <sub>c</sub>	: Teğetsel Kuvvet
F <sub>r</sub>	: Radyal Kuvvet
F <sub>f</sub>	: İlerleme Kuvveti
Btu	: British Thermal Unit (İngiliz Isı Birimi)
Opt. Sev.	: Optimum Seviye
Opt. Par.	: Optimum Parametre
ANN	: Artificial Neural Networks (Yapay Sinir Ağları)
TOPSİS	: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (İdeal Çözüme Benzerlik Bakımından Sıralama Performansı Tekniği)

- GA : Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
- SVR : Support Vector Regression (Destek Vektör Regresyonu)
- LSTM : Long Short-Term Memory (Uzun Kısa Süreli Hafıza)
- MUCT : The Minimum Uncut Chip Thickness (Minimum Kesilmemiş Talaş Kalınlığı)
- BUE : Built Up-Edge (Malzeme Yığılma Miktarı)
- MRR : Material Removal Rate (Malzeme Kaldırma Oranı)
- VMR : Volume of Material Removal (Malzeme Kaldırma Hacmi)
- MQL : Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama)
- OHNS : Oil-Hardened Non-Shrinkage (Yağda Sertleştirilmiş Büzülme)
- DRX : Dynamic Recrystallization (Dinamik Yeniden Kristalleşme)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünyadaki nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler ile birlikte imalat endüstrisinde makine ve cihaz kullanımı artmıştır. Bu durum, enerji ve hammadde kullanımını da artırmaktadır. Araştırmacılar, son yıllarda enerji tüketiminde ve hammadde kullanımında verimlilik elde etmek için birçok çalışma yapmışlardır [1–4].

Son zamanlarda sertleştirilmiş çelikler; yüksek dayanım ve aşınma direnci ile tercih nedeni olmuştur [5,6]. Çünkü iş parçası malzemesini sertleştirerek, daha az makine parçası veya makine üretimi sağlamak ve daha uzun ömürlü daha kaliteli makineler ile daha az enerji tüketimi sağlamak mümkündür. Bundan dolayı, iş parçası malzemesine ısıtma işlemi uygulamak, malzemenin bir çok özelliğini iyileştirmektedir. Malzemenin sertliği ve yüksek dayanım, istenen özellikler olmasına karşın, işlenebilirliği zorlaştırmaktadır. Bu yüzden, ısıtma işleminden sonra sertleştirilmiş malzemenin işlenebilirliği, önemli bir araştırma konusu olmuştur.

Geleneksel biçimde, yüksek sertlikteki makine parçaları, maliyetli ve zahmetli bir işlem olan taşlama işlemiyle son şekillerine getirilmesine rağmen, modern olarak (yeni takım teknolojileri kullanımı ile) taşlama işlemi yapılmadan, taşlama kalitesinde veya daha iyi yüzey kalitesi elde edildiği, yapılan çalışmalarda görülmektedir [7–9]. Sertleştirilmiş çelikleri işlemek için çevreci, ekonomik ve işlenebilirliği kolaylaştıran bir teknolojiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da sert tornalamayla mümkün olmaktadır. Sert tornalama, sertlik değeri 45 HRC'nin üzerinde olan malzemelerin, tornalanması işlemidir. Sert tornalamanın çok büyük avantajları vardır. Sert tornalama bir finiş tornalama işlemidir. Bu yüzden çok iyi bir yüzey kalitesi elde edilmesi beklenir. Malzeme sertliği arttığı ölçüde yüzey kalitesi iyileşmektedir [10,11]. İşlenen sert malzemenin yüzeyi, taşlama kalitesinde veya çok daha iyi çıkmaktadır. Aynı zamanda malzeme, klasik yöntemlere göre çok daha kısa

kurulum süresi ile işlenmektedir. Bu avantajlar sert tornalama işlemini çok esnek bir duruma getirmekte ve bu yüzdende verimliliği üst seviyelere çıkarmaktadır [12,13]. Böylelikle, talaşlı imalat için sert tornalama işlemini kullanarak, çok önemli bir amaca hizmet etmiş oluruz.

İmalat sektöründe, ülkemizin ve dünyanın en büyük problemi olan enerji tüketimini minimuma indirmek için geleneksel yöntemlerin yerine modern yöntemlerin yaygınlaşması gerekmektedir. Sürdürülebilir bir imalat için düşük enerji tüketimi çok önemli bir konu haline gelmiştir. Enerji tüketimi; sera gazlarının birikmesine, sıcaklık artışına, su seviyesinin artmasına, ve birçok doğal felakete zemin hazırlamaktadır. Enerji kaynaklarının sınırlı olması, üretilmesinden kaynaklanan bir takım yaşamsal sorunlar, enerjiye bağlı savaşların artmasına yol açarken, insanlığın geleceği açısından çok ciddi sonuçları beraberinde getirmektedir. Enerji tüketimindeki çok önemli bir payın imalat endüstrisine ait olması, bu sorunun çözülmesi gereken en büyük problem oluşunu göstermektedir [14]. Sert tornalama işlemi ile, (taşlama işlemine gerek kalmadan) imalat endüstrisinin ihtiyacı olan enerji, verimli bir şekilde kullanılmış olacaktır. Bu alanda sağlanacak verimlilik, sadece rekabet şansını artıracak bir seçenek sunmamakta, aynı zamanda toplumsal bir gerekliliği yerine getirmektedir. Bu yüzden düşük enerji tüketimi ile en kaliteli yüzeylerin elde edilmesi en temel hedef haline gelmiştir.

Bu deneysel çalışmada hammadde kullanımını, enerji tüketimini azaltmak ve ürün kalitesini artırmak için alternatif ölçüm yöntemleri araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada 50 HRC sertliğine kadar ısıl işleme sertleştirilen yaygın bir kullanım alanına sahip DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliği, kaplamalı karbür takım ile CNC tornada işlenmiştir. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, elektrik akım değeri, enerji tüketimi ve ses şiddeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır ve matematiksel modelleri oluşturulmuştur.

Şimdiye kadar talaşlı imalat üzerine yapılan pek çok çalışmada, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve kesme kuvvetleri ile ilgili çalışmalara önem gösterilmiştir [15–17]. Makine üreticisi için üretilen parçanın düzgün olması kadar ses şiddeti seviyesi de önemli olmalıdır. Takım aşınmasını belirlemek zahmetli bir süreç olduğu için ses

şiddeti seviyesini ölçerek de aşınma hakkında fikir sahibi olunabilmektedir [18,19]. Aynı zamanda iş parçası işlenirken oluşan ses şiddeti seviyesi özellikle iş sağlığı ve güvenliği açısından dikkat edilmesi gereken bir konudur [20]. İmalat sanayinde çalışanlar yüksek gürültü yoğunluğuna maruz kalmaktadır. Bu nedenle literatürde eksik olan ses şiddeti konusu çağın gerekliliği haline gelmiştir. Ayrıca elektrik akımı değeri, anlık olarak ölçüldüğü için, anlık ölçülemeyen takım aşınması ve yüzey pürüzlülük değerlerinin tahmin edilmesi açısından pratik bir ölçüm yöntemi haline gelmiştir [21]. Aynı şekilde enerji tüketimi de üreticiler için çok önemlidir. Diğer bir deyişle, ekonomik işlemenin yanı sıra küresel ısınmaya (çevreye) katkıları da çok önemli bir konu olduğunu göstermektedir. Bu tür çalışmalardan elde edilen bilgiler ile üreticilerin maliyetlerini düşürmeleri ve yüksek mukavemetli makine parçaları ile rekabet güçlerini artırmaları mümkün olacaktır [19]. Gelecekte sürdürülebilir ve sağlıklı bir yaşam için bu tür çalışmalara hız verilmelidir. Bu hususlar dikkate alındığında literatüre önemli bir katkı sağlamış olacaktır.

Hazırlanan çalışmada öncelikle, ilk bölümde sert tornalama işleminin öneminden ve çalışmada kullanılan çıktı değişkenlerinin sunduğu avantajlardan bahsedilerek, çalışmanın literatüre ne tür katkılar sunacağı özetlenmiştir.

Konu ile ilgili, sert tornalama işlemlerinde ne tür gelişmeler yaşandığı, kapsamlı bir şekilde ikinci bölüm olan literatür araştırması kısmında sunulmuştur. Ayrıca bu sayede, çalışmada kullanılan girdi ve çıktı parametrelerinin seçimi şekillenmiş oldu.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, kısa bir şekilde çeliklerin özellikleri ve kullanılan önemli alaşım elementleri özetlenmiştir. Ayrıca takım çeliklerinin genel özelliklerinden bahsedilmiştir ve çalışma ortamlarına göre takım çelikleri sınıflandırılmıştır. Böylelikle bu bölüm, deneylerde kullanılan sıcak iş takım çeliklerinede genel anlamda bir bakış oluşturmaktadır.

Dördüncü bölümde, işlenebilirlik, sert tornalama ve ölçme konusunda bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde, materyal yöntem kısmına yer verilmiştir. Bu bölümde, deneyde kullanılan malzemeler, cihazların özellikleri, deney düzeneği ve kullanılan istatistiksel yöntem ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Deney sonuçları, altıncı bölümdeki deneysel bulgular ve tartışma kısmında detaylı bir şekilde yorumlanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen çıktılar; yüzey pürüzlülük, elektrik akım, ses şiddeti seviyesi ve enerji tüketimi değerleri tek tek irdelenmiştir. Bu çıktı değerleri ile varyans analizi (ANOVA) tabloları, ana etki, pareto, etkileşim, üç boyutlu yüzey grafikleri oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Bölümün sonunda, tahmini bir matematiksel model oluşturulmuştur ve deney sonuçları ile tahmini model karşılaştırılmıştır.

Son olarak yedinci bölümde, deneysel çalışma amacına uygun bir şekilde yorumlanmıştır ve önemli kısımlara vurguda bulunularak, çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMA

Silindirik taşlama işlemlerini ortadan kaldıran sert tornalama, son yıllarda sert malzemeye ihtiyaç duyulan tüm alanlarda kullanılabilir. Kesici takımlar ve CNC tezgahlardaki son gelişmeler sayesinde bu konu daha çok yaygınlaşmaya başlamıştır ve bu konu çok cazip hale gelmiştir. Sert tornalama işlemleri, kullanım esnekliği ve daha az işlem gerektirdiğinden çok daha kısa sürede sonuçlandırılır. Buna rağmen malzeme kaldırma oranı fazla ve enerji tüketimi düşürüldüğünde çok daha ekonomik ve çevreci bir işleme yöntemi olmuştur [9,10].

Çizelge 2.1. Literatürde sert tornalama ile ilgili deneysel olarak çalışılan, farklı sertlik değerlerindeki bazı sıcak iş takım çelikleri üzerinde kullanılan takım malzemesi ile kesme parametre ve değerleri.

Malzeme ve sertlik (HRC)	Kesme takım malzemesi	Kesme parametre ve değerleri	Referans
DIN 1.2343 (40,45, 50)	CBN	V(120 180 240) f(0,08 0,12 0,16) a(0,15 0,30 0,45) H(40 45 50)	[22]
DIN 1.2343 (50)	Karbür ve seramik	V(120 180) f(0,08 0,16) a(0,15)	[23]
DIN 1.2343 (48-50)	Seramik	V(100 130 160) f(0,05 0,13 0,20) a(0,1 0,3 0,5) r(0,4 0,8 1,2)	[24]
DIN 1.2343 (54)	Kaplamalı ve kaplamasız CBN	V(150 200 250 300) f(0,05 0,10 0,15 0,20) a(0,1 0,2 0,3 0,4)	[25]
DIN 1.2343 (50)	CC650 Seramik	V(90 120 180)-f(0,08 0,12 0,16) a(0,15 0,30 0,45)	[26]
DIN 1.2343 (45)	CVD Kaplamalı karbür	V(100 120 140) f(0,1 0,2 0,3) a(0,2 0,4 0,6)	[27]
DIN 1.2343 (50)	CC650-CC6050 seramik	V(100 150 200) f(0,08 0,14 0,20) a(0,1 0,3 0,5) r(0,8 1,2)	[28]
DIN 1.2343 (45,50, 55)	CBN (7020)	V(120 180 240) f(0,08 0,12 0,16) a (0,15 0,30 0,45) H(45 50 55)	[29]

Deneyleerde kullanılan DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliği ile ilgili, literatürde yer alan farklı sertlik değerlerine sahip, sıcak iş takım çelikleri üzerinde kullanılmış olan takımlar, kesme parametre ve değerleri özet bir şekilde Çizelge 2.1.'de sunulmuştur. Bu çizelgedeki çalışmalar ile genel olarak takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerinde kesme parametrelerinin etkilerine yer verilmiştir. Bu etkileri belirlemek için yanıt yüzey metodu (RSM) kullanmışlardır ve varyans analizi (ANOVA) yapmışlardır. Çeşitli modeller oluşturmuşlardır ve optimum kesme parametre seviyelerindeki optimum çıktı değerlerini belirlemişlerdir.

Rathod vd. yaptıkları çalışmada 3 farklı sertlikteki (48 HRC- 50 HRC- 52 HRC) DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliğini kaplamalı CBN takım kullanarak tornalamışlardır. 0,15 mm'lik sabit kesme derinliğinde, 3 farklı kesme hızı ve ilerleme miktarında 11 farklı deney dizayn etmişlerdir. Düşük bir yüzey pürüzlülüğü için, takım aşınma ilerlemesini ve aşınma mekanizmalarını incelenmesinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Belirlenen girdi faktörleri ile yapılan deneyleerdeki beşinci, onuncu, on beşinci, yirminci ve yirmi beşinci dakikadaki, aşınma değerlerine bakarak aşındırma ve yapıştırma mekanizmasını incelemişlerdir. Bu şekilde takım aşınma modeli geliştirmişlerdir. Bu model ile deney sonuçlarının çok yakın bir şekilde tahmin edildiğini göstermişlerdir. Orta ve yüksek sertlik değerlerindeki (50-52 HRC) malzeme ile yaptıkları deneyleerde, daha çok aşındırma (çizim) tip aşınmanın olduğunu, yüksek kesme hızlarında (220 m/dak) ise yapışma (kaynaşmalı) tip aşınmanın olduğunu belirtmişlerdir ve bu durumu serbest yüzey aşınması ile oluşan sıcaklıkla açıklamışlardır [30].

Aoucci vd., DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliğini üç farklı uçla (CC670, CC650, CBN7020) farklı kesme parametrelerinde, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Yaptıkları analizde en iyi yüzey kalitesine düşük ilerleme ve yüksek kesme hızlarında ulaşmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme miktarından etkilendiğini ve CBN 7020 takımın en iyi performans gösterdiğini analiz etmişlerdir [31].

Kumar vd., AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin üç farklı kalitede CBN takımla (1-low CBN, 2-high CBN, 3-TiAlN coating CBN), farklı kesme parametrelerinde (ilerleme,



kesme hızı, kesme derinliği ve sertlik), kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. En iyi yüzey pürüzlülüğünü ve en düşük kesme kuvvetini CBN 1. seviye takımının sağladığını görmüşlerdir. Sertlik arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin düştüğünü belirtmişlerdir. [32].

Çizelge 2.2. Literatürde sert tornalama ile ilgili deneysel olarak çalışılan, farklı sertlik değerlerindeki bazı malzemeler üzerinde kullanılan takım malzemesi ile kesme parametre ve değerleri.

<b>Malzeme ve sertlik (HRC)</b>	<b>Kesme takım malzemesi</b>	<b>Kesme parametre ve değerleri</b>	<b>Referans</b>
Inconel 718 (45)	CVD kaplamalı karbür	V(60 90 190 255) f(0,1) a(0,5)	[33]
AISI 4340 (45)	Kaplamalı ve kaplamasız karbür	V(90 105 130 160) f(0,06 0,08 0,12 0,16) a(0,2 0,3 0,4 0,5)	[34]
AISI D2 (57)	CBN	V(80 116 152) f(0,04 0,12 0,20) a(0,2) r(0,4 0,8 1,2)	[35]
AISI 52100 (57)	PCBN	V(400 650 900 rpm) f(0,04 0,06 0,08) a(0,4 0,6 0,8) r(0,4 0,8 1,2)	[36]
JIS S45C (52-54)	Kaplamalı karbür	V(50 100 150) f(0,05 0,10 0,15) a(0,4 0,5 0,6)	[37]
AISI 4340 (48-50)	Kaplamalı karbür	V(150 200) f(0,07 0,17) a(0,2 0,4)	[38]
AISI 4140 (55)	Seramik	V(120 135 150) f(0,11 0,22) a(0,30)	[39]
AISI D2 (45)	PVD Kaplamalı karbür ve CBN	V(110 150 190) f(0,05 0,75 0,10) t(2 4 6)	[40]
AISI 52100 (55)	PVD Kaplamalı karbür	V(140 195 250) f(0,08 0,10 0,12) a(0,06 0,08 0,10)	[41]
AISI 52100 (50)	Kaplamalı karbür	V(70 110 150) f(0,05 0,10 0,15) a(0,1 0,2 0,3) r(0,4 0,8 1,2)	[42]
EN 353 Alaşımı	Tungsten karbür	V(166 207 249) f(0,20 0,25 0,30) a(1,0 1,4 1,8) r(0,4 0,8 1,2)	[43]
DIN 1.2080	CVD kaplamalı karbür	V(150 250 350) f(0,08 0,12 0,16) a(0,2 0,4 0,6) r(0,8 1,2 1,6)	[44]

Literatürde yer alan sert tornalama ile ilgili, diğer malzemeler için seçilen takımlar, sertlik değerleri ve kesme parametre değerleri Çizelge 2.2.'de sunulmuştur.

Literatürdeki çalışmalar, sertleştirilmiş malzemeleri işlerken, yüksek sertlik özelliklerinden dolayı CBN ve seramik takımların takım malzemesi olarak tercih edildiğini göstermektedir [35,39,45]. Ancak bu aletler oldukça pahalıdır ve darbe dayanımları düşüktür. Karbür uçlar CBN'den 20 kat daha ucuzdur. Literatüre göre, özellikle 45-55 HRC sertlik değerlerine sahip malzemeler üzerinde, karbür uçlar iyi sonuçlar vermektedir [46,47]. Tiwari vd. 52–54 HRC sert malzemeyi karbür uçlarla işlemişlerdir ve sonuçlar tatmin edici çıkmıştır [37]. Böylelikle sert malzemeleri işlemek için üretilen karbür uçlar, rijit takım tezgahlarında diğer pahalı takımlara göre çok daha uygun maliyetle uygulanabilmektedir. Alok ve Das AISI 52100 malzemeyi kaplamalı karbür takımla işlenmişler ve belirlenen kesme parametre değerlerinde, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti çıktılarını incelemişlerdir. Bu çıktılar analiz edildiğinde kesme hızının en etkili parametre olduğu sonucuna varmışlardır [41].

Sahu ve Choudhury, AISI 4340 çeliği kaplamasız (DCMT 11T304-THM) ve TiN kaplamalı (DCMT 11T304-TN 2000) karbür kesme uçları ile tornalama deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde en iyi yüzey kalitesini; kaplamalı karbür takım, yüksek hız ve düşük ilerleme miktarı ile elde ettiklerini belirtmişlerdir [34].

Ginting vd. yaptıkları çalışmada kuru kesme koşullarında farklı tip kaplamalı karbür takımlarla 48 HRC sertliğindeki AISI 4340 çelik malzemeyi tornalama işlemine tabi tutmuşlardır. Deneyi dizaynı için iki farklı kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği seçmişlerdir. Malzeme kaldırma hacmi (VMR) ve malzeme kaldırma oranı (MMR) değerlerine bakarak, PVD ve CVD kaplı karbür takımların verimliliğini değerlendirmişlerdir. Tüm kesme şartlarında tek katmanlı PVD kaplamalı karbür takımın, çok katmanlı CVD kaplı karbür takıma göre takım ömrünün daha uzun çıktığını belirtmişlerdir. Buna rağmen, çok katmanlı CVD kaplı takımın, katmanları içindeki bileşenler sayesinde, yüzey pürüzlülük değerinin, diğer takıma göre çok daha iyi sonuçlar verdiğini analiz etmişlerdir. Ayrıca, çoklu lineer regresyon

deneklemleri ile matematiksel tahmini bir model oluşturmuşlar ve deney çıktıları ile arasındaki doğruluğu değerlendirmişlerdir [48].

Çağan ve Buldum yaptıkları çalışmada, incoloy 825 malzeme üzerinde, PVD ve CVD kaplı üç farklı takım, üç farklı yüksek kesme hızı (500 m/dak-1000 m/dak-1500 m/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (0,1 mm/dev - 0,2 mm/dev - 0,4 mm/dev) parametrelerini kullanarak, dokuz farklı deney dizaynı ile tornalama işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı çıktı parametresi ile analizler yapmışlardır. Takım aşınması, talaş oluşumu ve yüzey kalitesini inceleyerek, optimum çıktı parametre değerlerini elde etmişlerdir. Yüzey kalitesinin en fazla kesme hızından, sonrasında ise ilerleme oranından etkilendiğini analiz etmişlerdir. İncelenen farklı kesici uç çeşitlerinin, malzeme yüzey kalitesi açısından herhangi bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Optimum yüzey pürüzlülük değerlerini, ikinci tip takım, 1000 m/dak kesme hızı değeri ve 0,11 mm/dev ilerleme miktarı değerlerinde elde etmişlerdir [49].

Elkaseer vd., 316L paslanmaz çelik malzemeyi, tungsten karbür takımlar kullanarak tornalamışlardır. İşlem sonunda, elde edilen talaş ve yüzey oluşumunu incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ve ilerleme miktarı arasındaki ilişkiyi belirlemek için ilk defa kullanılan yeni bir takım ile ve önceden kullanılmış aşınmış takımla, ayrı ayrı deneyler yapmışlardır. Sonlu elemanlar metodu kullanarak simülasyon modeli oluşturmuşlardır ve deneylerden elde edilen sonuçlar ile bu modeli karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonuçlarını analiz ettiklerinde, benzer talaş oluşumu elde edildiğini ve diğer deney sonuçlarında uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. İlerleme miktarının, yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan en önemli parametre olduğunu ve literatürün aksine bu iki parametre arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını yaptıkları analizlerde göstermişlerdir [50].

Alok ve Das, 52 HRC sertliğinde AISI 52100 malzemeyi PVD (HSN<sup>2</sup>) kaplı karbür takım ile işlemişlerdir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetini 3 farklı kesme parametre değerlerine göre incelemişlerdir. Yaptıkları literatür araştırmasında; kullandıkları takımın diğer kaplamalı takımlara göre takım aşınması bakımından çok daha düşük değerler verdiğini iddia etmişlerdir. En etkili parametre

olarak kesme hızını bulmuşlardır ve yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldığında ise, çok yüksek değerler elde etmişlerdir [51].

Duc vd., yaklaşık 52 HRC sertliğindeki AISI 1055 çeliği, PVD kaplı karbür takımlar ve seramik uçlar ile tornalama testleri yapmışlardır. Yanıt parametresi olarak yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme kuvvetini belirlemişlerdir. Sert tornalama performansını analiz etmek için, farklı takım geometrileri üzerindeki etkilerine bakmışlardır. Kesme kuvvetinin yüzey pürüzlülük üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını analiz etmişlerdir. Eğim açısının diğer takım geometrilerine nazaran sert tornalama için en etkili olduğunu ve diğer cevap parametrelerine göre eğim açısının kesme kuvveti üzerinde en etkili olduğunu belirtmişlerdir. Yerel boşluk açısının artması ile, tüm cevap parametrelerinin düştüğü sonucuna varmışlardır. Kesme kenar açısının artması; takım ucu yarıçapının kesme konumunu değiştirdiğini, yerel negatif talaş açısını ve buna bağlı olarak yerel boşluk açısını artırdığını analiz etmişlerdir. Ayrıca yeni bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Gerçek kesim işlemindeki değerlerle, oluşturdukları matematiksel modeli karşılaştırmışlardır. Bu sonuçları karşılaştırdıklarında, birbirine uyumlu olduğunu göstermişlerdir [52].

Labidi vd yaptıkları deneysel çalışmada, 56 HRC sertliğindeki X210Cr12 çeliği kaplamalı seramik uç kullanarak tornalamışlardır. Farklı kesme süresi, ilerleme ve kesme hızında, Taguchi L27 deney dizaynı ile 27 farklı deney oluşturmuşlardır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü, takım yan aşınması ve teğetsel kesme kuvvetlerini çıktı parametresi olarak belirlemişlerdir. İstatistiksel olarak, iki farklı modelleme yöntemi (RSM ve ANN) uygulamışlardır. Her bir çıktı parametresi için bu modelleme yöntemleri ile matematiksel tahmin modeli oluşturmuşlardır Ayrıca yaptıkları analizle optimum kesme koşullarını belirlemişlerdir. Yaptıkları ANOVA sonuçları ile, yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeden, takım yan aşınmasının kesme hızından ve teğetsel kesme kuvvetinin kesme süresinden etkilendiğini analiz etmişlerdir. Tüm çıktı parametreleri için, düşük kesme süresi, düşük ilerleme miktarı ve düşük kesme hızının optimum sonuçlar verdiğini analiz etmişlerdir. Yapay Sinir ağları yönteminin çok daha iyi sonuçlar verdiğini, tahmini modellerin uyum içinde olduğunu ve kullanılan ekonomik takımın CBN takıma alternatif olacak şekilde iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [53].

Das vd., 48 HRC sertliğindeki EN-24 alaşımlı çeliği kuru kesme şartlarında kaplamalı sermet takım kullanarak tormalamışlardır. Farklı kesme parametreleri kullanarak; aşınma, yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz, Rt), takım ucu sıcaklığı ve malzeme kaldırma oranı gibi bağımlı değişken parametreleri üzerindeki etkilerini, incelemişlerdir. Deneyle, Taguchi L27 deney tasarımı ile modellemişler ve ANOVA varyans analizi ile ise girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki önem seviyelerini belirlemişlerdir. Tüm yüzey pürüzlülük değerleri (Ra, Rz, Rt) ve kesici uçtaki aşınma için ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin en etkili parametreler olduğunu ana etki grafiklerine bakarak söylemişlerdir. Takım ucu sıcaklığı için kesme hızı, malzeme kaldırma oranı için ilerleme miktarının en etkili parametreler olduğunu analiz etmişlerdir. Son olarak Neuro-genetic algoritma kullanarak optimal kesme parametrelerini elde etmişlerdir [54].

Bouacha vd., 64 HRC sertliğe sahip AISI 52100 çeliğe, takım uç yarıçapı 0,8 mm olan CBN takım ile sert tormalama işlemi uygulamışlardır. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerleri (Ra, Rt, Rz) ve kesme kuvvetleri (Fr, Fc, Ft) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülük bakımından; en etkili parametreyi ilerleme olarak, kesme kuvvetleri bakımından; en etkili parametreyi talaş kalınlığı olarak, analiz etmişlerdir. İyi bir yüzey kalitesi için; yüksek kesme hızı, yüksek kesme derinliği ve düşük bir ilerleme gerektiğini vurgulamışlardır. Optimum yüzey pürüzlülük değerine ise yüksek kesme hızı (246 m/dak), düşük ilerleme (0,08 mm/dev) ve düşük kesme derinliği (0,15 mm) değerinde ulaşmışlardır [55].

Agrawal vd., AISI 4340 çeliği, CBN takım ile tormalamışlar ve farklı kesme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, ilerlemenin yüzey pürüzlülüğünü belirlemede en yüksek etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sonra sırasıyla kesme hızı ve kesme derinliği en etkili parametreler olduğu sonucuna varmışlardır [56].

Günay ve Yücel, yüksek alaşımlı beyaz dökme demir malzemeyi (Ni) iki farklı sertlik değerinde (50 HRC, 62 HRC) seramik ve CBN takımlarla işlemişlerdir. Her iki sertlik değerinde de en iyi yüzey kalitesi, CBN takımla sağlandığını göstermişlerdir. Yaptıkları analizde 62 HRC sertlikte en etkili parametre ilerleme

miktarı iken, 50 HRC sertliğinde en etkili parametre kesme hızı olduğunu analiz etmişlerdir [11].

Mir and Wani yaptıkları çalışmada, kuru kesme koşulları altında, farklı tip kesici takımlar kullanmışlardır. Takım aşınmasına ve yüzey pürüzlülüğüne bakarak, kullandıkları takımların performanslarını değerlendirmişlerdir. PCBN ucun, seramik ve karbür uca göre çok daha iyi bir takım ömrü sunduğunu göstermişlerdir. Yüzey pürüzlülüğün takımdaki aşınmadan etkilendiğini belirtmişlerdir. Bu yüzden en düşük yüzey pürüzlülük değerlerini PCBN takım kullanarak elde etmişlerdir [57].

Şahin, farklı sertlikteki yatak çeliklerini, CBN ve 2 farklı seramik takım ile tornalamış ve L9 deney dizaynı kullanarak, takım ömrünü, karşılaştırmalı bir şekilde analiz yaparak incelemiştir. Kesme parametresi olarak, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarı belirlemiştir. Deney sonuçları ile kesme hızının bariz bir şekilde takım ömründen etkilendiğini ve CBN takımla yapılan deneylerin çok daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir [58].

Dhilip vd., 48 HRC sertliğindeki OHNS malzemeyi, kuru kesme koşullarında kaplamalı karbür takım kullanarak, tornalama deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde; üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı kesme derinliğini kesme parametresi olarak seçmişlerdir. Taguchi L9 ortogonal dizi tasarımı ile dizayn ettikleri deneylerde çıktı parametreleri olarak malzeme kaldırma oranı (MRR), yüzey pürüzlülük ve işleme zamanı değerlerini ölçmüşlerdir. Düşük bir yüzey pürüzlülük için düşük ilerleme miktarının gerektiğini analiz etmişlerdir. İşleme zamanının optimum (minumum) değerini, yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme miktarı ile elde etmişlerdir. Malzeme kaldırma oranının (MRR) optimum değerine (maksimum); yüksek kesme hızı, düşük ilerleme miktarı ve düşük kesme derinliği ile ulaşıldığını analiz etmişlerdir [59].

Balwan vd. farklı sertlik değerlerindeki (58, 60, 62 HRC) EN 353 çeliği, 5 farklı girdi faktörü ve 3 farklı çıktı parametresi kullanarak analizlerde bulunmuşlardır. Deney tasarımı olarak Taguchi L27 ortogonal dizi kullanmışlardır ve gri ilişkisel analiz yöntemi uygulayarak parametreler arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir.

Malzeme kaldırma oranı, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü çıktı parametresi olarak incelemişlerdir. İlerlemenin tüm çıktı parametreleri arasında en etkili parametre olduğunu belirlemişlerdir. İlerleme ve kesme derinliğinin kesme kuvveti üzerinde etkili olduğunu saptamışlardır. Yaptıkları analizde, kesme hızı için seviye 1 (180 m/dak), ilerleme için seviye 3 (0,24 mm/dev), kesme derinliği için seviye 2 (0,5 mm), sertlik için seviye 1 (58 HRC), ve takım uç yarıçapı için seviye 2 (0,8 mm), optimum girdi faktörü seviyeleri olarak elde etmişlerdir. En son, istatistiksel bir matematiksel denklem belirleyerek, tahmin modeli oluşturmuşlardır [60].

Subbaiah vd. yaptıkları çalışmada, 3 farklı sertlik değerindeki (45 HRC - 50 HRC - 55HRC) AISI 4340 çeliğini, seramik bir uç ile CNC tornada, sert tornalama işlemlerine tabi tutmuşlardır. Kullandıkları kesme faktörleri, kesme derinliği (0,1 mm - 0,2 mm - 0,3 mm), kesme hızı (140 m/dak - 180 m/dak - 220 m/dak) ve ilerleme miktarı (0,05 mm/dev - 0,2 mm/dev - 0,35 mm/dev) olmuştur. Çıktı parametrelerini ise yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması olarak seçmişlerdir. Uygulanan, istatistiksel bir yöntem olan RSM modeli ve deney tasarımı için Box-Behnken'in, çok verimli bir araç olarak kullanıldığını sunmuşlardır. Elde ettikleri ANAOVA sonuçlarına göre, ilerleme miktarından çok belirgin bir şekilde yüzey pürüzlülüğün etkilendiğini analiz etmişlerdir. 45 HRC sertlik değerindeki çeliğin, 55 HRC değerindeki yüksek seviye sertlik değerindeki çeliğe göre, yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme miktarından çok daha fazla etkilendiğini göstermişlerdir. Takım aşınmasının ise sertlik ve kesme hızından etkilendiğini yaptıkları analizde elde etmişlerdir [61].

Tekkaya vd., 48 HRC sertlik değerine kadar sertleştirilmiş AISI 4140 malzemeyi, tornalamışlardır ve yüzey bütünlüğüne (beyaz katman oluşumu şeklinde oluşan malzemenin kenar bölgesi değişikliklerine) bakmışlardır. İşlenen malzemenin tane boyutu, yüzey modifikasyonu ve mikroyapısal değişikliklerini araştırmak için dinamik yeniden kristalleşme (DRX) ile ilgili iki farklı model yaklaşımı (Helmholtz serbest enerji modeli ve Zener Hollomon modeli) kullanmışlardır. Ayrıca Abacus Explicit programı kullanarak sonlu elemanlar modeli ve de 3 boyutlu modeller oluşturmuşlardır. Hem sonlu elemanlar modelini, hem de DRX modellerini deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır ve uyumlu sonuçlar verdiğini analiz etmişlerdir [62].

Thangarasu vd., EN 8 çeliğini, geleneksel torna tezgahında, seçilen 3 farklı kesme parametre aralığında, tornalama işlemlerine tabi tutmuşlardır. RSM yöntemi ve yapay sinir ağları ile; takım aşınması, kesme kuvveti, ve yüzey pürüzlülük gibi, çıktı parametre değerlerini inceleyerek, analizler yapmışlardır. Kesme kuvvetinin, kesme derinliğinden etkilendiğini göstermişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün bariz bir şekilde ilerleme miktarından etkilendiğini, benzer şekilde takım aşınmasında ilerleme miktarından etkilendiğini yaptıkları ANOVA analizinde sunmuşlardır. Takım aşınması ile ilgili bir model oluşturmuşlardır ve imalat endüstrisinde bu modelin pratik bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [63].

Bagga vd. yaptıkları çalışmada, kaplamalı karbür uç ile AISI 4140 çeliğini CNC torna tezgahında işlemişlerdir. Görüntü işleme teknikleri ile, takım ömrü tahmin modeli oluşturmak için, makine öğrenmesi metodu kullanmışlardır. Bu model için, takım aşınması görüntülerine yer vermişlerdir. Önce, bulanık mantık sistemi ile aşınma oluşan kısmı, sonra üstel bozulma modeli ile, takımın aşınmamış kısmının ne kadarlık bir ömür sergileyebileceğini belirlemişlerdir. Bu yöntemle takım aşınmasını çok pratik bir şekilde belirleyebildiklerini ve % 90 doğrulukla takım ömürünün tahmin edildiğini göstermişlerdir [64].

Kara vd. yaptıkları çalışmada, kaplamalı ve kaplamasız seramik takımlar kullanarak, üç farklı ısıl işlem ile sertleştirilmiş AISI D2 soğuk iş takım çeliği üzerinde, sert tornalama deneyleri yapmışlardır. Çıktı parametresi olan, takım aşınması ve yüzey pürüzlülük değerlerinin, kesme parametreleri üzerindeki etkilerine bakmışlardır. Ayrıca, yapay sinir ağları yöntemi ile yüzey pürüzlülük tahmininde bulunmuşlardır. Kaplamalı takımın (en düşük 0,18  $\mu\text{m}$ ) kaplamasız (en düşük 0,2267  $\mu\text{m}$ ) oranla çok daha iyi yüzey kalitesi verdiğini analiz etmişlerdir. Yine yaptıkları analizde, takım aşınması olarakta, kaplamalı takımın % 54 oranında daha yüksek performans verdiğini göstermişlerdir. Orta seviye bir kesme hızı (100 m/dak), düşük ilerleme miktarı (0,08 mm/dev), düşük kesme derinliği (0,25 mm), kaplamalı takımlarla ve gelenekselin dışında ısıl işlem uygulanan deney numunesi ile, optimum yüzey pürüzlülük değerlerini elde ettiklerini belirtmişlerdir [65].



Liew vd., sertleştirilmiş çeliklerin tornalanması sırasında kullanılan, soğutma yöntemleri ile ilgili, yapılan deneysel çalışmaları incelemişler ve literatürel olarak, kapsamlı bir şekilde sunmuşlardır. Bu çalışmalarda, yüksek sertlikteki malzemeleri işlerken, çok sayıda soğutma yöntemi uygulandığını bize göstermişlerdir. Performansı belirlemek için, sert tornalama işlemlerinde, daha çok takım aşınması veya takım ömrü ve en önemlisi, yüzey pürüzlülüğünün önem kazandığı çıkarımında bulunmuşlardır. Yaptıkları kapsamlı incelemede, takım ömrünü ve işlenirken oluşan ısı miktarını düşürmek için, soğutma sıvılarının kullanımının, çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Tornalama işlemleri için, iş parçası olarak dökme demir, çelik ve çelik alaşımları kullanıldığında, kesme sıvısının kullanılmayabileceğini ve alüminyumun alaşımlarının ise, istisnai bir şekilde kesme sıvılarının kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Soğutma yöntemleri arasında, kriyojenik soğutma ile yapılan işlemin, diğerlerine göre daha iyi performans sunduğunu belirtmişlerdir. Yine çevreyi korumak için kuru tornalama veya minimum miktarda yağlama tekniğini kullanılmasının önemli olduğu çıkarımında bulunmuşlardır. Diğer yenilikçi metodlar arasındaki, yüksek takım ömrü sunabilen basınçlı tornalama yönteminin ise, basınç artışı ile sağlanabildiğini belirtmişlerdir [66].

Çetindağ vd. yaptıkları çalışma ile, 64 HRC sertliğindeki AISI 52100 çeliğini, iki farklı CBN takımla (geleneksel, silici) tornalamışlardır. Malzemeyi işlerken, yeni bir hibrit soğutma tekniği olan, CryoMQL kullanmışlar ve böylelikle, çevre dostu işleme yöntemi uygulamayı amaçlamışlardır. Kuru kesme koşulunda dahil beş farklı kesme koşulu kullanarak, yeni soğutma yönteminin performansını karşılaştırma şansı bulmuşlardır. Deneyleri sabit ilerleme, sabit kesme hızında ve sabit kesme derinliğinde gerçekleştirmişlerdir. Belirledikleri performans ölçüm parametreleri ise ortalama yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, ve artık gerilmeler olmuştur. Deney sonuçlarını incelediklerinde, bu yeni hibrit yöntem ile birlikte, silici uçların kullanımı ile, yüzey pürüzlülüğünün çok düşük seviyelerde çıktığını analiz etmişlerdir. Son olarak kullandıkları bu çevre dostu yöntemle, yüzey kalitesinin artırılabilirdiği, takım aşınmasının minimumda tutulabilirdiği ve yüksek basınçta gerilmeler sağlanabilirdiği sonucuna varmışlardır [67].

Varadarajan vd., sert tornalama esnasında, kesme sıvılarının kullanımını minimum seviyede tuttıkları kesme tekniğini uygulayarak, çevre korumasına üst düzey katkı sağlamayı amaçlamışlardır. Minimum miktarda yağlama yaparak, 2 ml/dk gibi düşük bir hızda kesme sıvısı uygulamışlardır. Bu tekniğin, kuru ve geleneksel tornalamaya alternatif bir yöntem olduğunu ve hatta çevreye zararının önemsenmeyecek kadar az olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yaptıkları üç farklı kesme ortamındaki, ayrıntılı karşılaştırmalı incelemede; minimum kesme sıvısı kullanımı ile, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti performanslarının diğer iki yöntemle göre çok daha iyi olduğunu göstermişlerdir [68].

Urresti vd., 64 HRC sertliğindeki AISI 52100 çeliğini CBN takımla işlemişlerdir. Yaptıkları deneylerde, sert tornalama için hem kuru kesme koşullarında hem de çevre dostu bir kesme koşulu sağlayan CO<sub>2</sub> destekli kriyojenik soğutma yöntemi ile, deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kriyojenik soğutma şartlarında kullandıkları takımın, çok daha düşük sıcaklıklara maruz kaldığı için kuru kesme şartlarına göre, takım aşınmasının çok daha geç gerçekleştiğini belirtmişlerdir [69].

Mallick vd., AISI D2 çeliği üzerinde, 7 farklı tip kesme takımı kullanmışlar ve 5 farklı soğutma tekniği uygulayarak, sert tornalama deneyleri yapmışlardır. Çıktı parametresi olarak 5 farklı parametre belirlemişlerdir. Uygun takım geometrileri, takım malzemeleri ve soğutma şartlarında, kesme hızının 250 m/dak ve üzerine çıkarılabileceğini belirtmişlerdir. Kullanılan soğutucu sıvılarının dışında, daha yenilikçi yöntemler ve farklı soğutucularla (nanoakışkan ve iyonik sıvı gibi kombinasyonların) detaylandırılmasının, sonraki çalışmalar için önemli olabileceğini belirtmişlerdir [70].

Kumar ve Gandotra yaptıkları çalışmada, 45 HRC sertliğindeki AISI 4340 çelik malzemeye, sert tornalama işlemi uygulamışlardır ve bu işlem esnasında, vortex tüpü ile üretilen 1500 Btu/h soğurma kapasitesine sahip soğutma havasının etkisini incelemek için kuru, ıslak ve MQL kesme koşullarını da dahil ederek, bu deneyleri soğutma havası ile karşılaştırmışlardır. Soğutma havası ile işlenen malzemenin, diğer kesme koşullarında işlenen malzemelere göre, yüzey pürüzlülüğünde, kesme kuvvetinde ve yan takım aşınmasında önemli seviyede azalma oluştuğunu ifade

etmişlerdir. Soğutucu kullanılmayan deneylerde, takım ömrünün % 112,25 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. [71]

Mohrni vd. yaptıkları çalışmada, 62 HRC sertliğindeki AISI D2 çeliğini, CBN takım ile kuru kesme koşullarında tormalamışlar, farklı kesme hızı ve ilerleme miktarı üzerinde yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Deney sonuçlarını incelediklerinde yüksek kesme hızlarında ve düşük ilerleme değerlerinde çok daha iyi kalitede yüzeyler (pürüzsüz) elde ettiklerini belirtmişlerdir ve optimum yüzey pürüzlülük değerine 0,267  $\mu\text{m}$  değeri ile ulaşmışlardır. Oluşturdukları iki farklı tahmin modelinden (doğrusal ve ikinci dereceden) sadece ikinci dereceden modelin, deney sonuçları ile uyum halinde olduğu sonucuna varmışlardır [72].

Mia ve Dhar, 3 farklı sertlik değerindeki (40 HRC, 48 HRC, 56 HRC) AISI 1060 çeliğini 4 farklı kesme hızı, 4 farklı ilerleme oranı, kuru ve yüksek basınçlı kesme sıvısı kullanım koşullarında tormalamışlardır. Yüzey pürüzlülük tahmini, tepki yüzey metodolojisi ve destek vektör regresyonu kullanılarak analizlerde bulunmuşlardır. Yaptıkları ANOVA analizine göre, yüzey pürüzlülük üzerinde en etkili parametrenin her iki kesme koşulundada (kuru ve basınçlı soğutma sıvısı) sertlik olduğunu ve sonraki etkiye ise ilerleme miktarının sahip olduğunu sunmuşlardır [73].

Abidi, 40 HRC sertliğindeki sertleştirilmiş C45 çeliğini, seramik (CC650) takım kullanarak, 3 farklı kesme hızında (V) ve 3 farklı ilerleme miktarında (f), tormalama testleri yapmıştır. Yüzey pürüzlülük, takım ömrü, takım aşınması ve işleme verimliliği ile birlikte, 4 farklı çıktı parametresi incelemiştir. Takım ömrü ve yüzey kalitesi bakımından sert tormalama işleminin, taşlamaya karşı çok rekabetçi bir performans sergilediğini kanıtlamıştır. Ayrıca takım ömrünün, yüksek kesme hızlarında 200 m/dak değerinden 280 m/dak değerine artması ile %40 oranında arttığını yaptığı analizde elde etmiştir ve takım aşınması üzerinde, kesme hızının ilerleme miktarından daha fazla etkilendiğini analiz etmiştir. Kesme hızının artışıyla, abrasif (aşındırıcı) aşınmanın, bir miktar adezif (yapıştırıcı) aşınmaya katkıda bulunduğunu ifade etmiştir. Kesme parametreleri (V, f) ile takım ömrü arasındaki ilişkiyi, çoklu ikinci dereceden bir matematiksel model oluşturarak kanıtlamıştır ve

tahmini matematiksel model ile gerçek deney sonuçlarının, uyum içerisinde olduğunu göstermiştir [74].

Ahmed vd., AISI 201 paslanmaz çeliği, sementite karbür takım ile tormalamışlardır ve tormalama esnasındaki girdi parametrelerinin, kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kesme parametresi olarak seçilen klasik üç parametre (N-a-f) ile birlikte, iş parçası çapını da giriş parametresi olarak seçmişlerdir. Taguchi L 16 dizinini (dört faktör ve dört seviye) deney tasarım modeli olarak tercih etmişlerdir, ANOVA ve regresyon analizi yapmışlardır. Tüm kesme kuvveti bileşenlerinin, kesme derinliğinden etkilendiğini analiz etmişlerdir. İlerleme miktarının ise, aksel ve teğetsel kuvvet üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve sonrasında daha düşük değerlerde radyal kuvvetinden etkilendiğini belirlemişlerdir. Regresyon analizi için kullandıkları  $R^2$  determinasyon katsayı değerleri, tüm kesme kuvveti bileşenleri için tatmin edici yüzdeler (% 92,31 - % 90,96 - % 86,89 ) vermiştir. Ayrıca, düşük çaptaki iş parçası ve düşük kesme derinliği seviyeleri için tüm kesme kuvveti bileşenlerinin düşme eğiliminde olduğunu analiz etmişlerdir [75].

Özlü yaptığı çalışmada sertleştirilmiş sleipner soğuk iş takım çeliğini, sabit bir kesme derinliği, beş farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarı belirleyerek, tormalama deneylerine tabi tutmuştur. Bu girdi parametrelerinin, işleme esnasında oluşan yüzey pürüzlülüğü, talaş şekli, kesme kuvveti bileşenleri ve takım aşınma değerlerine etkilerini incelemiştir. Düşük ilerleme miktarı seviyesinde düşük kesme kuvveti oluştuğunu ve yüksek kesme hızlarında ise sadece esas kesme kuvveti olan  $F_c$ 'nin düşük değerler temsil ettiğini göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğünden etkilenen en önemli parametreyi ilerleme miktarı olarak analiz etmiştir ve kesme hızında sonrasında etkili olan parametre olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, minimum yüzey pürüzlülüğü için, düşük kesme parametre değerleri tercih edilmesini gerektiğini analiz etmiştir. Son olarak, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme miktarı seviyesi için talaş şekli, çok iyi bir şekilde, spiral tip olarak elde edildiğini göstermiştir [76].

Literatürde yapılan son eklemeler ile, geniş uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü için daha avantajlı olduğunu ve çok daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [77,78]. Nouioua vd., üç farklı takım uç yarıçapı ile deneyler yapmışlardır. Geniş uç

yarıçapının düşük yüzey pürüzlülük değeri verdiğini analiz etmişlerdir [44]. Buna karşılık, Umamaheswarrao vd., takım uç yarıçapının, çıktı parametreleri belirlemede en etkili parametre olduğu sonucuna varmışlardır. Üç farklı takım uç yarıçapı (0,4- 0,8- 1,2) ile deneyler yapmışlardır ve 0,8 mm takım uç yarıçapına sahip ucun optimum sonuçlar sağladığını belirtmişlerdir [36]. Panda vd. yaptıkları deneysel çalışmada, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin takım uç yarıçapı olduğu sonucuna varmışlardır [79]. Ek olarak, yapılan çalışmalar takım uç yarıçapının 1 mm'nin altında olması koşuluyla, özellikle 0,05'ten düşük ilerleme oranı için, yüzey pürüzlülüğünün, minimum kesilmemiş talaş kalınlığına (MUCT), bağlı olduğunu belirtmişlerdir [80,81].

Rafighi vd., kuru kesme koşulları altında, yaklaşık 60 HRC sertliğindeki AISI D2 takım çeliğine, 0,8 mm ve 1,2 mm takım uç yarıçapına sahip, seramik ve CBN takımlarla tornalama işlemleri uygulamışlardır. Girdi parametresi olarak kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme miktarını seçmişlerdir. Yanıt değişkenlerini ise yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti olarak belirlemişlerdir. Taguchi yöntemini deney tasarımı için, RSM yöntemini ise girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkileri belirlemek için kullanmışlardır. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre, yüzey kalitesinin, ilerleme miktarından çok yüksek seviyede etkilendiğini ve takım uç yarıçapında, etkilenen ikinci parametre değeri olduğunu, analiz etmişlerdir. Kesme kuvveti üzerinde ise, en etkili olan parametreyi, kesici takım olarak analiz etmişlerdir. CBN takım ile yapılan deneylerde, çok daha yüksek kesme kuvveti bileşenleri elde edildiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, yapay sinir ağları ile yapılan analizin, RSM yöntemine göre, çok daha iyi sonuçlar verdiğini yüzdeler olarak göstermişlerdir [82].

Özdemir vd., 36CrNiMo4 alaşım çeliğini tornalamışlar, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülük (Ra) ve ana kesme kuvveti (Fc) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sabit bir kesme hızında (150 m/dak) üç farklı takım uç yarıçapı (0,4mm 0,8mm 1,2mm), 3 farklı ilerleme oranı ve 3 farklı talaş derinliğini işleme parametreleri olarak seçmişlerdir. Taguchi L9 deney tasarımı ile varyans analizi (ANOVA) kullanarak deney sonuçlarını analiz etmişlerdir. İyi bir yüzey kalitesi için;

düşük ilerleme, yüksek talaş derinliği ve 0,8 mm değerine sahip takım uç yarıçapı gerektiği sonucuna varmışlardır [83].

Adonna ve Raykar, CNC tornada 55 HRC sertliğindeki OHNS çeliğini bir dizi tornalama işlemi yaparak incelemişlerdir. Kesme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. İki farklı takım uç yarıçapı (0,8mm 1,2mm) kullanmışlardır. büyük takım uç yarıçapı (1,2 mm), düşük ilerleme ve düşük talaş derinliğinin optimum yüzey pürüzlülük çıktısı verdiğini analiz etmişlerdir [84].

Bagga vd., AISI 1060 çeliğini CNC tornada, sementite karbür takım kullanarak işlemişlerdir. Yapmış oldukları deneyler için, 3 farklı kesme parametresi belirlemişlerdir ve taguchi L9 deney tasarımını kullanmışlardır. Her bir deney için takım aşınma değerlerini hem klasik istatistiksel yöntemle hem de dijital görüntü işleme teknikleri ile karşılaştırmışlardır. Görüntü işleme tekniğinin çok daha pratik olduğunu ve takım aşınması ölçümü ve izlenmesini otomatikleştirdiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları analizde, manuel ölçüm ve görüntü işleme yazılımı arasında oluşan, minimum ve maksimum farkın yaklaşık % 1 ve % 5 oranında olduğunu belirtmişlerdir [85].

Khatai vd., 56 HRC sertliğindeki EN 31 rulman çeliğini, AlTiN-PVD kaplı kesici uç kullanarak sert tornalamışlardır ve takım aşınma ile talaş deseni oluşumu hakkında kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde, 3 farklı kesme parametresi belirlemişlerdir ve bu parametreleri Taguchi L16 deney dizaynı ile modellemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada uçların aşınmasını düşük seviyede tutmak için, soğutma sıvısı kullanmışlardır. Deney bitiminde, takımın minimum yan aşınma genişliği 0,025 mm ve maksimum yan aşınma genişliği 0,065 mm olarak ölçmüşlerdir. Düşük aşınma değerlerinin, düşük kesme hızı ve düşük kesme derinliğinde gerçekleştiğini analiz etmişlerdir. Ayrıca tüm deneylerde, talaş şekillerinin uzun ve sarmal bir biçimde çıktığını göstermişlerdir. Sadece yüksek kesme hız seviyesinde (240 m/dk) mavi renkte talaşların çıkmasının da yüksek sıcaklıklara maruz kalındığının göstergesi olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları bu çalışma sayesinde, sert tornalama için, kullanılan takım ve geleneksel soğutma

yönteminin, diğer pahalı takımlara göre alternatif bir çözüm olduğunu vurgulamışlardır. [86]

Meddour vd., 59 HRC sertliğindeki AISI 52100 çelik malzemeyi 3 farklı kesme hızı, 3 farklı kesme derinliği 3 farklı ilerleme oranı ve 3 farklı takım uç yarıçapı (0,8mm 1,2mm 1,6mm) değerlerini seçerek, 30 adet tornalama deneyi modellemişlerdir. Modellenen deneyleri, kesme kuvveti bileşenleri ( $F_x, F_y, F_z$ ) ve yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) açısından değerlendirmişlerdir. Yaptıkları ANOVA analizinde, kesme derinliğinin, kuvvet bileşenlerini belirlemede en yüksek etkiye sahip olduğunu ve takım uç yarıçapının sadece itme kuvveti ( $F_y$ ) üzerinde bir etkisi olduğunu analiz etmişlerdir. En iyi yüzey kalitesi için düşük ilerleme ve büyük takım uç yarıçapının gerektiğini bildirmişlerdir [87].

Khan ve Bhivsane yaptıkları deneysel çalışmada, 50 HRC sertliğine kadar sertleştirilmiş AISI 4340 çeliği, CBN takımla, Taguchi L9 Deney dizaynını kullanarak tornalamışlardır ve işlenen parçanın yüzey pürüzlülüğünü detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Takım uç yarıçapı, talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme miktarını, girdi parametresi olarak belirlemişlerdir. En çok takım uç yarıçapı ve kesme hızı değerlerinden, yüzey pürüzlülüğünün etkilendiğini belirtmişlerdir [88].

Patel ve Gandhi, AISI D2 çeliği CBN takım kullanarak, farklı kesme parametreleri belirlemişler ve tornalama deneyleri yapmışlardır. Bu kesme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları analizlerde, en etkili parametre, ilerleme miktarı olmasına rağmen, kesme kuvveti ve takım uç yarıçapında etkili parametreler olduğunu sunmuşlardır. Ayrıca, yüzey pürüzlülük değerini, ilerleme miktarını azaltarak düşüreceklerini belirtmişlerdir [35]. Umamaheswarrao vd., AISI 52100 malzemeyi PCBN takım ile tornalamışlar ve farklı kesme parametrelerinde, yüzey pürüzlülüğü, yüzey sıcaklığı ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları analizde takım uç yarıçapının çıktı parametrelerini belirlemede en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. [36].

Kumar vd. yaptıkları çalışmada, EN 353 alaşımlı çeliği, sermet kesici uçlar ile, 4 farklı girdi faktörü belirleyerek tornalama deneyleri yapmışlardır. Kesme faktörleri

ile takım uç yarıçapı arasındaki etkileşimler üzerinde durularak, çıktı parametresi olan enerji verimliliğini incelemişlerdir. Çalışmada, taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyon ve RSM kullanılarak modelleme yapmışlardır. Girdi faktörleri yüksek seviyelerde ve takım uç yarıçapı değeri orta seviyede, enerji verimliliğinin optimum değerlere ulaştığını belirlemişlerdir. ANOVA sonuçlarına bakıldığında çıktı değişkeni üzerinde en etkili parametrenin kesme derinliği olduğunu analiz etmişlerdir. İlerleme miktarının hatırı sayılır bir etkisinin olmadığı, buna rağmen kesme derinliğinden sonra kesme hızı ve takım uç yarıçapının da enerji verimliliğinden etkilendiğini analiz etmişlerdir [89].

Yousefi ve Zohoor, sert tornalama için uygun olan, 3 farklı takım uç yarıçaplı (0,04-0,08-0,12) aynı cins CBN takımları kullanarak, 55 HRC sertlik değerindeki MDN250 çeliğini işlemişlerdir. Çıktı parametreleri olarak kullandıkları, yüzey pürüzlülüğüne, boyutsal doğruluğa, takım aşınmasına, kesme kuvvetlerine ve titreşim değişim miktarlarına bakarak analizler yapmışlardır. Kesme faktörü olarak ise, talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme miktarını çok geniş aralıklar seçerek incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülük üzerinde, en etkili parametreyi ilerleme miktarı ve sonrasında ise takım uç yarıçapı olarak analiz etmişlerdir. İlerleme miktarınının artması ile yüzey kalitesinin önemli oranda düştüğünü göstermişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının, 1,2 mm'lik büyük takım uç yarıçapı değerinde iyi sonuçlar verdiğini elde etmişlerdir. Boyutsal doğruluk için, düşük kesme hızı ve yüksek ilerleme miktarına ihtiyaç olduğunu, tam tersi şekilde yüzey pürüzlülüğü için ise düşük ilerleme miktarı ve yüksek kesme hızı gerektiğini belirtmişlerdir. CBN takımlarla, diğer karbür ve seramik takımlara oranla çok daha yüksek kesme hızları ve kalın talaş derinliği değerleri kullanılabileceğini ve yüzey kalitesinin çok daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [90].

Son araştırmalar, işleme sırasında sesin kesme koşulları hakkında önemli bilgiler sunduğunu göstermektedir [91]. Deneyimli operatörler tarafından pratik bir ölçüm ögesi olarak kullanılan ses şiddeti seviyesi, talaş kaldırma işleminin daha iyi anlaşılması için alternatif bir ölçüm yöntemi olmuştur. Hem Şahinnoğlu ve Rafiği hem de Çakır yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra ses yoğunluğunu da inceledi. Her iki çalışmada da ses şiddeti seviyesi için, kesme hızı ve kesme derinliğinin en etkili



parametreler olduğu belirtilmiştir [92,93]. Ayrıca ses şiddeti seviyesi ölçümleri, çalışanların yüksek gürültüye maruz kalma durumlarının belirlenmesinde önemli bir ölçme yöntemi olmuştur.

Papandrea vd., AISI 5210 çeliğinin tornalanması esnasında, farklı kesme koşullarında yaydığı, duyulabilir ses enerjisi sinyallerini ve yüzey pürüzlülüklerini incelemişlerdir. İşleme süresine ara vermeden, yayılan duyulabilir ses enerjisi sinyalleri ile, elde edilen yüzey kalitesi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Her iki çıktı parametresinin, malzeme kaldırma oranı (MRR) ile, güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu analiz etmişlerdir. Bu sonuçların, anlık olarak ölçülemeyen yüzey pürüzlülüğünün alternatifi olarak, akustik sinyal parametrelerinin, sert tornalama işlemlerinin anlık izlenmesi için kullanılabilirliğini, kanıtlar nitelikte olduğunu belirtmişlerdir [94].

Yapılan çalışmalar, torna tezgahının çektiği elektrik akımına bakarak kesme kuvvetleri hakkında fikir sahibi olabileceğimizi göstermişlerdir. [93,95]. Salgado vd. AISI 1025 alaşımsız karbon çeliği ile alaşımlı alüminyum tip malzemeleri, 2 farklı takım uç yarıçaplık kaplamalı karbür takımlar ile işlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada, tahmini bir takım aşınma modeli oluşturmuşlardır. Kesme hızı ve ilerleme miktarını değiştirerek, takım aşınma ve kesme kuvvetlerini tahmin edebilecekleri bir model oluşturmuşlardır. Bu tahmin modelini alternatif bir ölçme yöntemi olan, tezgahın ilerleme motorunun çektiği elektrik akımını ölçerek oluşturmuşlardır. Bu konunun maliyetleri azaltmak ve zamandan tasarruf açısından çok önemli olduğunu belirtmişlerdir [96].

Marani vd., CNC tornada işlem sırasında, ilerleme motorunun elektrik akım değerini ölçerek, takım yan aşınma miktarını tahmin etmek için incelemelerde bulunmuşlardır. Bunu yaparken, kullandıkları malzemedan 36 paso kaldırmışlardır ve dörder aralıklarla, toplam 9 pasoyu göz önüne alarak, 36 adet akım sinyali ölçmüşlerdir. Takım aşınma değerlerini belirli kriterlere göre sıralamışlardır (başlangıç-işlenebilir-körelmiş). Yani farklı takım koşullarında deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmada uzun kısa süreli bellek (LSTM) modellemesini

kullanmışlardır. Deney sonuçlarını, tahmin modeliyle karşılaştırdıklarında, yüksek doğrulukla tahmin modelinin uyum sağladığını belirtmişlerdir [97].

Rastorguev ve Sevastyanov, CNC torna tezgahında, 55 HRC sertliğindeki 105WCr6 malzemeyi 3 farklı kesme parametresi belirleyerek işlemişlerdir. Kesme hızından bağımsız bir şekilde, yüksek seviyede talaş derinliği ve ilerleme miktarı ile yüzeyde hareler görüldüğünü belirtmişlerdir. Yüksek kesme hızının yanı sıra, düşük talaş derinliği ve ilerleme miktarının yüzeyin kalitesini iyileştirdiğini göstermişlerdir. Son olarak yaptıkları analizde, elektrik akım değeri ve yüzey kalitesi arasında bir ilişki olduğunu sunmuşlardır. Torna tezgahının çektiği elektrik akımına bakarak kesme kuvvetleri hakkında fikir sahibi olabileceğimizi göstermişlerdir. Böylelikle, kesme kuvveti gibi zor bir ölçüm yöntemi yerine, elektrik akımının ölçülmesi, alternatif bir ölçüm yöntemi olarak kabul görmüştür [95].

Punhsingon vd. ST40 çeliğini, kuru ve yaş ortam koşullarında tornalamışlardır. Elektrik akım ve yüzey pürüzlülüğünü çıktı parametresi olarak seçmişlerdir. 3 farklı kesme parametresi ve bu değerleri 3 seviye olarak belirlemişlerdir. Hem elektrik akımı, hem de yüzey pürüzlülüğü için, ilerleme miktarının en etkili parametre olduğunu analiz etmişlerdir [98].

Üretimin olmazsa olmazlarından, gelişen teknoloji ve artan nüfus kaçınılmaz olarak üretimin artmasına ve enerji kaynaklarının azalmasına yol açmakta ve bu da, küresel enerji kaynaklarının 50 yıllık rezervi olduğu tahmin edildiğinde, enerji sorunlarına yol açmaktadır. Bu nedenle enerji verimli kullanılmalıdır. Uygun kesme parametrelerinin seçilmesi, verimli enerji kullanımında önemli bir faktördür. Yani kesme parametreleri ve değerleri optimize edilerek, makinenin tükettiği güce ve çektiği akım değerlerine bakılarak enerji tüketim seviyeleri iyileştirilebilmektedir [43,99]. Negrete ve Nájere, AISI 1045 çeliğini, kuru işleme koşullarında işlemişlerdir. Farklı kesme parametrelerinde enerji tüketimi, işleme süresi, talaş kaldırma oranı, özgül enerji, yüzey pürüzlülük değerlerinin çıktılarını incelemişlerdir ve minimum enerji kullanımı için optimum kesme parametrelerini elde etmişlerdir [100]. Velchev vd., sundukları enerji tüketim modelinde en etkili parametrelerin ilerleme hızı ve kesme derinliği olduğunu belirtmişlerdir [101].

Kumar vd., spesifik enerji tüketimi ile ilgili bibliyometrik bir çalışma yapmışlardır. Bu konu ile ilgili 2001'den 2020'ye kadar Scopus'ta yayınlanan 268 çalışmayı VOSviewer 1.1.16 ve Biblioshiny 2.0 yazılımları ile incelemişlerdir. Yaptıkları analiz sonuçları ile, en performanslı yazarlara, kaynaklara, makalelere ve hatta ülke ve kuruluşlara kadar değinmişlerdir. Yine bu çalışmada, spesifik enerji tüketimi ile birlikte hangi çıktı parametrelerinin tercih edildiğini göstermişlerdir ve bununla ilgili çeşitli sonuçlara varmışlardır. Ayrıca bu konu ile ilgili çok fazla alanda araştırma potansiyeli olduğunu göstermişlerdir. Gelecekte bu konu ile ilgili çalışacaklar için, bu makalenin çok önemli kaynaklardan biri olacağını belirtmişlerdir [102].

İmalat endüstrisinde, metalleri işleme esnasında kullanılan kesici takımlar, çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadır ve bu kesici takımlar, plansız bir şekilde kullanıldığında her açıdan olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu yüzden son yıllarda pek çok araştırmacı, ürün kalitesini artırmak, kesici takım maliyetlerini düşürmek ve enerji tüketimini en aza indirmek için çeşitli optimizasyon yöntemleri ve modellemeler üzerinde çok yoğun durmuşlardır. Bu çalışmalar incelendiğinde; optimum kesme parametreleri, varyans analizleri ve tahmini matematiksel modellemeler en çok ilgi uyandıran konular olmuştur. [103–105]. Sert tornalama işlemi için araştırmacılar tarafından çeşitli optimizasyon yöntemleri (RSM, Taguchi, yapay sinir ağları, genetik algoritma ve parçacık sürüsü optimizasyonu) kullanılmıştır [61,106,107].

Literatürde yer alan bazı çalışmalardaki, girdi faktörleri, çıktı parametreleri ve tahmin modelleri Çizelge 2.3.'te sunulmuştur.

Çizelge 2.3. Literatürdeki örnek girdi ve çıktı parametreleri ve tahmin modelleri.

<b>Girdi faktörleri</b>	<b>Modeller</b>	<b>Çıktı parametreleri</b>	<b>Referans</b>
Kesme parametreleri	RSM	Takım aşınması Kesme basıncı	[26]
Kesme parametreleri Takım uç yarıçapı	RSM	Yüzey pürüzlülük Takım aşınması	[24]
Kesme parametreleri Çeşitli kesme sıvısı şartları	RSM	Yüzey pürüzlülük Kesme kuvveti	[29]
Kesme parametreleri Takım uç yarıçapı Çeşitli kesme sıvısı şartları	RSM, ANN	Yüzey pürüzlülük Kesme kuvveti	[44]
Kesme parametreleri İş malzemesi sertliği Takım geometrisi	RSM, ANN	Yüzey pürüzlülük Takım titreşimi	[108]
Kesme parametreleri İş malzemesi sertliği Çeşitli kesme sıvısı şartları	RSM, SVR, GA	Yüzey pürüzlülük	[73]
Kesme parametreleri Çeşitli kesme takımları	RSM	Yüzey pürüzlülük Kesme kuvveti	[32]
Kesme parametreleri İşleme süresi Çeşitli kesme sıvısı şartları	RSM	Yüzey pürüzlülük Takım aşınması	[37,40]
Kesme parametreleri İş malzemesi sertliği	Taguchi	Yüzey pürüzlülük	[11]
Kesme parametreleri İşleme süresi	RSM	Yüzey pürüzlülük Takım aşınması Kesme kuvveti	[109]
Kesme parametreleri	RSM, ANN	Yüzey pürüzlülük	[110]
Kesme parametreleri Takım uç yarıçapı Çeşitli kesme takımları	RSM	Yüzey pürüzlülük Kesme kuvveti	[42,111]
Kesme parametreleri Farklı takım kenar açıları	TOPSİS	Yüzey pürüzlülük Güç tüketimi Ses şiddeti Yüzey pürüzlülük İşleme süresi	[112]
Kesme parametreleri	RSM	Yüzey pürüzlülük Elektrik akımı Ses şiddeti	[93]
Kesme parametreleri	RSM	Yüzey pürüzlülük Güç tüketimi Malzeme kaldırma oranı İşleme süresi	[100]
Kesme parametreleri	RSM	Takım aşınması Takım ömrü	[23]
Kesme parametreleri, Takım uç yarıçapı Çeşitli kesme takımları Kesme açısı	RSM	Yüzey pürüzlülük Kesme kuvveti Takım aşınması	[41]

Mia ve Dhar, kuru kesme koşullarında, sabit bir kesme derinliğinde, 3 farklı sertlikteki (40 HRC- 48 HRC- 56 HRC) AISI 1060 çelik malzemeyi tornalamışlar ve çıktı parametresi olarak, yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Yaptıkları ANOVA analizi ile mazleme sertliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olduğunu ve sonrasında ilerleme miktarı ve kesme hızının sertlik miktarını takip ettiğini sunmuşlardır. Kullandıkları 3 farklı tahmin modelinin (RSM, FL, SA), yüksek doğruluk oranı sunmasından dolayı, imalat endüstrisinde kullanabileceğini öne sürmüşlerdir [113].

Serin vd., Ti6Al4V malzemeyi üç farklı kesme parametresi kullanarak CNC torna tezgahında işlemişlerdir. Deney çıktısı olarak, yüzey pürüzlülüğü ile özgül kesme enerjisi arasındaki etkiyi incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü için, en etkili parametreleri, sırasıyla ilerleme miktarı ve kesme derinliği olarak elde etmişlerdir. Özgül kesme enerjisi üzerinde, en etkili parametreyi ise kesme derinliği olarak ve sonrasında, ilerleme ve kesme hızında özgül kesme enerjisinden etkilendiğini analiz etmişlerdir. Ayrıca her bir çıktı parametresi için yaptıkları analiz ile, optimum kesme parametre değerlerini hesaplamışlardır. Son olarak, tahmini bir şekilde oluşturulan yanıt yüzey yöntemi (RSM) ile yapay sinir ağları (ANN) modellerini karşılaştırmışlardır ve her iki çıktı parametresi için, ANN modelinin çok daha iyi performan sağladığını belirtmişlerdir. [114].

Paturi vd., AISI 52100 çeliğine, üç farklı kesme parametresinde (V, a, f) tornalama testleri uygulamışlardır. Ayrıca kuru işleme koşullarında ve üç farklı ıslak kesme ortamında (yağ bazlı emülgatör kesme sıvısı, soğutucu akışkan, MQL), gerçekleştirdikleri deneylerde meydana gelen, kesici takım aşınma sonuçlarını incelemişlerdir. Yapay sinir ağları (ANN) yöntemi kullanmışlardır. Tüm farklı kesme şartlarında, gerçek deney sonuçları ile tahmini ANN modeli arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve çok yüksek oranda modelin doğruluğunu yaptıkları analizde kanıtlamışlardır [110].

Su vd., AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemeyi tornalamışlardır. İşlem yapılan tezgâhın, tükettiği enerjiyi minimum seviyede tutup, ürün kalitesi ve işleme

hızını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu işlemi uygulamak için yanıt yüzey metoduna (RSM) ve gri ilişkisel analiz yöntemine dayanan çok amaçlı bir kesme parametreleri optimizasyon yöntemi kullanmışlardır. Çıktı parametresi olarak, özgül enerji tüketimi, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranını incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada, optimizasyondan önce, 3 faktör ve 5 seviye olarak belirlemiş oldukları kesme parametrelerini, Taguchi L25 ortogonal deney dizaynı ile modelleyerek, deneyler gerçekleştirmişlerdir. Sonrasında ise bu optimizasyon problemini, gri ilişkisel analiz kullanarak çok daha basit bir optimizasyon problemi haline getirmişlerdir. Kalite için, RSM yöntemi kullanarak regresyon modeli oluşturmuşlardır ve ayrıca bu yöntemle, optimum işleme parametrelerini belirlemişlerdir. En yüksek kesme hızı, en yüksek talaş derinliği ve en düşük ilerleme miktarı kombinasyonunu, optimum değerler olarak elde etmişlerdir. Tormalama deneylerindeki, optimum parametre değerleri ile en içteki çıktı parametre değerlerini yüzdeler olarak karşılaştırmışlardır ve optimizasyonda istenen düşük yüzey pürüzlülüğü (% 66,90 oranında düştü), düşük özgül enerji tüketimi (% 81,46 düştü) ve yüksek kaldırma oranını (% 8,82 azaldı) eş zamanlı olarak elde etmişlerdir [115].

## BÖLÜM 3

### TAKIM ÇELİKLERİ

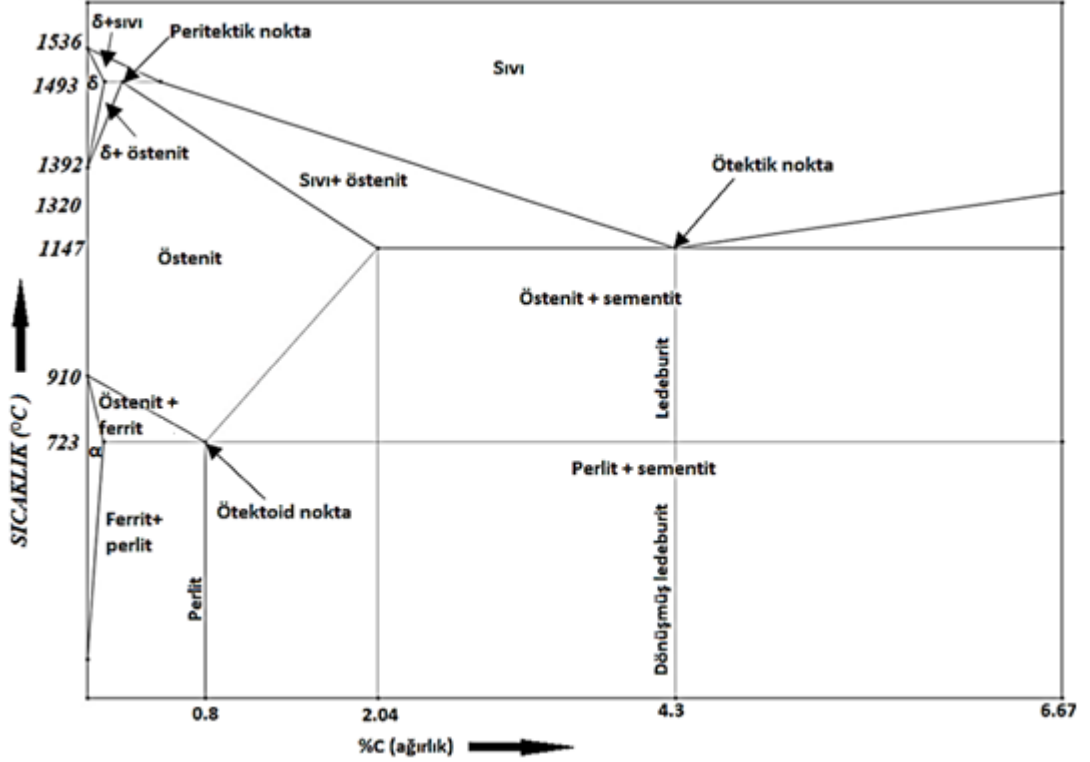
#### 3.1. TAKIM ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ

##### 3.1.1. Çelikler ve Genel Tanımları

En az biri metal olmak kaydıyla, en az iki elementin oluştuğu ayrılamayan birleşim, alaşım olarak tanımlanmaktadır. Çelikler ise, belirli oranlarda karbon içeren (% 0,02-1,7), % 1 oranına kadar Mangan, % 0,5 oranından düşük miktarda silisyum, % 0,05 oranından düşük miktarda fosfor ve kükürtten oluşan, demir karbon alaşımları olarak tanımlanmaktadır. Çeliğin sınıflandırılmasında en önemli etken, alaşımdaki karbon oranıdır [116]. Çelikler, sağlam ve ucuz olmasından ötürü, dünyada çok yaygın kullanılmaktadır. Ayrıca çeliklerin sınırsız bir şekilde geri dönüştürülebilir bir malzeme olması ve bu süreçte özelliğini yitirmemesi, sürdürülebilir bir üretim için, çok önemli katkılar sunmaktadır. Çelikler hayatımızın her alanında köprülerden, binalara, otomobillerden, boru hatlarına, çeşitli imalat ekipmanları ve aletlerine kadar, sanayinin içinde bulunduğu her alanda hayatımıza şekil vermekte ve her alanda ileriye gitmektedir [117].

Çeliğin içindeki sıcaklığa bağlı karbon oranının gösteren ve yapısal özellikleri anlamamız açısından çok önemli bir faz diyagramı olan, şekil 3.1'de gösterilen Fe-C denge diyagramında, yaklaşık % 2 oranında karbon içerebildiği görünse de, uygulamada % 1,7 karbon miktarlarına kadar ulaşabilmektedir. Çeliklerin içerisinde, % 0,30'dan az miktarda karbon bulunuyorsa düşük karbonlu, % 0,30 ile % 0,60 arasında karbon var ise orta karbonlu ve son olarak % 0,60 ile % 2 arasında karbon bulunmakta ise yüksek karbonlu çelikler olarak, karbon miktarlarına göre sınıflandırmak mümkün olmaktadır. Normal şartlarda alaşımdaki karbon miktarı arttıkça, daha dayanıklı olan buna karşın gevrekleşen çelikler, ısıl işlem sayesinde yüksek sertlik değerlerine ulaşabilmektedirler. Böylelikle, aşınmaya karşı dirençli ve

takım malzemesi olarak kullanılabilir seviyede bir malzeme haline gelebilmektedirler [118].



Şekil 3.1. Fe-C denge diyagramı [119].

Çelikler, %1,7 oranlarına kadar veya daha düşük miktarda karbon (C) ihtiva edebilmektedir. Kullanılan uygun alaşımlama ve ısıl işleme, çok çeşitli üretim alanlarında, istenen özellikte çeliklere ulaşılabilir. Ayrıca, çeliğin istenmeyen element ve bileşimlerden uzaklaştırılması büyük önem arz etmektedir. Çizelge 3.1'de çeliğe olumlu açıdan önemli katkılar sağlayabilen, alaşım elementleri ve bu elementlerin özellikleri açıklanmıştır. Bazı elementlerin ise, analiz yapıldığında bulunması, olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu fayda sağlamayan elementler, mümkün olduğunca az miktarda olmalıdır. Bu elementlerden bazıları çelik içerisinde boşluklar ve hatalara sebebiyet vermektedir (O, H, N). Yine diğer bir element grubu (P, S, Se, As gibi) ise çeliğin iyi olan özelliklerini düşürmektedir. Yeni imalat yöntemleri sayesinde, işlenen çeliği bu gibi elementlerden uzaklaştırmak daha kolay hale gelmektedir [117].



Çizelge 3.1. Alaşım elementinin çeliğe kazandırdığı özellikler.

Karbon (C)	Çeliğe mekanik özellik bakımından en çok fayda sağlayan elementtir. Sünekliği düşürmesine rağmen aşınma dayanımı ve sertliği artırmaktadır.
Silisyum (Si)	% 0,3'e kadar tüm çeliklere ilave edilmektedir. Oksijen uzaklaştırıcı etkisi sayesinde, krom ve alüminyum ile birlikte oksidasyon dayanıklılığını artırır. Çeliğin esnekliğini, çok daha yüksek oranlarda kullanıldığında artırmaktadır.
Mangan (Mn)	Kükürdün zararlı etkilerini hafifletmektedir. Çekme dayanımı ve akma sınırını yükseltmektedir. Aşınma dayanımı ve sertleşebilirliği artırmaktadır.
Krom (Cr)	Çeliğe her % 1 miktarda krom takviyesi ile sertleşme kabiliyeti, aşınma dayanımı ve sıcaklığa karşı mukavemeti artırılmaktadır. % 12'nin üzerinde ilave edildiğinde su ve çeşitli asitlerin korozyon etkisine karşı mukavemet sağlamaktadır (Paslanmaz çelikler).
Molibden (Mo)	Yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarına yerleşip, tanelerin büyümesini engellemektedir. Çeliğin sertleşme yeteneğini, aşınma dayanımını ve sıcağa dayanıklılığını artırmaktadır. Isıl işlem ile (500-610 °C'de menevişleme) tokluk özelliğine sahip olan tüm takım çeliklerinde bu alaşım elementi bulunmaktadır (sıcak iş takım çelikleri ve yüksek hız çelikleri). Böylelikle takım çeliklerinde kesme özelliği iyileşmektedir.
Nikel (Ni)	Çok daha ince taneli bir yapı oluşturmaya fayda sağlar. Bu nedenle çeliğin parlatılabilme kabiliyetini artırmaktadır. Düşük sıcaklıklarda çeliklerin tokluğunu artırabildiğinden ötürü darbeli çalışılan takımlarda kullanılması uygun olmaktadır. Krom ile beraber korozyon direncini sağlamaktadırlar.
Wolfram (Tungsten) (W)	Molibdene benzer bir şekilde yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini engelleme yeteneğine sahiptirler.
Vanadyum (V)	Çeliklerde düşük oranlarda ihtiva olan bir alaşım elementidir. Oluşturduğu karbürler sayesinde, takım çeliklerinin sıcaklığa karşı dayanımını ve aşınma dayanımını (kesici özelliklerini) çok iyi duruma getirmektedir. Yüksek sıcaklıkta tanelerin çevresine yerleşip tane büyümesini önlemektedir. Yani çeliğin ince taneli olmasını sağlayarak toklaştırılmaktadır.
Kobalt (Co)	Yüksek sıcaklıklarda çeliğin dayanımını artırmaktadır ve çeliğin sertliğini koruyabilmesini sağlamaktadır. Özellikle sıcak iş takım çelikleri ve yüksek hız çeliklerinin önemli alaşım elementlerinden olmuştur. Kobalt alaşım elementinin, Isıl iletkenliğe çok önemli katkıları olmaktadır

### 3.1.2. Takım Çelikleri

Farklı alaşım elementlerinin kullanımı ile çelikler, birbirinden farklı özelliklere ve kullanım alanlarına sahip olabilmektedirler. Bu kullanım alanlarından biri olan takım çelikleri, başta takım tezgahlarının kalemleri olmak üzere, kalıplar gibi şekil veren malzemeler olarak kullanılmaktadırlar. Bu çelikler, hem talaşlı (tornalama, frezeleme, matkaplama, eğeleme) hemde soğuk ve sıcak işleme farketmeksizin talaşsız (dövme, basınçlı döküm, haddeleme, zımbalama, çekme gibi) şekil verilen takım ve kalıpların yapımında yoğun bir şekilde kullanılabilirler. Alaşım ve alaşımsız takım çelikleri piyasada kullanılmaktadır. Bunlardan alaşımsız takım çeliklerinde karbon oranı % 0,05 - 1,4 olarak, alaşım takım çeliklerinde ise bu oran % 0,3 - 0,6 aralığında değişmektedir. Alaşımsız takım çelikleri genel kesici takım aletlerinde, talaş kadıncı torna tezgahlarında ve ziraat-inşaat makinaların takımlarında kullanılmaktadır. Alaşım takım çelikleri, özel amaçla yapılmış, karbon ve alaşım oranı yüksek olan yüksek nitelikli çelik malzemelerdir. Örneğin DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliği için, EN normunda X38 CrMo5-1 kısa bir şekilde gösterilirken, başındaki X çeliğin çok yüksek miktarlarda alaşım içerdiğini göstermektedir. Ayrıca 38 çeliğin içerisindeki % 0,38 karbon ihtiva ettiğini, diğer 5 ve 1 sayısı ise çeliğin içerisinde % 5 krom ve % 1 molibden alaşım oranlarına sahip olduğunu göstermektedir [120].

Çizelge 3.2. Takım çelikleri grupları (AISI normunda simgesel gösterimleri) [118].

Simgeler	Takım çeliği cinsleri
W	Suda sertleşebilen sade karbonlu takım çelikleri
S	Şok dirençli soğuk iş takım çelikleri
O	Yağda sertleştirilebilen soğuk iş takım çelikleri
A	Havada sertleştirilebilen orta alaşım soğuk iş takım çelikleri
D	Yüksek karbon ve kromlu soğuk iş takım çelikleri
H	H10-19 Krom katkılı sıcak iş takım çelikleri
H	H20-26 Tungsten katkılı sıcak iş takım çelikleri
H	H41-43 Molibden katkılı sıcak iş takım çelikleri
T	Tungsten katkılı yüksek hız takım çelikleri
M	Molibden katkılı yüksek hız takım çelikleri
P	Kalıp çeliği
L	Düşük alaşım özel amaçlı takım çelikleri
F	Diğer (karbon - tungstenli) özel amaçlı takım çelikleri

Takım çeliklerinden, beklenen özellikler vardır. Takım çeliklerinden beklenen özellikler, ilave edilen alaşım elementleri (wolfram, vanadium, krom, molibden, mangan titan ve silisyum) ile sağlanmaktadır. Bu alaşımların ilave edilme oranı en çok % 18 olarak belirlenmiştir. Sertlikleri yüksek, aşınma dayanımı iyi, soğuk ve sıcak ortamlardaki işlenebilirlik yeteneği iyi (kırılmamalı, hemen şekil değiştirmemeli), korozyona dirençli, darbe ve titreşime karşı mukavemetli olması ve son olarak homojen mikroyapıya sahip olması beklenen en önemli özellikleri arasındadır. Takım çeliklerinin diğer gruptaki çeliklere oranla çalışma şartının çok daha ağır olmasına rağmen (soğuk ve sıcak ortamlarda, artırılan hız ve artırılan gerilmelerde mukavemetini kaybetmemesi), bu özellikler sayesinde sürekli bir şekilde aynı performansı sağlaması beklenmektedir [118].

Takım çelikleri, uygulama yapılan alana, ısıl işlem sıcaklık aralıklarına ve alaşımındaki element miktarlarına bakılarak çeşitli gruplara ayrılabilir. Takım çeliklerinin en genel sınıflandırılması, AISI normlarında kabul görmüş olan simgesel gösterimleri bulunan gruplandırma yöntemidir. Çizelge 3.2'de büyük harflerle gösterilen simgesel gösterimler ve karşısında takım çelik cinsi gruplar halinde sunulmuştur. Bu simgesel büyük harften sonra gelen sayı ise, aynı gruptaki takım çeliklerinin, sıra numarasını göstermektedir. Takım çeliklerinin, diğer alaşımlı çeliklere nazaran, işlenebilirlik yeteneği çok zor olmasına rağmen, talaşlı işleme sonrasında yüzey kalitesi çok iyi düzeyde olması, önemli özelliklerinden bir tanesidir. Bu tür çeliklerin işlenebilirliği, karbür ve alaşım miktarlarının artması ile doğru orantılı bir şekilde zorlaşmaktadır. Çünkü, alaşım ve karbon oranları artırıldığında, düşük tavalama sertliğine ulaşmak, çok daha zor olmaktadır. Karbonun, karbür oluşturuç alaşım elementleri ile bir arada bulunması, tavlama sonrası çözelti dışında oluşan fazla miktarda sert karbür parçacıkları, işlenebilirliğe olumsuz katkı sağlamaktadır [118].

Takım çeliklerini dört ana gruba ayırmak mümkündür. Soğuk ve sıcak iş takımlarının yanı sıra plastik kalıp çelikleri ve yüksek hız takım çelikleri şeklinde bir sınıflandırma ile takım çelikleri gruplandırılabilir [118].

### 3.1.2.1. Soğuk İş Takım Çelikleri

Soğuk iş takım çeliklerinin, diğer grup takım çeliklerine oranla, çok daha geniş kullanım alanları bulunmaktadır. İsminden de anlaşılacağı üzere, içeriğinde yüksek sıcaklıklarda sertliğini kaybetmemesi için kullanılan alaşım elementlerine ihtiyaç duymayan, takım çelikleridir. Bu yüzden, sürekli tekrarlı bir şekilde ısınma, soğuma gerektiren işlemler veya sürekli bir şekilde sıcaklığa maruz kalınan işlemlerde, kullanılması sınırlandırılmıştır. Soğuk iş takım çelikleri, 200 °C değerinden düşük sıcaklıklara sahip iş parçalarının işlenmesinde kullanılmaktadır. Cr, Mn, W, gibi elementler bu grup takım çeliklerinde, başlıca kullanılan alaşım elementleridir. Sıklıkla kullanıldığı alanlar, hassas zımbalar, kesme, bükme takım ve kalıpları, pres takımları, soğuk ekstrüzyon takımları imalat işleridir. Tüm takım çeliklerinde olduğu gibi, soğuk iş takım çeliklerinde de, iyi bir aşınma direnci ve yüksek mukavemet sağlanması, istenen en önemli özelliklerin başındadır. Ayrıca, kullanım alanları farklılaştıkça, işlenebilirlik kabiliyeti, tokluğu ve yorulma dirençleri gibi özellikleride, ayrı bir şekilde eklenebilmektedir. Bu tür takım çelikleri, sertleşme ortamlarındaki farklılıklara göre, üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; yağda sertleştirilebilen soğuk iş takım çelikleri (AISI normunda O grubunda), havada sertleştirilebilen, orta alaşımlı soğuk iş takım çelikleri (AISI normunda A grubunda) ve yüksek karbon ve yüksek krom içeriğine sahip soğuk iş takım çelikleri (AISI normunda D grubunda) şeklindedir [118].

### 3.1.2.2. Sıcak İş Takım Çelikleri

AISI normunda, sıcak iş takım çeliğinin ingilizcesinin (hot work) baş harfi H ile simgelenen ve soğuk iş takım çeliğinin tersine, genel olarak 200 °C'nin üstündeki çok yüksek sıcaklıklardaki uygulama alanlarında kullanılan takım çelikleridir. Bu takım çelikleri, yüksek sıcaklıklarda (400-750°C) mekanik özelliklerini (özellikle tokluklarını) ve sertliklerini kaybetmediği gibi, yüksek sıcaklıklarda delme, kesme, ve bükme gibi işlemlerde de kullanılması mümkün olmaktadır. Bir sıcak iş takım çeliğinin kalitesi, farklı ihtiyaçtaki işlere göre yüksek sıcaklıkta optimum özelliklere sahip olması ile orantılı olmaktadır. Yüksek sıcaklık şartlarında sertliğini kaybetmeyen, aşınmaya, ısıya ve darbelere karşı dayanımı yüksek olan sıcak iş takım çelikleri, bu özellikleri ile önemli bir yer tutmaktadır. Sıcak iş takım çelikleri;

kalıplar, krank biyel milleri, rulmanlarda ve civata somun yapımı başta olmak üzere mukavemet ve aşınma direnci yüksek yerlerde, önemli tercih nedeni olmuştur. İçerdiği ana alaşım elementleri sayesinde, tekrar eden sıcak şekillendirme işlemlerinde yumuşamaya olan direnci, yani sıcak sertliği optimum düzeyde sağlayabilmektedir [121].

Çizelge 3.3. Sıcak iş takım çelikleri sınıflandırılması (Standart: ASTM A681) [118].

Simgesi	Malzemenin kimyasal bileşimi								
	AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
<b>Krom esaslı sıcak iş takım çelikleri</b>									
H10	0,35-0,45	0,25-0,70	0,80-1,20	3,00-3,75	0,30 max	2,00-3,00	-	0,25-0,75	-
H11	0,33-0,43	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	0,30 max	1,10-1,60	-	0,30-0,60	-
H12	0,30-0,40	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	0,30 max	1,25-1,75	-	0,50 max	-
H13	0,32-0,45	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	0,30 max	1,10-1,75	-	0,80-1,20	-
H14	0,35-0,45	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	0,30 max	-	4,00-5,25	-	-
H19	0,32-0,45	0,20-0,50	0,20-0,50	4,00-4,75	0,30 max	0,30 max	3,75-4,50	1,75-2,20	4,00-4,50
<b>Tungsten esaslı sıcak iş takım çelikleri</b>									
H21	0,26-0,36	0,15-0,40	0,15-0,50	3,00-3,75	0,30 max	-	8,50-10,00	0,30-0,60	-
H22	0,30-0,40	0,15-0,40	0,15-0,40	1,75-3,75	0,30 max	-	10,00-11,75	0,25-0,50	-
H23	0,25-0,35	0,15-0,40	0,15-0,60	11,00-12,75	0,30 max	-	11,00-	0,75-1,25	-
H24	0,42-0,53	0,15-0,40	0,15-0,40	2,50-3,50	0,30 max	-	14,00-16,00	0,40-0,60	-
H25	0,22-0,32	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-4,50	0,30 max	-	14,00-16,00	0,40-0,60	-
H26	0,45-0,55	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-4,50	0,30 max	-	17,25-19,00	0,75-1,25	-
<b>Molibden esaslı sıcak iş takım çelikleri</b>									
H42	0,55-0,70	0,15-0,40	-	3,75-4,50	0,30 max	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	-

Sıcak iş takım çelikleri, ASTM A681 standardı kullanılarak, Çizelge 3.3'deki gibi AISI normunda sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırma ile, sıcak iş takım çeliği, içerdiği en yüksek alaşımın ismini almaktadır. Yani krom (H11-H19), molibden (H21-H26) ve tungsten (H41-43) esaslı olmasına göre üç farklı sıcak iş takım çeliği sınıflandırılmaktadır. Çizelge 3.3'de, sınıflandırılan sıcak iş takım çeliklerinin AISI normunda simgesel gösterimi, kimyasal bileşeninde bulunan alaşım elementleri ve bu alaşım elementlerinin kullanıldığı miktar aralıkları gösterilmiştir [118].

### **3.1.2.3. Yüksek Hız Çelikleri**

Adındanda anlaşılaçağı gibi, yüksek hız takım çelikleri, çok yüksek talaş kaldırma hızlarıyla çalışmaya elverişli çeliklerdir. Bu çelikler, yüksek kesme hızlarında çalıştıklarından, yüksek sıcaklığa karşı mukavemeti yüksektir. Ayrıca, aşınmaya karşı dirençli ve aşınma ömrü çok yüksek malzemelerdir. Tabi bu özelliklerin sağlanmasında, çeliğe uygun bir ısl işlem uygulaması ve ilave edilen alaşım elementi oranları ile mümkün olmaktadır. Ana alaşım elementi olarak % 4 ile % 5 oranlarında krom elementi kullanılan yüksek hız çeliklerinde, molibden, tungsten, vanadyum, titanyum ve silisyum kullanılabilir ve bu çelikler, yağda ve havada sertleştirilebilir. Kalıplar, kılavuz, freze çakıları, raybalar, vida tarakları, zimbalar gibi çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptirler. [118].

### **3.1.2.4. Plastik Kalıp Çelikleri**

Adındanda anlaşılacağı üzere, plastik kalıp çelikleri, plastik ham maddeyi şekillendirme amacı ile üretilen (ekstrüzyon, enjeksiyon ve şişirme uygulamalarında), plastiklere karşı aşınma direnci, korozyona direnci, parlatılabilirliği yüksek olan takım çelikleridir. Bu yüzden plastik üretiminde çok sıklıkla kullanılmaktadır [121].

## BÖLÜM 4

### İŞLENEBİLİRLİK VE SERT TORNALAMA

#### 4.1. İŞLENEBİLİRLİK

Metal endüstrisinde, üretilen malzemenin en son şekli talaş kaldırma işlemi ile verilmektedir. Bu işlemi etkileyen çeşitli unsurlar bulunmaktadır. Üretilen malzemenin, işleme parametrelerinin ve kesici takımların yanlış seçilmesi ile talaşlı imalat işlemleri çok fazla aksamaktadır. Bu nedenle malzeme istenildiği gibi işlenememekte, zaman boşa harcanmakta, kullanılan takımlar çabuk aşınmaktadır. Yani, çok fazla olumsuz işleme maruz kalınmaktadır. Bu yüzden işlenebilirlik, talaşlı imalat işlemlerinde ele alınması gereken en önemli konuların başında gelmektedir. İşlenebilirlik, kısaca farklı fiziksel özelliğe sahip malzemelerin, farklı kesme şartlarındaki, işlenebilme zorluğu veya kolaylığı, şeklinde tanımlanabilir. İşlenebilirliği kolay olan malzemeleri kesmek için ihtiyaç duyulan güç minimumdur, dolayısıyla işlenmiş yüzey kalitesi çok iyidir ve çok kolay işlenmektedir. Bir iş parçasının işlenebilirliği, işleme esnasında ele alınan parametrelerin ne kadar uyum içinde bulunduğu ile ilgilidir. İşlenebilirlik, iş parçasının metalürjik özelliklerine ve uygulanan ısıl işleme bağlı olmasının yanı sıra, ortam şartlarına, iş parçası üzerinde kesici takımın uyumuna, tezgâhın rijitliğine de bağlı olmaktadır. Ek olarak, takım aşınması oluşması, işlenebilirliği olumsuz etkileyen etmenlerden bir diğeridir ve yanlış seçilen parametrelerle takım ömrünü kısaltarak, olumsuz sonuçlara sebebiyet vermektedir. Üzerinde durulan bu parametreleri, optimize ederek işlenebilirliği iyileştirmek, yapılması gereken en önemli çözümlerin başında gelmektedir [122].

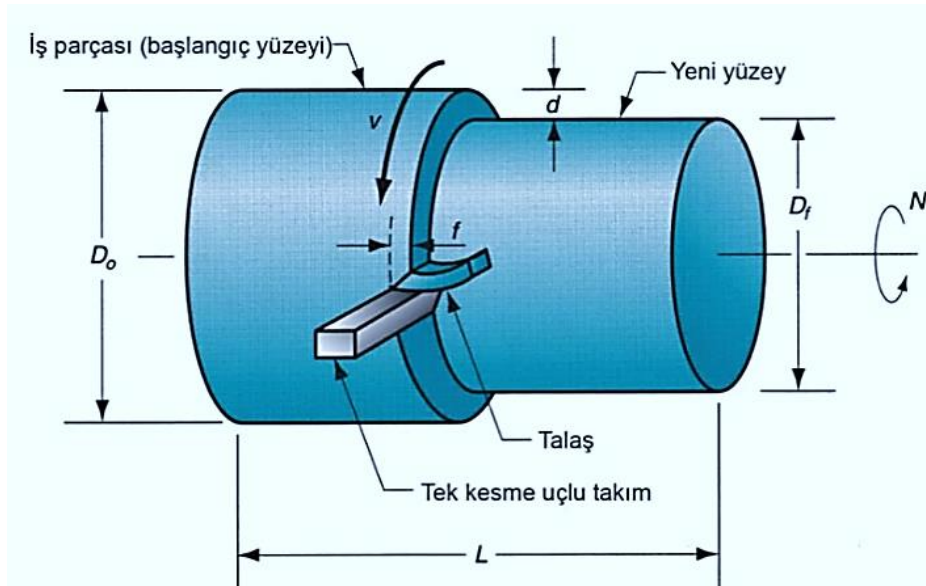
#### 4.2. TORNALAMA

Tornalama, kendi ekseni çevresinde dönen bir iş parçası ve sabit tek kesme uçlu takımın doğrusal hareketi ile, silindirik yüzeyler üretmek için kullanılan, metal

kesme işlemidir. Yani, takım ve iş malzemesi arasında bir bağıl hareket ile tornalama işlemi gerçekleşmektedir.

#### 4.2.1. Tornalama İşlemi ve Kesme Parametreleri

Torna tezgahındaki dönel hareket ile kesicinin iş parçası çevresinden, dakikada metre cinsinden aldığı yol değeri, kesme hızı olarak açıklanmaktadır. Ek olarak, torna tezgahının, dev/dak cinsinden mil devrini (N) bilmemiz durumunda, işlenen malzemenin çapına bağlı olarak kesme hızına basit bir şekilde ulaşmak mümkündür. Kesme hızı dışında, takımın iş malzemesi üzerinde doğrusal hareket etmesi ile, kesme işlemi gerçekleşir ve bu doğrusal harekete ilerleme (f) denmektedir. İlerleme, iş malzemesinin her bir devri başına, takımın yol aldığı mm cinsinden doğrusal hareket, şeklinde tanımlamak mümkündür. Kesme derinliği ise mm cinsinden iş malzemesinin ilk çapından, işlendikten sonra oluşan malzeme çapının çıkartılıp, ikiye bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu üç parametre ( $a$ ,  $f$ ,  $V_c$ ), kesme parametrelerini temsil etmektedir ve bu parametreler ile tornalama işleminin basit bir gösterimi şekil 4.1'de sunulmuştur [122].



Şekil 4.1. Tornalama işlemi ve kesme parametreleri [122].



#### **4.2.2. Talaş Oluşumu ve Mekanîği**

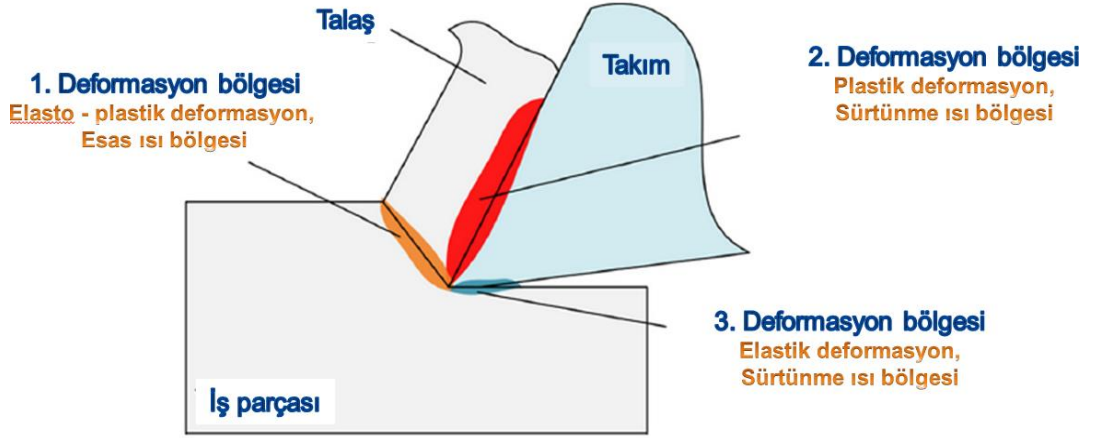
Teoride, talaş kaldırmanın ana odağında, talaş oluşumu vardır. Talaş, iş parçasının kayma gerilmesine maruziyeti ile, plastik deformasyonlar sonucunda oluşmaktadır. Talaşın, iş parçasından kaldırılması ile oluşan yüzey, ortaya çıkan yeni yüzeydir. Talaş kaldırma mekanîği için kullanılan model dik kesme (ortogonal) modelidir. Gerçek üç boyutlu olan talaş oluşumunu, çeşitli kabuller ile bu model sayesinde basitleştirmek mümkün olmuştur. Kullanılan bu model sayesinde yapılan analizler, talaş kaldırma mekanîğini tanımlamada istenilen seviyede (milimetrenin yüzde biri) doğruluk sunmaktadır [122].

#### **4.2.3. Isı ve Sıcaklık**

Metallerde talaş kaldırma esnasında, kesme bölgesinde sıcaklık ve ısı meydana gelmektedir. Uygulanan yükün etkisi ile harcanan kesme gücünün neredeyse tamamı, kesme ucu ve çevresinde ısıya dönüşmektedir. Kullanılan kesici ucun performansı ve işlenen yüzeyin kalitesi göz önünde bulundurulduğunda, açığa çıkan ısının analizi önemlidir. Bu sürtünme ile oluşan ısı, takım aşınmasını hızlandırmasının yanı sıra, takım ömrünü kısaltmaktadır ve yüksek kesme hızlarında çeşitli sınırlamalara sebebiyet vermektedir. Kesme sıvısı kullanımı, kesici uç üzerinde oluşan ısının kötü sonuçlarını engellemek bakımından önemli bir etken olmaktadır. Ayrıca kesme hızı ve ilerleme gibi kesme parametreleri yanı sıra, çevresel etki, kesici uç geometrisi gibi etkenlerin kesme bölgesindeki sıcaklık değerlerini artırdığı ve kesici uçta aşınmalara sebebiyet verdiği bilinmektedir [123].

Talaş kaldırma esnasında, kesici takım ve iş parçası yüzeyinde şekil 4.2' de gösterildiği gibi, üç farklı ısı bölgesi oluşmaktadır. Bunlardan, birinci deformasyon bölgesi, kayma düzleminde ortaya çıkmaktadır. Burada, plastik deformasyon sonucu meydana gelen ısı talaşta kalmaktadır ve çıkan talaş kesme bölgesinden atılmaktadır. İkinci deformasyon bölgesinde ise, talaş kaldırma sonucu oluşan talaş katmanının sürekli akması ile, ek bir plastik deformasyon oluşmaktadır. Talaş ara yüzeyi ile takım arasında, sürtünme ile bu bölgede oluşan ısının, bir miktarı talaş ile, diğer kısmı takım yüzeyine geçerek atılmaktadır. Son olarak üçüncü deformasyon bölgesi, talaş kaldırma sonucu meydana gelen yüzey ile kesici ucun serbest kenarının temas

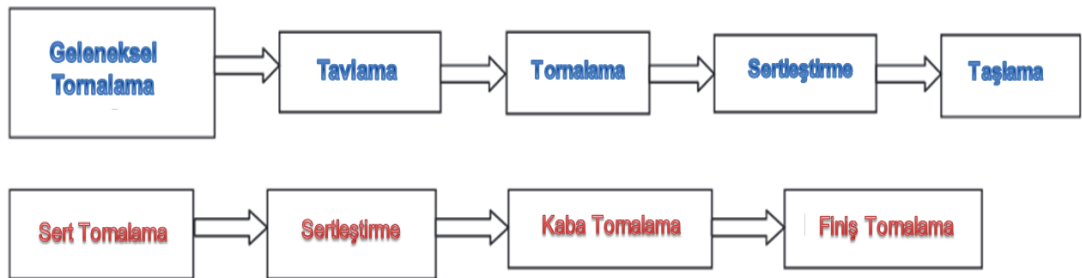
etmesi sonucu açığa çıkan ısı bölgesini oluşturmaktadır. Kesici takıma ön boşluk açısı verildiğinde ise takımın yan yüzeyinde herhangi bir ısı oluşumu gerçekleşmemektedir. Bu yüzden takıma bir boşluk açısı vermek, ısı oluşumunu bertaraf etmek için çok önemlidir [124].



Şekil 4.2. Metalin ortogonal kesiminde oluşan ısı bölgeleri [124].

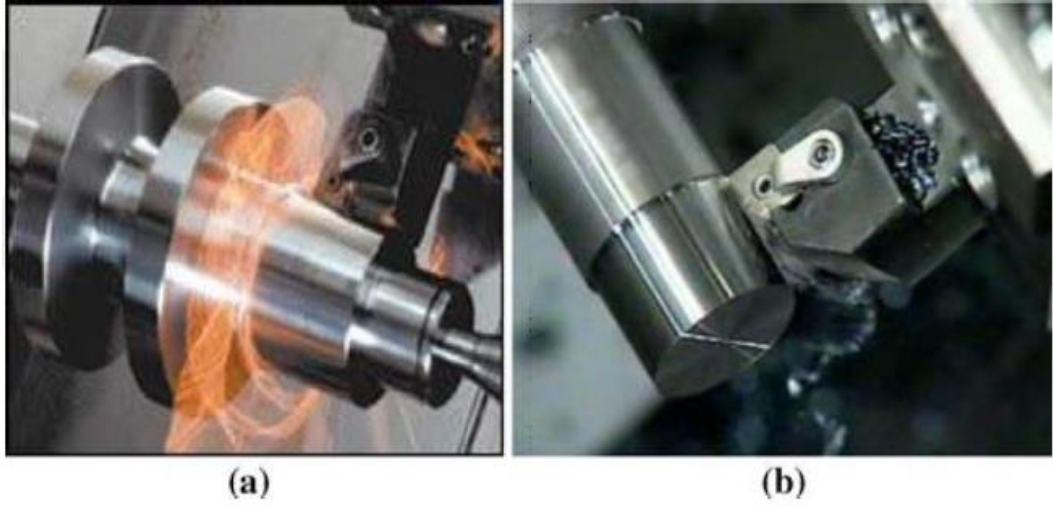
### 4.3. SERT TORNALAMA İŞLEMİ

Sert malzemeler, 45 HRC'den daha sert olan malzemelerdir. Bu yüksek sertlikteki malzemelerin, finiş tornalama işlemlerine, sert tornalama denmektedir. Sert tornalama işlemi ile taşlamaya alternatif ve taşlama kalitesinde bir yüzey elde edilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca sert tornalama işleminin, taşlamaya karşı çok yüksek işleme esnekliğine sahip olması en önemli avantajlarından biri olmaktadır. Şekil 4.3'te sert tornalama ile geleneksel tornalama işlemlerinin yapılması gereken iş akışları karşılaştırmalı bir şekilde gösterilmiştir [125].



Şekil 4.3. Sert tornalama ile geleneksel tornalamanın karşılaştırılması [125].

Sert tornalama işlemi, yüksek oranda malzeme kaldırma oranı ile işleme süresinin minimuma indirmesi, daha az makine ile tek ortamda işleme kolaylığı (çok karmaşık parça geometrilerini eksiksiz işleme) ve en önemlisi de mümkün olan en iyi yüzey kalitesi elde edilmesinden ötürü, çok cazip bir yöntem haline gelmiştir [126]. Şekil 4.4'te sertleştirilmiş ve sertleştirilme yapılmamış her iki parçaya uygulanan tornalama işlemi gösterilmiştir [127].



Şekil 4.4. a) Sertleştirilmiş çeliklerin yüksek hızda işlenmesi esnasında oluşan kesme sıcaklıkları görüntüsü b) sertleştirilmemiş çeliklerin geleneksel işlenmesi [127].

Sert tornalama işlemleri için pek çok kesici uç kullanılabilir. Sert tornalama işlemlerinde CBN takımların kullanımı çok yaygındır. Çünkü bu takımlar, kuru kesme şartlarında 1200 °C sıcaklığa kadar dayanma özelliğine ve 55 HRC'den 70 HRC sertliğine kadar olan malzemeleri işleme özelliğine sahiptirler. Fakat bu takımların maliyeti çok yüksektir. Bu yüzden piyasada bulunan çok farklı özellikte kesici uçlar arasında, optimum özelliklere sahip olanı belirleyip kullanmak maliyet ve enerji tüketimi açısından çok büyük önem taşımaktadır. Taşlamaya göre sert tornalamanın bir diğer avantajı da üretilen talaşla ısının büyük miktarının atılmasıdır. Bu yüzden iş parçasına nüfuz eden az miktardaki ısıyı (sabit bir parça sıcaklığı sağlamak için), çeşitli soğutma sıvıları kullanımı ile bertaraf etmek mümkün olmaktadır. Her ne kadar kuru kesme şartlarında tornalama işlemlerini gerçekleştirmek, çevre korunması açısından önemli olsada, kesme sıvısı kullanımı

talaş kaldırmayı iyileştirmekte, yüzey kalitesinin mikron seviyesine ulaşmasını sağlamakta ve kesici takımın ömrünü uzatmaktadır [127].

#### **4.3.1. Sert Tornalama İşlemlerinde Ölçüm Yöntemleri**

İşlenebilirliği etkileyen çok farklı parametreler bulunmaktadır. Buna rağmen işlenebilirlik için, belirli bir standartta veya herhangi bir şekilde yaygın kabul gören bir ölçme yöntemi bulunmamaktadır. Farklı ölçme yöntemleri ile yapılan testler, üretim sürecinin gerektirdiği ihtiyaçlara göre yapılmaktadır. İşlenebilirliği değerlendirmek için, yüzey kalitesi, kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri, takım aşınması ve takım ömrü gibi farklı ölçme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu ölçme yöntemleri dışındada, çok farklı ölçüm yöntemleri bulunmaktadır [128].

#### **4.3.2. Takım Aşınması ve Takım Ömrü**

Taşlamaya göre avantajları olan sert tornalamanın, en önemli handikaplarından biri takım aşınmasıdır. Takım aşınmasını en basit şekilde, kesici kenara binen yük sonucunda, takım üzerindeki malzemenin kaybı ile gerçekleşen, deformasyon şeklinde tanımlamak mümkündür. İmalat sürecinde, iş parçasının kalitesini bozan takım aşınması süreci, takım ömrü bitene kadar devam etmektedir. Yani, her takımın, işlenen malzeme özelliklerine, ve kullanılan takıma bağlı olarak, belirli bir ömrü bulunmaktadır. Ayrıca, takım aşınması oluşumu ve takım ömrü, kesme parametrelerinin seçimine bağlı olarakta, farklılık göstermektedir. Kesme işlemi esnasında, takımın kesme kenarında ve kenara yakın bölgelerinde aşınma oluşabilmektedir. Hassas bir işlem olan sert tornalamada, parça boyutlarını hassas bir şekilde sağlamak ve iyi bir yüzey kalitesi sunmak için takım aşınmasını olabildiğince azaltmak gerekmektedir. Ayrıca, takım aşınması kesme kuvvetlerini de artırmaktadır. Kesme kuvvetlerindeki artış ile de, işlenen parçanın boyutları, istenmeyen bir şekilde kötüleşmektedir, beyaz tabaka ve kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Sert tornalamada, seramik ve CBN gibi kaliteli takımlar kullanılmaktadır. Bu tip takımlarda serbest (yan) yüzey aşınması ve krater aşınması gerçekleşmektedir. Yüzeyin ve iş parçası boyutlarının düzgün bir şekilde sağlanması açısından, serbest yüzey aşınmasının engellenmesi çok önemlidir. Ayrıca, sert tornalama işlemi esnasında, kullanılan

takımlarda abrazyon, adezyon, kimyasal ve difüzyon aşınma mekanizmaları oluşabilmektedir [127].

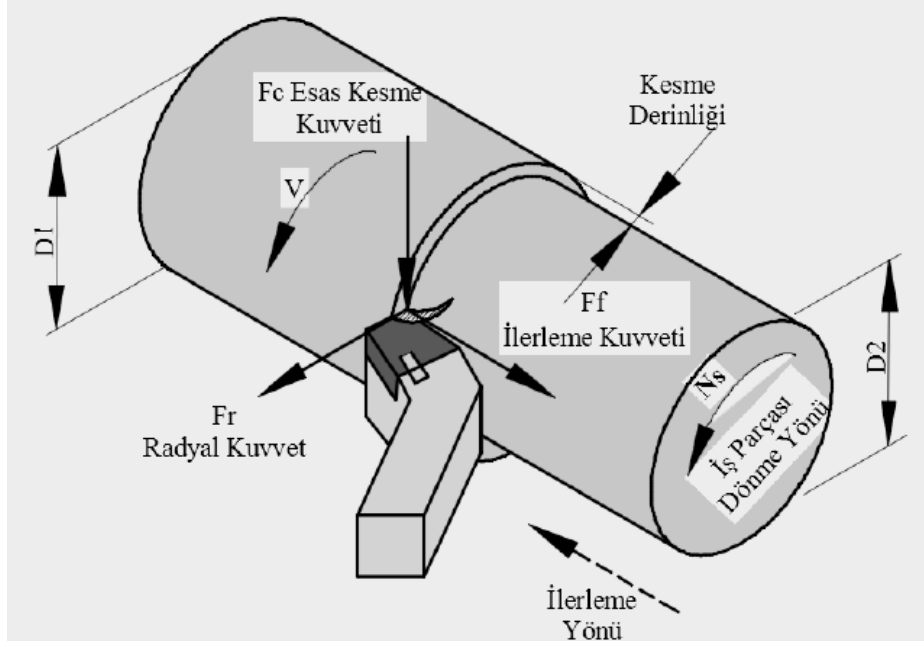
Deneyleerde kesme sıvısı kullanıldığı için takım aşınması önemseneemeyecek kadar düşüktür. Ayrıca yapılan deneyleerde yeni kesici uçlar kullanıldığı için tezde takım aşınmasının etkisi dikkate alınmamıştır.

#### **4.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü**

Doğada yüzeyi tamamen pürüzsüz olan bir cisim bulmak çok zordur. Pürüzsüz olarak düşündüğümüz yüzeylerde, detaylı incelemeler sonucunda yüzeyde sapmaların varlığına ulaşabilmekteyiz. Yüzey pürüzlülüğü, pek çok giriş parametresine bağlı olarak, ürünün son halini temsil ettiği için, çok önemli bir çıkış parametresidir. Farklı imalat yöntemleri ile işlenen iş parçası yüzeyinde oluşan hata, dalga ve takım izi tarzı düzgünsüzlüklerin tamamı, yüzey pürüzlülüğü olarak tanımlanır. Karmaşık birbirlerine temasla çalışan sistemlerde, imal edilen parçaların yüzeylerinin mümkün olduğunca pürüzsüz olması ile, parçanın sürtünme ömrü ve aşınma direnci artmaktadır. Aksi takdirde, yüzeyi pürüzlü parçalar arasında temas yüzeyleri azalmaktadır, ve istenmeyen durumlara (aşınma ve sürtünme artarken, çentik darbe ve yorulma dirençleri düşmektedir.) sebebiyet vermektedir [128].

#### **4.3.4. Kesme Kuvveti**

Kesme kuvveti, iş parçasının kesici takıma göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmaktadır. Kesme kuvvetleri ölçümü ile kesme işlemleri analiz edilebilmekte ve optimizasyonu sağlanabilmektedir. Tornalama işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetleri, üç farklı ekseninde, üç kesme kuvveti bileşeni şeklinde belirlenmektedir. Bu bileşenler; ana kesme hareketi yönünde oluşan teğetsel kuvvet ( $F_c$ ), iş parçasının eksenini yönünde oluşan radyal kuvvet ( $F_r$ ) ve iş parçası eksenine paralel oluşan ilerleme kuvvetidir ( $F_f$ ). Bu Kesme kuvvetleri, kesme işlemi esnasında anlık olarak farklılaştığından, ortalamaları alınarak değerlendirilmektedir [76].



Şekil 4.5. Tornalama işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri [129].

Şekil 4.5'te tornalama işlemi esnasında, oluşan kesme kuvvetleri şekil üzerinde gösterilmiştir. Bu üç kuvvetin vektörel olarak toplanması ile bileşke kuvveti elde ederiz ve bileşke kuvvet ( $F$ ), Eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır.

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_r^2 + F_f^2} \quad (4.1)$$

Tornalama işlemi esnasında oluşan güç tüketimi, takım koşullarının bir göstergesi ve işleme girdisinin bir tasarımı şeklinde düşünülebilir. Güç tüketimi hesabı için sadece teğet kesme kuvveti ( $F_c$ ), göz önünde bulundurulur ve kesme hızı ile kesme kuvvetinin çarpımı şeklinde hesaplamak mümkündür. Çünkü, diğer kesme kuvvetleri arasından, teğetsel kesme kuvveti en yüksek değere sahiptir ve bu yüzden genel olarak kesme kuvvetini temsil etmektedir. Kesme kuvveti ile işleme gücü arasındaki ilişki, bu basitleştirme sayesinde, ortogonal kesme teorisinin kullanılmasına olanak sağlamıştır [129,130].

#### 4.3.5. Diğer Alternatif Ölçüm Metodları (Akım/Enerji Tüketimi/Titreşim/Ses)

Anlık ölçülemeyen aşınma ve yüzey pürüzlülüğüne alternatif olarak, elektrik akımı ve ses şiddeti seviyesi değerlerini, ölçü aletleriyle anlık olarak belirleyebilmekteyiz. Bu alternatif ölçüm metodları sayesinde, anlık bir şekilde, yüzey pürüzlülük veya

aşınma miktarını tahmin etmek konusunda, bize pek çok avantaj sunmaktadır. Yine CNC tezgahın çektiği elektrik akımı ile kesme kuvvetleri arasındaki ilişkiden dolayı, zor ve ekonomik olmayan kesme kuvveti ölçümü için kullanılan dinamometre kullanımındansa, daha pratik bir ölçüm yöntemi olan elektrik akımı ölçümü kullanılması çok daha fazla avantaj sağlamaktadır [127]. Son olarak, anlık güç tüketimi ve işleme süresinin bir fonksiyonu olan enerji tüketimi ölçümü ile, ne kadar ekonomik bir işleme sağlandığını karşılaştırma şansımız oluşmaktadır.

Geleneksel tornalama sürecinde, iş parçası yüzey kalitesinin istenen seviyede olması koşulu ile sadece üretimin kesintisiz ve hızlı olması şartı göz önünde bulundurulur. Fakat kullanılan tezgahın tükettiği enerji miktarı ve bu kullanılan optime edilmemiş enerjinin çevreye vermiş olduğu tahribatında, yaşadığımız dünya için çözüme kavuşturulması olmazsa olmazlarımız arasında olmalıdır. Sürdürülebilir üretim için, bu üç konu birlikte ele alınmalıdır. Yani, işlenen yüzey kalitesi ve üretim hızının yanında, birlikte ele alınması gereken en önemli çıktı parametresi, enerji tüketimi olmak zorundadır. İmalat işlemlerinde, torna tezgahının en çok tükettiği enerji kesme safhasında oluşmaktadır. Bu safhada, iş mili motoru, besleme eksen motoru, aydınlatma, soğutma pompası ve tezgahın kontrol ünitesi gibi bileşenler kullanılmaktadır. Kullanılan bu bileşenler, kesme sırasında tüketilen enerjiyi oluşturmaktadır. Tezgahın çektiği elektrik akım değeri ile bu bileşenlerin güç tüketimi belirlenebilmektedir. Son olarak işleme zamanı ile güç tüketimi çarpılarak tezgahın tükettiği enerji miktarına ulaşmak mümkün olmaktadır [115].

Tezgahın rijitliğinin sağlanmaması, işleme koşulları, işlenecek parça ve kesici ucu bağlarken oluşacak hatalar, istenmeyen titreşim ve seslere yol açmaktadır. Bu durum kesme işleminin, doğru bir şekilde sonuçlanmasını engellemektedir ve aşınma ile birlikte istenmeyen pek çok sonuca sebebiyet vermektedir. Finiş işleminde, düşük talaş derinlikleri kullanıldığı için titreşimin ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır. Ayrıca, işlenen malzemenin ve kesici ucun bağlama yapısının rijit ve çok uzun olmamasına dikkat etmek gerekmektedir. Titreşim ölçümleri ve ses şiddeti seviyesi ölçümlerinin takibi ile, iş malzemesi yüzeyinin formu ve kesici uç geometrilerini bozmadan engellemek mümkün olmaktadır [131].

## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 5.1. DENEYSEL METOD

Bu araştırma için, Birleşik Metal ve Isıl İşlem Sanayi şirketi tarafından temin edilen, DIN 1.2343 malzemesi, 44 mm çapında ve 250 mm uzunluğundaki iş parçası, deney malzemesi olarak seçilmiştir. Bu malzemenin farklı standartlarda isimlendirilmesi, Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneyde kullanılan sıcak iş takım çeliğinin standartları

Standart	Adlandırma
DIN	1.2343
AISI/ASTM	H11
EN	X38CrMoV5-1

DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 5.2’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.2. DIN 1.2343 çelik malzemenin kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim						
Element	C	Si	Cr	Mo	V	Mn
Ağırlıkça (%)	0,35	1,10	5,10	1,20	0,30	0,40

Çizelge 5.3. DIN 1.2343 çeliğin mekanik özellikleri.

Akma gerilmesi (MPa)	Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	Sertlik (HRC)
1620	7.81	50

Malzemeye, sertleştirilmeden önce punta deliği açılmıştır. İş parçası malzemesinin 950 °C’de 2 saat beklemesine izin verilmiştir ve daha sonra aniden yağ içinde soğutulmuştur. Vakumla sertleştirme tekniği uygulanmıştır ve böylelikle ısıl işlemde homojenlik sağlanmıştır. Malzemenin gerilimini elde etmek için 600°C’de



temperleme yapılmıştır. Daha sonra istenilen özelliklerin elde edilip edilmediğini kontrol etmek için, testler yapılmıştır ve 50 HRC sertlik değerine ulaşılmıştır.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan CNC torna tezgahı.

Malzemelerdeki ve ısıl işlem teknolojisindeki gelişmeler işlenebilirlik sorununu ortaya çıkarmıştır. Bu tür dayanımı yüksek malzemelerin, yüksek rijitlikteki makinelerle işlenmesi gerekmektedir. Bu durum yüksek mekanik dayanım elde edildikten sonra, en önemli sorunlardan biri olmuştur. Bu nedenle bu deneysel çalışmada Şekil 5.1’de gösterilen TAKSAN tarafından üretilen TTC 630 model CNC torna tezgahı kullanılmıştır.

Çizelge 5.4. TTC 630 model CNC torna tezgahı önemli özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
İşletim sistemi	-	Sinumerik 810 D
Devir aralığı	dev/dak	10-4000
Hassasiyet	mm	0,001
Motor gücü	kW	37
Takım bağlama istasyonu sayısı	adet	12
Tezgâh ağırlığı	ton	4

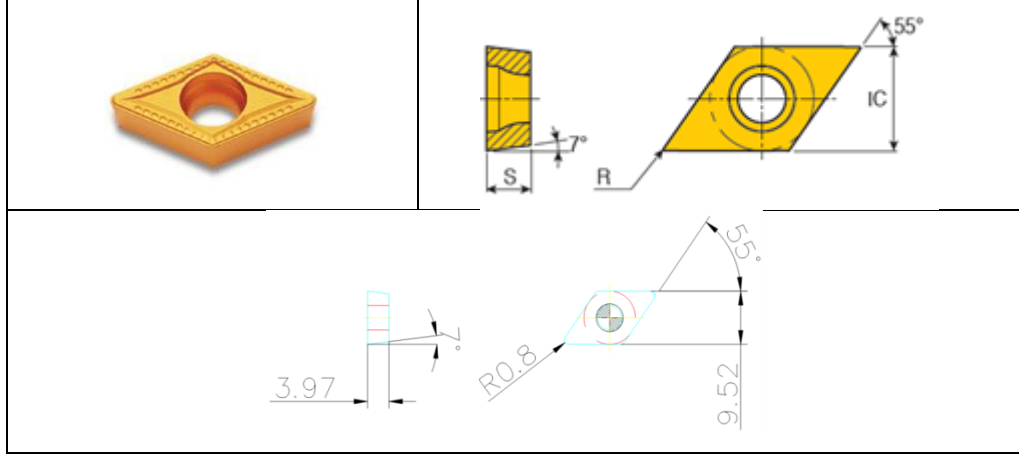
Bu makine, 20 kW güce, maksimum 4000 rpm hıza sahiptir ve yüksek kesme hızlarında hassasiyetini kaybetmez. Deneylerde kullanılan CNC torna tezgahının, diğer önemli özellikleri, Çizelge 5.4'te sunulmuştur.

İşlenecek malzeme punta ile ayna arasına bağlanmıştır. Yüzeiden bir miktar talaş kaldırılmış ve daha sonra işleme deneyleri için hazırlanmak üzere, malzeme yüzeyinden 2'şer mm genişliğinde, 9 adet kanal açılmıştır. Kanal açılması ile hedeflenen, ölçüm kolaylığı ve karşılaştırma açısından çok daha net sonuçlar vermesidir. Ayrıca her bir deney için bu kanallar arasındaki kesme uzunluğu mesafesi 20 mm olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğini doğrulamak için deneyler 3 kez tekrarlanmıştır ve bir iş parçası malzemesi üzerinde şekil 5.2'de gösterildiği gibi 9 deney yapılmıştır.



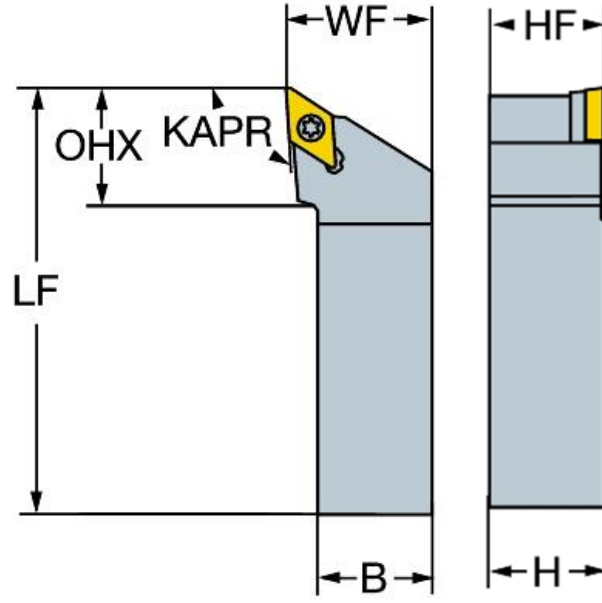
Şekil 5.2. CNC torna tezgahında işlenen iş parçası.

Sert malzemelerin tornalanması için, TaeguTec tarafından üretilen, DCMT 11T304 ve DCMT 11T308 MT TT5080 geometrilerine sahip, PVD (fiziksel buhar biriktirme) kaplı karbür takımlar kullanıldı. Şekil 5.3’de kesici takımın ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kesme takımı ve ölçüleri.

Kesme işleminde soğutma sıvısı kullanılmıştır. 1/20 bor yağının su ile karıştırılmasıyla elde edilen karışım ile deneysel çalışma yapılmıştır. Her bir deney, yeni kesici uçlar ile yapılmıştır. Bu yüzden, çalışmada takım aşınmasının etkisi dikkate alınmamıştır.

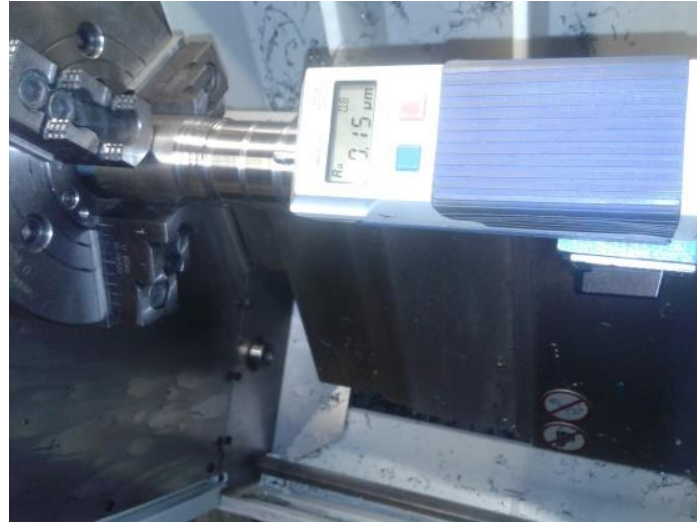
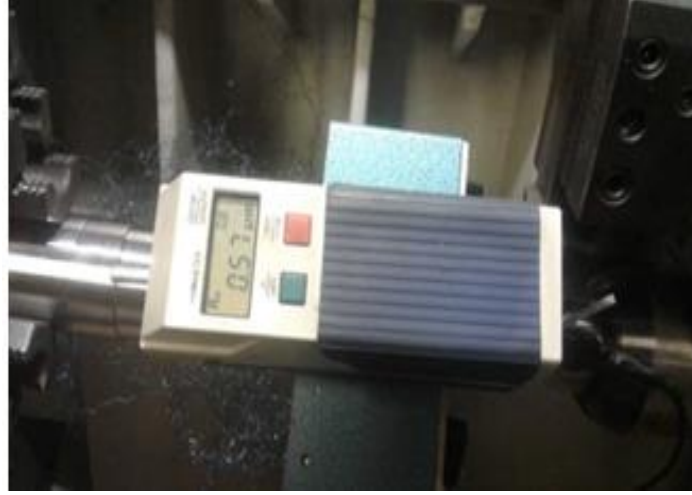


- LF : Takım tam boyu (150 mm)  
 OHX : Maksimum bağlama boyu (24,4 mm)  
 KAPR : Takım kesme kenarı açısı (93 derece)  
 WF : Fonksiyonel genişlik (32mm)  
 B : Şaft genişliği (25mm)  
 HF : Fonksiyonel yükseklik (25mm)  
 H : Takım şaft yüksekliği (25mm)

Şekil 5.4. Takım tutucu ve ölçüleri.

Takım tutucu, Sandvik marka SDJCR 2525 M11 95 derecelik bir yerleştirme açısı ve -7 derecelik bir kesici uç açısı ile kullanılmıştır. Şekil 5.4. Takım tutucu ve takım tutucunun ölçüleri gösterilmiştir. Takım tutucu, titreşimini azaltmak için 10 mm mesafede bağlanmıştır.

İşleme testinin hemen ardından şekil 5.5.'de gösterilen Mitutoyo Surf-test 211 marka elmas uçlu pürüzlülük test cihazı ile yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Cihazın teknik özellikleri çizelge 5.5.'te sunulmuştur. Ölçümler yapılmadan önce cihaz kalibrasyonu yapılmıştır. Tornada işlenen malzeme, pürüzlülük ölçüm işlemi öncesinde çevre sıcaklığına ulaşana kadar beklendi ve yüzey kısmı hava tutulduktan sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir. 3 farklı noktada ölçümler alınmış ve ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) hesaplanmıştır. Örnekleme aralığı 0,8 olarak seçilmiştir.



Şekil 5.5. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve ölçüm esnasındaki görüntüler.

Çizelge 5.5. Mitutoyo SurfTest 211 marka pürüzlülük ölçüm cihazı teknik özellikleri.

<b>Marka</b>	Mitutoyo
<b>Model</b>	SurfTest 211
<b>Uç</b>	Elmas Koni
<b>Kesme mesafesi (mm)</b>	0,08 / 0,25 / 0,80 / 2,50
<b>Ölçme hızı (mm/s)</b>	0,25 / 0,50 / 0,75



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.6. a) Unit UT- 201 Pens ampermetre b) Pens ampermetre ile akım ölçümü (tek faz) c) faz kablosunun tezgahın önüne alınması d) tezgah önünde ölçülen akım değeri.

İşlem sırasındaki elektrik akımı değeri ve ses şiddeti seviyeleri anlık olarak kaydedilmiştir. İşleme sırasında, elektrik akımı değerlerini ölçmek için Şekil 5.6'daki UNIT UT-201 pensampermetre kullanıldı. Faz değerleri ölçüldü ve regülatörden voltaj değerleri alındı. Makinanın bağlı olduğu regülatör, voltaj değerlerindeki dalgalanmaların ve enerji kayıplarından kaynaklanan değişikliklerin ölçüm sonuçlarını etkilemesini engellemektedir. Elektrik akım ölçümü esnasındaki görüntü şekil 5.6'da gösterilmiştir ve Çizelge 5.6'da pens ampermetre özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 5.6. Unit UT- 201 Pens ampermetre özellikleri.

Özellik	Birim	Değer	Doğruluk
Çene Çapı	mm	28	-
DC Gerilim Kademe	V	200mV / 2 / 20 / 200	± %0,8+1
AC Gerilim Kademe	V	2 / 20 / 200	± %1,2+5
AC Akım Kademesi	A	2 / 20 / 200 / 400	± %1,5+5
Direnç Kademesi	Ω	200 / 2kΩ / 20 kΩ / 200kΩ / 2MΩ / 20MΩ	± %1+2

Ses şiddeti seviyeleri, Filtre A konumunda bir Lutron SL 401 ses yoğunluğu ölçer ile ölçülmüştür. Kullanılan ses şiddeti ölçüm cihazı şekil 5.7'de gösterilmiştir. Ses şiddeti ölçümleri, test ortamı sessizken toplanmıştır. Çizelge 5.7'de ses şiddeti ölçerin teknik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 5.7. Lutron SL 401 ses şiddeti ölçer

Çizelge 5.7. Lutron SL 401 ses şiddeti ölçer teknik özellikleri.

<b>Ses seviyesi ölçüm aralığı</b>	dB (30-130)
<b>Ağırlıklandırma</b>	AC (Doğrusal filtre)
<b>Algılama özellikleri</b>	- (Hızlı/Yavaş)
<b>Çözünürlük</b>	dB (0,1)

Enerji tüketimi; eşitlik 6.8 kullanılarak, anlık güç tüketimi ve toplam işlem süreleri hesaplanmıştır.

## 5.2. İSTATİSTİKSEL METOD

Deney tasarımında, bir istatistiksel metodoloji olan tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Sert tornalama için, kesme parametreleri belirlenirken literatürdeki veriler ve takım kataloğu değerleri dikkate alınmıştır. Kullanılan kesme parametre ve seviyeleri, Çizelge 5.8'de sunulmuştur.  $3^3 \cdot 2$  (3 kesme parametresi için 3 seviye, 1 kesme parametresi için 2 seviye seçilmiştir.) tam faktöriyel tasarım kullanılarak



toplam 54 deney modellenmiştir. Bu deney tasarımına göre yürütülen deneylerin ölçüm sonuçları (yüzey pürüzlülük, elektrik akımı ve ses şiddeti) ve hesaplanan değerlerin (enerji tüketimi) ayrıntılı analizleri yapılmıştır.

Çizelge 5.8. Kesme parametre ve seviyeleri.

Kesme parametresi	Sembol	Birim	Seviye		
			1	2	3
Talaş derinliği	$a$	mm	0,05	0,10	0,15
Kesme hızı	$V$	m/dak	140	160	180
İlerleme miktarı	$f$	mm/dev	0,05	0,09	0,13
Takım uç yarıçapı	$r$	mm	0,4	0,8	-

Deneysel veriler Minitab 18 istatistiksel paket programı kullanılarak, sırasıyla varyans analizi (ANOVA), optimizasyonu ve son olarak matematiksel modeli oluşturulmuştur. Üç boyutlu grafiklerle, parametreler arasındaki ilişki incelenmiştir. Daha sonra ise gerçek deneysel sonuçlar ile bu matematiksel olarak modellenen tahmini değerler karşılaştırılmıştır.

### 5.2.1. Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülük, Akım, Ses Şiddeti ve Enerji Tüketimi üzerindeki etkileri

Çıktı parametreleri (yüzey pürüzlülük, ses şiddeti, akım ve enerji tüketimi) için ana etki grafikleri oluşturularak analiz edilmiştir. Sunulan bu grafikler en etkili parametrenin belirlenmesinde etkili bir yöntemdir.

### 5.2.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Sert tornalama işlemi yapılan DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliğinin deney verilerinden elde edilen, yüzey pürüzlülük, elektrik akımı, ses şiddeti seviyesi ve enerji tüketim değerleri için tüm kesme parametrelerinin etkileşimi ANOVA (varyans analizi) ile belirlenmiştir. % 95 güven seviyesinde analizler yapılmıştır. Bu durumda, dikkate alınacak P değerleri, 0,05 değerinden düşük olan değerler olacaktır. Yani, bu değerlerin altındaki her bir parametre, istatistiksel öneme sahip olacaktır.

Tüm çıktı parametre değerleri için, pareto grafikleri kullanılmıştır. Pareto grafiği ile çıktı parametreleri üzerinde, girdi parametrelerinin ne kadar etkili olduğu basit bir şekilde anlaşılmaktadır. Hatta, istatistiksel olarak anlamsız olan değerler, incelenen grafikte, kırmızı kesikli çizginin soluna denk gelmektedir ve bu çizginin sağındaki parametreler, istatistiksel olarak anlamlı olduklarını göstermektedir.

Etkileşim grafikleri kullanılarak, her bir çıktı parametresi için, girdi faktörlerinin arasındaki etkileşimi net olarak teşhis edebilmekteyiz. ANOVA tablolarından yüzdelik değer olarak, anlamlı olan etkileşimli parametreleri belirleyebilmekteyiz. bu etkileşim grafikleri ile ise, daha net bir şekilde, grafiksel olarak etkileşime sahip olan parametrelerin etkisini görmemiz mümkün olmaktadır.

### **5.2.3. Optimum Kesme Parametreleri**

Tüm girdi parametre değerleri için, çıktı parametre değerlerinin en düşük değerleri bizim için ideal olanıdır. Yani, optimum seviyeler, çıktı parametrelerinin en düşük değerleri olarak belirlenmiştir. Her kesme parametresi için optimum girdi parametre seviyeleri ve değerleri, hem ana etki grafiklerinde kırmızı olarak, hemde optimum kesme parametre ve seviye çizelgesinde belirlenmiştir. Bu çizelgelerde çıktı parametrelerinin minimum değerleri, optimum girdi parametre seviyeleri ve bu seviyelerin değerleri ise koyu siyah puntolarla işaretlenerek gösterilmiştir.

### 5.3. DENEY DÜZENEĞİ



Şekil 5.8. Deney düzeneği

Deney düzeneği solda ve anlık olarak deney esnasında kullanılan ölçüm cihazları sağda olmak üzere şekil 5.8.'de gösterilmiştir.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu deneysel çalışmada, sertleştirilmiş DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliğini işlerken, PVD kaplı karbür takım kullanılmıştır. Bu deneyleri gerçekleştirirken, sert tornalama yöntemi ile deney numuneleri işlenmiştir.

Tüm deneyler için oluşturulan 3 farklı bağımsız (girdi) değişkenlerin farklı kombinasyonlarında, farklı takım uç yarıçapında PVD kaplı karbür takım kullanılmıştır ve bu deneyler, tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak modellenmiştir. Bu model çerçevesinde, 54 ( $3^3 \times 2$ ) deney modellenmiştir. Çizelge 6.1’de tam faktöriyel tasarımla elde edilen deney modeli sunulmuştur.

Toplam dört farklı faktör, girdi faktörü (bağımsız değişkenler) olarak tercih edildi. Takım uç yarıçapı, kesme derinliği, ilerleme miktarı ve kesme hızı, bu faktörleri temsil etmektedir. Her dört girdi faktör kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda, meydana gelen işlenmiş yüzeyler, dört farklı çıktı parametresi belirlenerek incelenmiştir. Bu dört farklı bağımlı değişken; yüzey pürüzlülüğü, elektrik akımı, ses şiddeti seviyesi ve enerji tüketimi, çıktı parametresi olarak tercih edilmiştir ve sonrasında bu çıktılar, ayrıntılı bir şekilde Minitab 18 istatistik programı ile analiz yapılarak detaylı bir şekilde yorumlanmıştır. Belirlenen girdi faktörleri kombinasyonları için, her bir çıktı parametresi ile 54 deney oluşturulmuştur ve toplamda 216 deney verisi elde edilmiştir.

Çizelge 6.1. Deney dizaynı.

Deney No	Takım Uç Yarıçapı (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme Oranı (mm/dev)	Deney No	Takım Uç Yarıçapı (mm)	Kesme Derinliği (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme Oranı (mm/dev)	
1	0,8	0,05	140	0,05	28	0,4	0,05	140	0,05	
2				0,09	29				0,09	
3				0,13	30				0,13	
4			160	0,05	31			160	0,05	
5				0,09	32				0,09	
6				0,13	33				0,13	
7			180	0,05	34			180	0,05	
8				0,09	35				0,09	
9				0,13	36				0,13	
10		0,10	0,10	140	0,05		37	0,10	140	0,05
11					0,09		38			0,09
12					0,13		39			0,13
13				160	0,05		40		160	0,05
14					0,09		41			0,09
15					0,13		42			0,13
16				180	0,05		43		180	0,05
17					0,09		44			0,09
18					0,13		45			0,13
19	0,15	0,15	140	0,05	46	0,15	140	0,05		
20				0,09	47			0,09		
21				0,13	48			0,13		
22			160	0,05	49		160	0,05		
23				0,09	50			0,09		
24				0,13	51			0,13		
25			180	0,05	52		180	0,05		
26				0,09	53			0,09		
27				0,13	54			0,13		

Enerji tüketimi dışında tüm parametrelerin ölçüm sonuçları bağımsızdır. Sadece enerji tüketimi, anlık güç tüketiminin ve toplam işleme süresinin bir fonksiyonudur. 6.1-7 arasındaki denklemleri kullanılarak enerji tüketimini hesaplamak mümkündür.

$$P = \sqrt{3}VI \cos \phi \quad (6.1)$$

P anlık güç tüketimi, V voltaj (gerilim), I akım,  $\phi$  faz açısı,  $\cos \phi$  cihazın güç faktörü

$$P = \sqrt{3}(380)I \cos \phi \quad (6.2)$$

Anlık güç tüketimi (P), toplam işleme süresi (T) ile çarpılır ve Wh cinsinden enerji tüketimini (E) elde etmek için 3600'e bölünür.

$$E = \frac{PT}{3600} \quad (6.3)$$

Mil hızı (devir sayısı), kesme hızının (V) çevreye bölünmesiyle elde edilir.

$$N = \frac{1000V}{\pi D} \quad (6.4)$$

İşleme süresi, iş parçası malzemesinin işlem uzunluğunun (L) ilerlemeye (f) ve mil hızına (N) bölünmesiyle elde edilir.

$$t = \frac{60L}{fN} \quad (6.5)$$

Eşitlik 6.4, eşitlik 6.5'te yazıldığında işleme süresi (t),

$$t = \frac{60\pi DL}{1000fV} \quad (6.6)$$

Toplam işleme süresi (T), kesme derinliği (a) dikkate alınarak elde edilir.

$$T = \frac{60\pi DL a_{max}}{1000fVa} \quad (6.7)$$

Eşitlik 6.3'teki enerji tüketiminin yerine, anlık güç tüketimi ve toplam işleme süresini yazarsak,

$$E = \frac{\sqrt{3}(380)I (\cos \phi) 60\pi DL a_{max}}{3600(1000)fVa} \quad (6.8)$$

Enerji tüketimi, eşitlik (6.8) kullanılarak hesaplanmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımına göre yürütülen deneylerin ölçüm sonuçları (yüzey pürüzlülük, elektrik akımı ve ses şiddeti seviyesi) ve hesaplanan değerler (enerji tüketimi) Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Deneilerin ölçüm sonuçları.

No	Yüzey Pürüzlülük (µm)	Ses Şiddeti Seviyesi (dB)	Enerji Tüketimi (Wh)	Elektrik Akımı (A)	No	Yüzey Pürüzlülük (µm)	Ses Şiddeti Seviyesi (dB)	Enerji Tüketimi (Wh)	Elektrik Akımı (A)
1	0,21	74,5	33,86	2,60	28	0,44	75,1	32,16	2,47
2	0,37	74,8	19,10	2,64	29	0,71	75,2	18,09	2,50
3	0,76	75,0	13,32	2,66	30	1,30	75,3	13,02	2,60
4	0,22	74,9	29,06	2,55	31	0,33	75,0	29,06	2,55
5	0,33	75,0	16,46	2,60	32	1,00	75,0	16,52	2,61
6	0,75	74,9	11,57	2,64	33	1,31	75,1	11,66	2,66
7	0,18	75,0	26,64	2,63	34	0,64	75,2	26,84	2,65
8	0,32	75,1	15,02	2,67	35	0,99	75,4	15,14	2,69
9	0,76	75,3	10,71	2,75	36	1,57	75,5	10,71	2,75
10	0,23	74,6	17,06	2,62	37	0,51	75,2	17,58	2,70
11	0,41	74,7	9,69	2,68	38	1,32	75,1	10,13	2,80
12	0,61	74,8	6,81	2,72	39	1,91	75,1	7,21	2,88
13	0,22	74,9	14,87	2,61	40	0,37	74,9	16,18	2,84
14	0,33	75,1	8,48	2,68	41	1,10	75,1	9,27	2,93
15	0,54	75,2	6,14	2,80	42	2,09	75,3	6,73	3,07
16	0,18	75,1	13,77	2,72	43	0,87	75,3	14,89	2,94
17	0,30	75,3	7,82	2,78	44	1,47	75,4	8,64	3,07
18	0,65	75,5	5,49	2,82	45	2,27	75,6	6,15	3,16
19	0,16	75,0	11,85	2,73	46	1,07	75,2	12,28	2,83
20	0,22	75,1	6,70	2,78	47	1,84	75,3	7,16	2,97
21	0,67	75,3	4,74	2,84	48	3,02	75,4	5,24	3,14
22	0,18	75,0	10,29	2,71	49	1,24	75,3	11,43	3,01
23	0,32	75,2	6,01	2,85	50	2,22	75,4	6,63	3,14
24	0,64	75,3	4,32	2,96	51	3,39	75,5	4,85	3,32
25	0,17	75,4	9,49	2,81	52	1,83	75,4	10,67	3,16
26	0,31	75,6	5,50	2,93	53	2,58	75,5	6,25	3,33
27	0,60	75,8	4,03	3,10	54	3,56	75,6	4,56	3,51

## 6.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

İş parçası yüzeyinin, düşük pürüzlülük değerlere sahip olması çok önemlidir ve yüzeyin kalitesini göstermektedir. Bunun yanında, yüzey kalitesini engelleyen, beyaz katman ve ovallık istenmeyen oluşumlardır. Bu oluşumlar, makine parçalarının düzgün bir şekilde çalışmasına izin vermemektedir ve malzeme dayanımını düşürmesinin yanında, istenmeyen aşınmalara sebebiyet vermektedir. Bu yüzden optimum kesme parametre seçimi çok önem arz etmektedir ve ayrıca kesme hızlarını mümkün mertebe yüksek değerlerde, talaş derinliğini ise tam tersi şekilde düşük değerlerde tercih edilmesi bu tür oluşumları engellemek için daha uygun olmaktadır. Bunun yanında yeni tip tezgah kullanımı ile birlikte, rijit tezgahlarda işlenen yüzeyler, titreşimin azalması ile birlikte çok daha iyi sonuçlar vermektedir.

İlerleme miktarının düşük seçilmesi ve takım uç yarıçapının büyük seçilmesi ile yüzey kalitesi iyileşmektedir. Buna karşın, İlerleme miktarı ne kadar çok artarsa, yüzeyde meydana gelen helis kanal oluşumları yüzeyin kalitesini bozmaktadır. Yani kesici uç, yüzeyde çok daha kısa süre geçireceği için, yüzeyde istenilen kalite oluşmamaktadır. Buna karşın kesme hızının artması veya düşmesi yüzey pürüzlülüğü üzerinde herhangi bir etki sağlamamaktadır. Yeni ve rijit tezgahlar sayesinde, devir sayısının yükselmesi tezgahta herhangi bir titreşime yol açmamaktadır. Fakat kesme kuvvetlerini düşürmesi nedeniyle, kesme hızını artırmanın, yapılan farklı çalışmalarda önemli olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, BUE oluşumunu engellediği içinde, kesme hızı artışı avantaj sağlamaktadır. Talaş derinliğinde, yüzey kalitesi açısından önemli bir faydası olmadığı saptanmıştır. Çünkü amacımız son işlem olan finiş tornalama işlemi olduğu için, çok düşük talaş derinliklerinde yüzeyi etkileyecek herhangi bir önemli etki yaşanmamıştır.

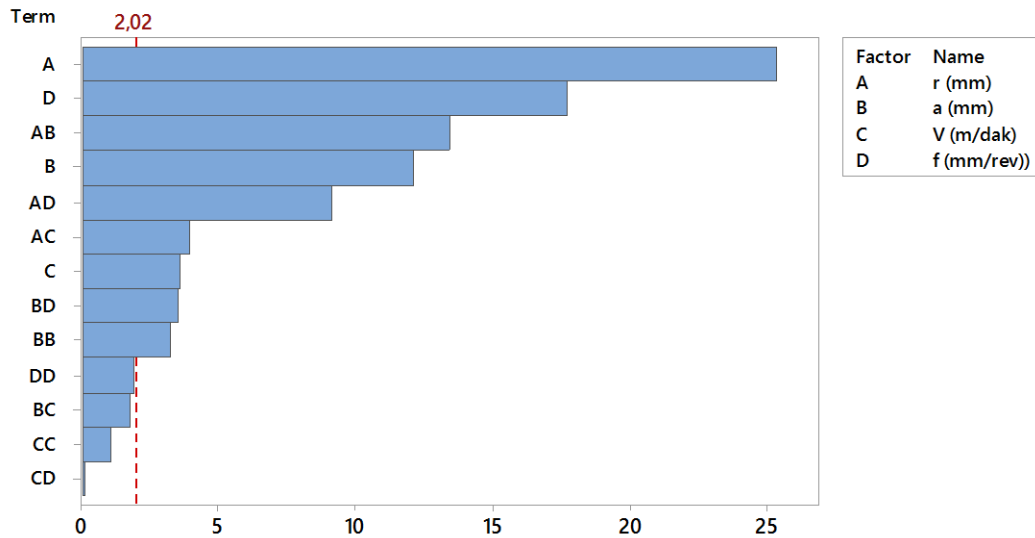
Çizelge 6.3'teki yüzey pürüzlülüğü için ANOVA (varyans analizi) tablosunu incelediğimizde, % 43,81 katkı oranıyla takım uç yarıçapının, en etkili parametre olduğu görülmektedir. Sonra, sırasıyla ilerleme miktarı (% 21,53), takım uç yarıçapı ile kesme derinliği etkileşimi (% 12,26), kesme derinliği (% 10,01), takım uç yarıçapı ile ilerleme miktarı etkileşimi (% 5,65), takım uç yarıçapı ile kesme hızı etkileşimi (%1,05), kesme hızı (% 0,87), kesme derinliği ile ilerleme miktarı



etkileşimi (% 0,84) ve 2. dereceden kesme derinliği ( $a_p^2$ ) etkileşimi (% 0,71), yüzey pürüzlülüğü üzerinde, etkili olan diğer parametreler olmuştur.

Çizelge 6.3. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.

Kaynak	SD	Düz KT	Düz KO	F-değeri	P-değeri	% Katkı	Önem Sev.
$r$	1	17,0129	17,0129	640,52	<b>0,000</b>	<b>43,81</b>	<b>Önemli</b>
$a_p$	1	3,8875	3,8875	146,36	<b>0,000</b>	<b>10,01</b>	<b>Önemli</b>
$V_c$	1	0,3383	0,3383	12,74	<b>0,001</b>	<b>0,87</b>	<b>Önemli</b>
$f$	1	8,3617	8,3617	314,81	<b>0,000</b>	<b>21,53</b>	<b>Önemli</b>
$a_p^2$	1	0,2750	0,2750	10,35	<b>0,003</b>	<b>0,71</b>	<b>Önemli</b>
$V_c^2$	1	0,0317	0,0317	1,19	0,281	0,08	Önemsiz
$f^2$	1	0,0930	0,0930	3,50	0,069	0,24	Önemsiz
$r \times a_p$	1	4,7597	4,7597	179,20	<b>0,000</b>	<b>12,26</b>	<b>Önemli</b>
$r \times V_c$	1	0,4075	0,4075	15,34	<b>0,000</b>	<b>1,05</b>	<b>Önemli</b>
$r \times f$	1	2,1953	2,1953	82,65	<b>0,000</b>	<b>5,65</b>	<b>Önemli</b>
$a_p \times V_c$	1	0,0817	0,0817	3,07	0,087	0,21	Önemsiz
$a_p \times f$	1	0,3267	0,3267	12,30	<b>0,001</b>	<b>0,84</b>	<b>Önemli</b>
$V_c \times f$	1	0,0005	0,0005	0,02	0,891	0,00	Önemsiz
Hata	40	1,0624	0,0266			2,74	
Toplam	53	38,8339				100,00	

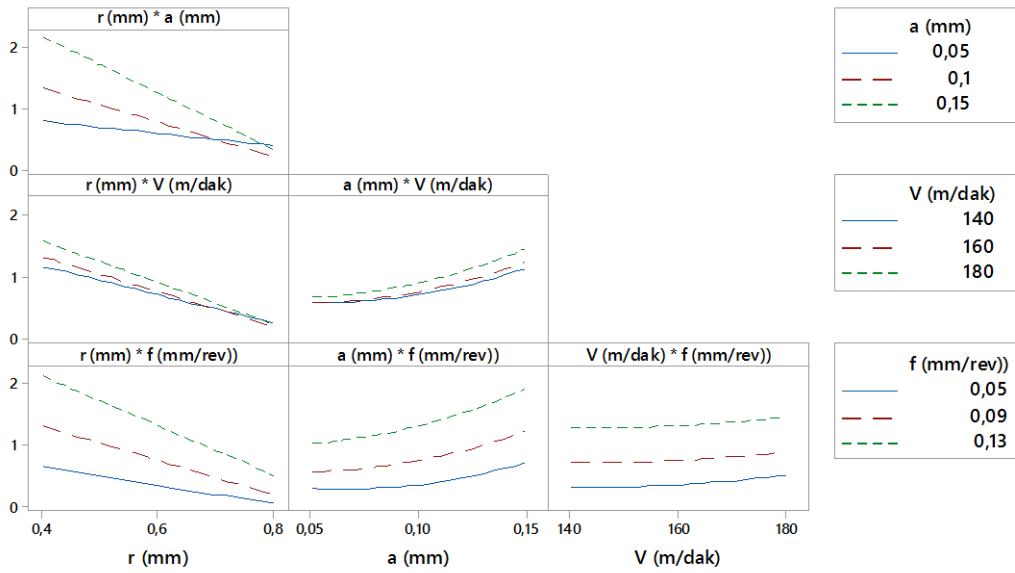


Şekil 6.1. Yüzey pürüzlülüğü için pareto grafiği.

Şekil 6.1'deki yüzey pürüzlülüğü için, pareto grafiğini incelediğimizde, anova tablosunda çıkarılan yüzdelik değerleri, grafiksel olarak takip edebilmekteyiz. En etkili parametrenin, takım uç yarıçapı (r) ve sonrasında ilerleme miktarı (f) olduğunu görmekteyiz. Sonrasında ise, sırasıyla kesme derinliği (a) ve kesme hızı (Vc) etkili diğer parametreler olduğu, pareto grafiğinden çıkarılmıştır.

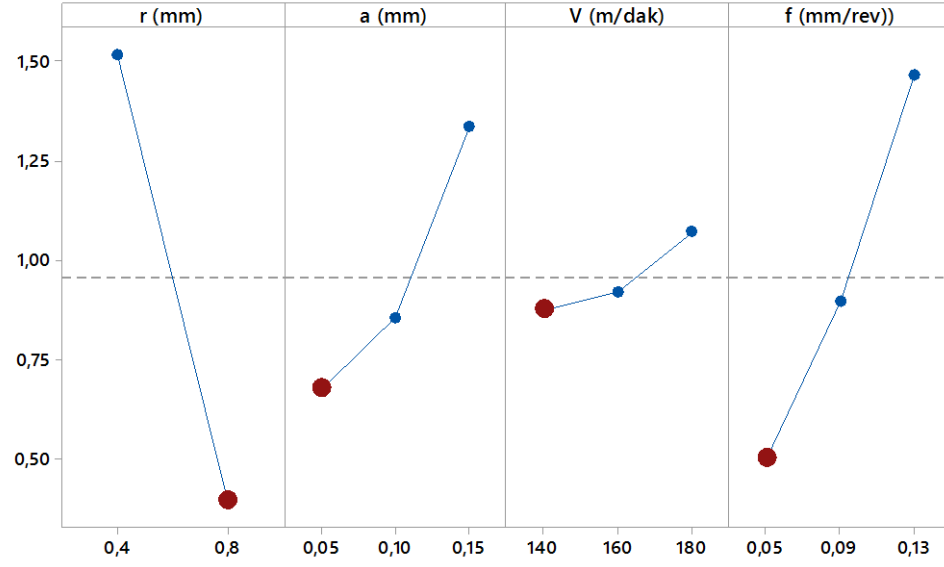
Etkileşim grafiklerinde, her bir girdi parametresi için, hesaplanan çıktı parametre değerlerinin ortalaması alınmaktadır ve parametrelerin değişmesi ile meydana gelen her bir çift girdi parametresi kombinasyonu etkileşimleri grafiklerle gösterilmektedir.

Şekil 6.2’de, yüzey pürüzlülüğü için, etkileşim grafikleri gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde,  $(r \times a_p)$ ,  $(r \times f)$ ,  $(r \times V_c)$ ,  $(a_p \times f)$  etkileşimleri, yüzey pürüzlülüğü üzerinde, açıkça etkilenen, etkileşimli parametreler olarak görülmektedirler.



Şekil 6.2. Yüzey pürüzlülüğü için etkileşim grafikleri.

Şekil 6.2’ de ki yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileşim grafiklerini ayrıntılı bir şekilde incelersek eğer,  $(r \times a_p)$  etkileşim grafiğinin en önemli etkileşim sağlayan iki girdi parametresi (takım uç yarıçapı ve kesme derinliği) olduğu görülmektedir. Bu grafikte, takım uç yarıçapının küçük değerinde (0,4 mm), üç farklı kesme derinliği incelendiğinde, birbirinden çok farklı pürüzlülük değerlerine sahip olduğunu ve sırasıyla, düşük kesme derinliğinden, yüksek kesme derinliğine doğru, pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Büyük takım uç yarıçapı kullanıldığında, pürüzlülük değerleri beklenildiği gibi çok düşük değerlerdedir. Ayrıca, büyük takım uç yarıçapı (0,8mm) ve üç kesme derinliğinde de yüzey pürüzlülük değerleri, birbirine çok yakın çıkmıştır. Hatta 0,10 mm’lik kesme değerinin, diğer kesme derinliklerine oranla bir miktar daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.3. Yüzey pürüzlülüğü için ana etki grafikleri.

Şekil 6.3'teki, ana etki grafiklerindende göreceğimiz üzere, takım uç yarıçapı ve ilerlemeden yüzey pürüzlülüğünün, en fazla etkilendiğini görmekteyiz. Şekil 6.3'teki ana etki grafiklerine bakıldığında, büyük uç yarıçapı (2. Seviye 0,8 mm değeri), düşük kesme derinliği (1. Seviye 0,05 mm değeri), düşük kesme hızı (1. Seviye 140 m/dak) ve düşük ilerleme miktarı (0,05 mm/dev) seçilerek optimum (minumum) yüzey pürüzlülük değeri elde edildiği analiz edilmiştir.

Çizelge 6.4'te ise, optimum parametre ve seviyeler, tablo halinde gösterilmiştir. Bu çizelgede, 0,39 µm ortalama yüzey pürüzlülük değeri ile 2. seviye 0,8'lik takım uç yarıçapı, optimum kesme parametresi olarak belirlenmiştir. 0,67 µm ortalama yüzey pürüzlülük değeri ile 1. seviye kesme derinliği (0,05 mm), 0,88 µm ortalama yüzey pürüzlülük değeri ile kesme hızı (180 m/dk) ve 0,50 µm ortalama yüzey pürüzlülük değeri ile ilerleme miktarı (0,05 mm/dev) optimum kesme parametre seviyelerini oluşturmaktadır.

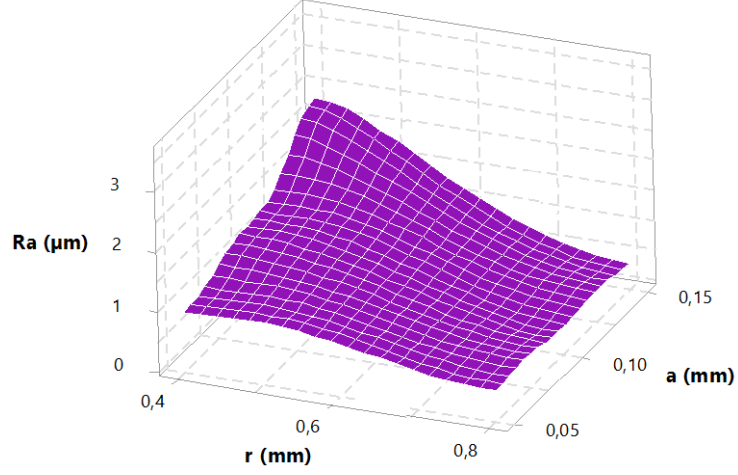
Çizelge 6.4. Yüzey pürüzlülüğü için optimum noktalar

Kesme parametre seviyeleri	Uç yarıçapı (mm)	Kesme derinliği (mm)	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/dev)
1	1,52	<b>0,67</b>	<b>0,88</b>	<b>0,50</b>
2	<b>0,39</b>	0,85	0,92	0,90
3	-	1,33	1,07	1,47
<b>Opt. Sev.</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Opt. Par.</b>	<b>0,8</b>	<b>0,05</b>	<b>180</b>	<b>0,05</b>

Yüzey pürüzlülüğü üzerinde, ( r x f ) etkileşim grafiğini incelediğimizde ise, her iki uç yarıçaplık takımlar ile yapılan deneylerde, ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülük değerleri arttığı gözlemlenmiştir. Fakat küçük takım uç yarıçaptan, büyüğe doğru geçişte pürüzlülük değerleri düşmüştür ve çok küçük aralıklarda birbirine yaklaşmıştır. ( r x V<sub>c</sub> ) etkileşim grafiğini incelediğimizde, küçük takım uç yarıçapı değerinde, artan kesme hızıyla pürüzlülük değerlerinin düşme eğiliminde olduğu analiz edilmiştir. Takım uç yarıçapı küçükten büyük değere çıkarıldığında, her bir kesme hızı için, pürüzlülük değerleri düşmüştür. Ayrıca 0,8 mm'lik takım uç yarıçapı ile yapılan deneylerde, tüm kesme hızı değerlerinde, pürüzlülük üç kesme hızı için neredeyse eşit çıkmıştır. ( a<sub>p</sub>x f ) etkileşimini incelediğimizde ise düşük kesme derinliği olan 0,05 mm değerinde, tüm ilerleme miktarı değerleri için çok daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmişken, yine tüm ilerleme miktarı değerleri için kesme derinliği artışıyla pürüzlülük değerleri yükselme eğiliminde olmuştur.

Küçük takım uç yarıçapı olan 0,4 mm'lik takımın, büyük takım uç yarıçapı değeri olan ve aynı zamanda optimum değer olan 0,8 mm uç yarıçapındaki takımdan, 4 kat daha iyi sonuç verdiği, yani pürüzlülük değerinin istenilen şekilde düştüğü analiz edilmiştir. Bu değişim, yüzey pürüzlülük üzerinde, en fazla takım uç yarıçapında hesaplanmıştır ve bu durum, uç yarıçapının en etkili parametre olduğunda kanıtlar nitelikte olmaktadır. Sonrasında en etkili parametre olan ilerleme miktarının artması ile, yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık 3 kat arttığı analiz edilmiştir. Yani yapılan deneylerde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde, yüksek ilerleme miktarı değeri, bir dezavantaj sağlamaktadır. Sert tornalama işleminde istediğimiz, yüzeyin düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmasıdır.

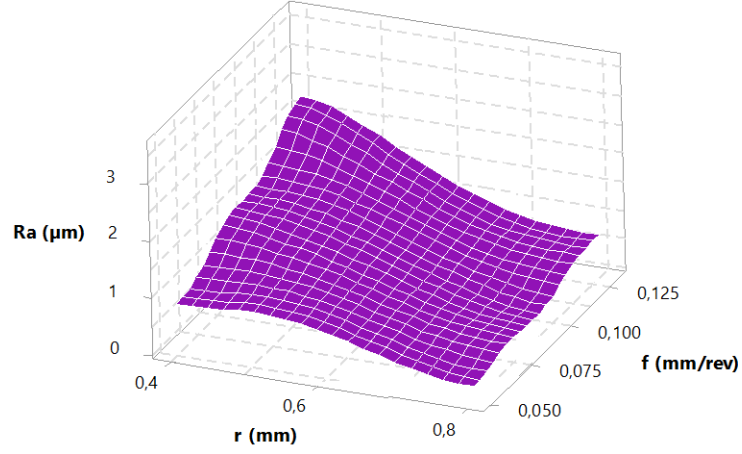
Şekil 6.4-6.7 arasındaki şekiller, yüzey pürüzlülüğü için çizilen, üç boyutlu yüzey grafiklerini göstermektedir.



Şekil 6.4. Yüzey pürüzlülüğü, takım uç yarıçapı ve kesme derinliği için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

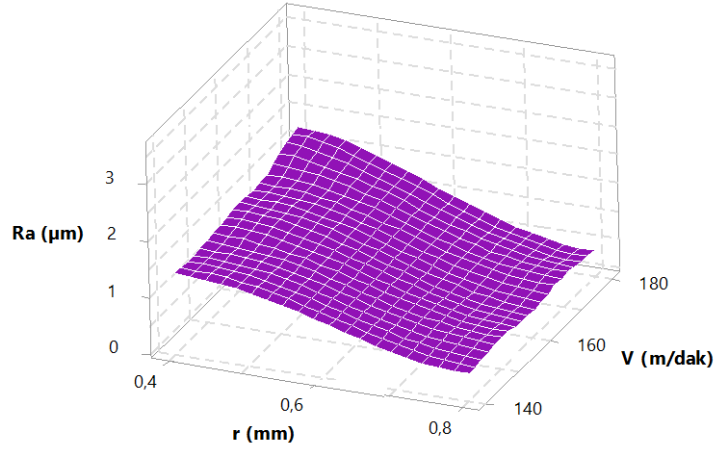
Şekil 6.4'te takım uç yarıçapı ve kesme derinliği grafiğinde, yüksek takım uç yarıçapı ile en iyi yüzey pürüzlülük değerlerini verdiği, düşük takım uç yarıçapı ve yüksek kesme derinliğinde ise en kötü yüzey pürüzlülük değerlerini verdiği açık bir şekilde gözlemlenmiştir. 0,8 mm uç yarıçaplık takımla kesme derinliğinin hiçbir etkisi olmadığı ve düşük yüzey pürüzlülük değerleri vermesine rağmen, 0,4 mm uç yarıçaplık takımla kesme derinliğinden aşırı miktarda etkilendiği ve yüksek kesme derinlik seviyesinde çok kötü sonuçlar verdiği görülmektedir.

Şekil 6.5'te takım uç yarıçapı ve ilerleme miktarı grafiğine baktığımızda, açık bir şekilde, düşük uç yarıçaplık takım ile ve düşük ilerleme miktarı değerlerinde çok iyi pürüzlülük değerleri verdiği, tersi durumda ise çok kötü sonuçlar verdiği belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Hem 0,8 uç yarıçaplık hemde 0,4 uç yarıçaplık takımlarla, ilerleme miktarından etkilendiği ve artan ilerleme miktarı ile yüzey kalitesinin düştüğü analiz edilmiştir.



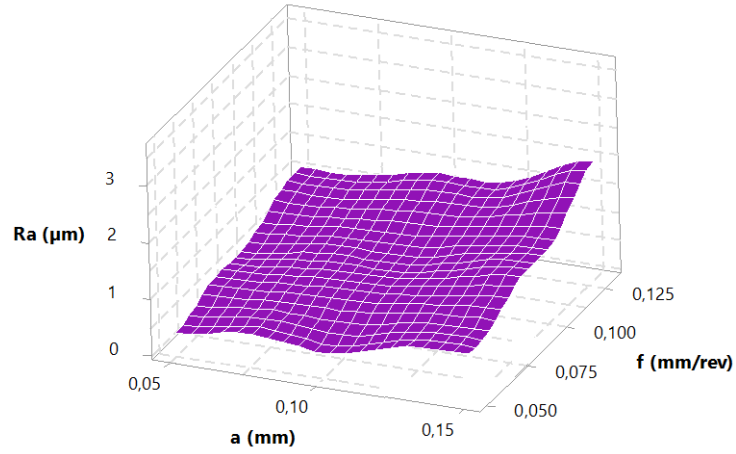
Şekil 6.5. Yüzey pürüzlülüğü, takım uç yarıçapı ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

Şekil 6.6’da düşük takım uç yarıçap değerlerinde, kesme hızından etkilenmediği, yüksek uç yarıçapında, kesme hızı artışıyla yüzey pürüzlülük değerlerinde belirgin bir artış olduğu analiz edilmiştir.



Şekil 6.6. Yüzey pürüzlülüğü, takım uç yarıçapı ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

Şekil 6.7’de düşük kesme derinliği ve düşük ilerleme değerlerinde çok iyi yüzey kalitesine ulaşılabileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.7. Yüzey pürüzlülüğü, kesme derinliği ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

## 6.2. ELEKTRİK AKIM DEĞERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

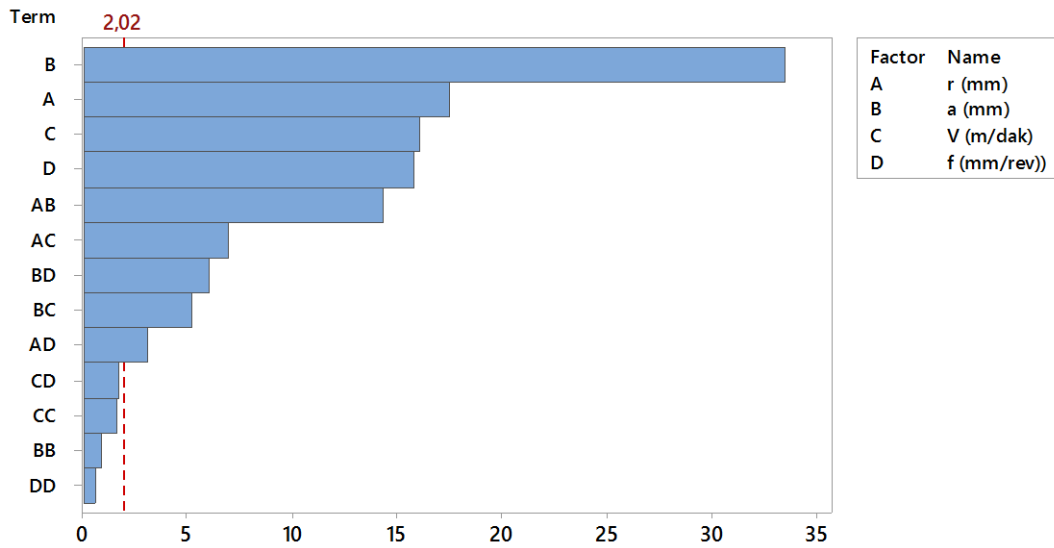
Tezgahın çektiği elektrik akımı değeri, anlık olarak ölçülmektedir. Bu sayede, akım; güç(enerji) tüketimi ve makineye binen yük miktarının en önemli göstergesi olmaktadır. CNC tezgahta, düşük ilerleme, düşük kesme derinliği ve düşük kesme hızı değerlerinde akım değeri istenildiği gibi düşük çıkmaktadır. Bu parametrelerin herhangi birinin artışıyla, tezgah zorlanacak ve dolayısıyla elektrik akım miktarı artacaktır. Buna karşın küçük uç yarıçaplık takım ile, elektrik akımı değeri artmaktadır. Yine kesme kuvvetlerinde, elektrik akımında paralel bir şekilde ilerlemenin artması ile arttığı bilinmektedir. Bu yüzden elektrik akımı takibi ile kesme kuvveti işlemleri ile uğraşmadan çok pratik bir şekilde ölçüm sağlanabilmektedir.

Çizelge 6.5'te ANOVA (varyans analizi) tablosu gösterilmiştir. Bu tabloya göre makine elektrik akımı için en etkili parametre kesme derinliği (% 48,63) olmuştur. Kesme derinliğinden sonra birbirlerine yakın değerler olan ve sırasıyla takım uç yarıçapı (% 13,18), kesme hızı (%11,19), ve ilerleme miktarı (% 10,79) elektrik akımı üzerinde etkili olan diğer parametreler olmuşlardır.

Çizelge 6.5. Elektrik akımı için ANOVA tablosu.

Kaynak	SD	Düz KT	Düz KO	F-değeri	P-değeri	% Katkı	Önem Sev.
$r$	1	0,35852	0,35852	303,54	<b>0,000</b>	<b>13,18</b>	<b>Önemli</b>
$a_p$	1	1,32250	1,32250	1119,69	<b>0,000</b>	<b>48,63</b>	<b>Önemli</b>
$V_c$	1	0,30434	0,30434	257,66	<b>0,000</b>	<b>11,19</b>	<b>Önemli</b>
$f$	1	0,29340	0,29340	248,41	<b>0,000</b>	<b>10,79</b>	<b>Önemli</b>
$a_p^2$	1	0,00083	0,00083	0,71	0,406	0,03	Önemsiz
$V_c^2$	1	0,00301	0,00301	2,55	0,118	0,11	Önemsiz
$f^2$	1	0,00041	0,00041	0,35	0,560	0,02	Önemsiz
$r \times a_p$	1	0,24338	0,24338	206,05	<b>0,000</b>	<b>8,95</b>	<b>Önemli</b>
$r \times V_c$	1	0,05680	0,05680	48,09	<b>0,000</b>	<b>2,09</b>	<b>Önemli</b>
$r \times f$	1	0,01102	0,01102	9,33	<b>0,004</b>	<b>0,41</b>	<b>Önemli</b>
$a_p \times V_c$	1	0,03227	0,03227	27,32	<b>0,000</b>	<b>1,19</b>	<b>Önemli</b>
$a_p \times f$	1	0,04250	0,04250	35,99	<b>0,000</b>	<b>1,56</b>	<b>Önemli</b>
$V_c \times f$	1	0,00350	0,00350	2,97	0,093	0,13	Önemsiz
<b>Hata</b>	40	0,04725	0,00118			1,74	
<b>Toplam</b>	53	2,71973				100,00	

Şekil 6.9'daki pareto grafiğinde de, belirgin bir şekilde kesme derinliğinin (a) en etkili parametre olduğu ve sonrasında, diğer üç parametrenin (sırasıyla r, V, f) elektrik akımından etkilendiği analiz edilmiştir.

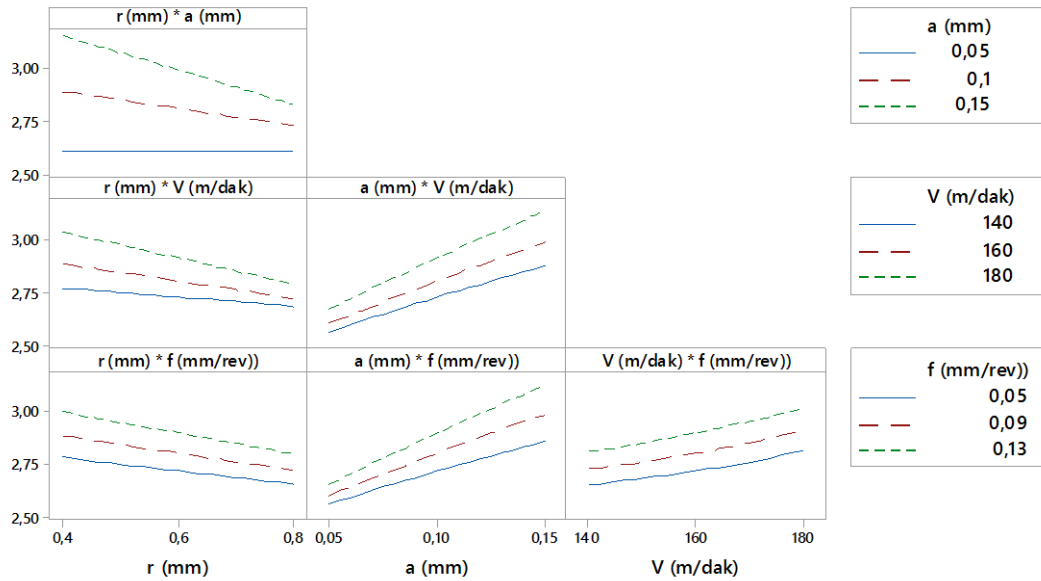


Şekil 6.8. Elektrik akımı için pareto grafiği

Şekil 6.9'daki etkileşim grafiklerinede bakılarak, takım uç yarıçapı ile kesme derinliği elektrik akımı üzerinde (%8,95) en kuvvetli etkileşimde olan parametreler olmuşlardır. Elektrik akımı için, (r x  $a_p$ ) etkileşim grafiğini incelediğimizde, yüzey pürüzlülüğü için elde edilen bu iki etkileşim parametresinin oluşturduğu grafikten



çok bir farkı olmadığı görülmektedir. Tek bir fark vardır, 0,05 mm kesme derinliği ile yapılan deneylerde, takım uç yarıçapının artması veya azalması elektrik akımını değiştirmemiştir. Diğer, daha yüksek kesme derinliği değerlerinde, yüzey pürüzlülüğündeki gibi takım uç yarıçapı büyüdüğünde, düşük elektrik akım değerlerine ulaşılmıştır ve en yüksek oranda düşüş ise, 0,15 mm kesme derinliğindeki deneylerde gerçekleşmiştir. Sonrasında ise, takım uç yarıçapı ile kesme hızı (% 2,09), kesme derinliği ve ilerleme miktarı (%1,56), kesme derinliği ile kesme hızı (% 1,19) ve takım uç yarıçapı ile ilerleme miktarı (% 0,41) etkileşimleri elektrik akım üzerindeki katkı sağlayan diğer etkileşimli parametreler olmuşlardır.

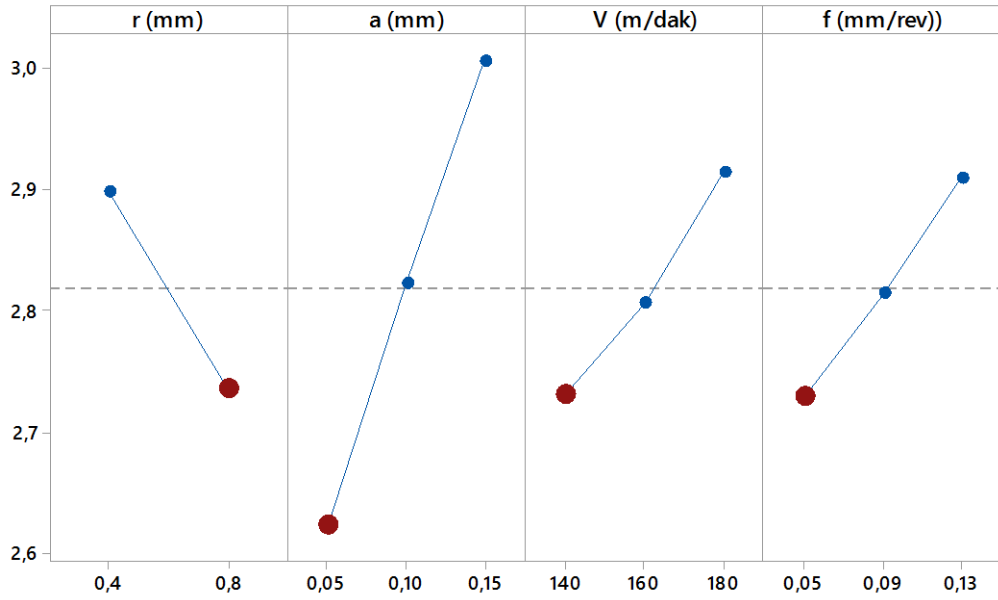


Şekil 6.9. Elektrik akımı için etkileşim grafikleri.

( $r \times V_c$ ) etkileşim parametresi incelendiğinde, küçük takım uç yarıçapından büyük takım uç yarıçapına geçildiğinde, tüm kesme hızı değerleri düşmüş ve birbirine yaklaşmıştır, en yüksek düşüşü 180 m/dak kesme hızı değeri sağlamıştır. Hem ( $a_p \times f$ ) etkileşimi parametresine, hem de ( $a_p \times V_c$ ) etkileşim grafiğine baktığımızda, düşük kesme derinliği değerinde ve düşük ilerleme miktarında elektrik akımı en düşük değerde iken, kesme derinliği ve ilerleme miktarının artması ile elektrik akımı artmıştır ve tüm ilerleme miktarı değerlerinin ortalamaları birbirinden daha uzak değerlere ulaşmıştır. ( $r \times f$ ) etkileşiminde ise tüm ilerleme miktarı

değerleri için, takım uç yarıçapı küçükten büyüğe geçtikçe, elektrik akım değeri düşmüştür.

Elektrik akımı üzerinde kesme derinliğinin optimum ve düşük değeri olan 0,05 mm ile, yüksek değeri olan 0,15 mm değeri arasında yaklaşık %15 artış gerçekleşmiştir. Elektrik akım değerinin düşük değerlerde olması istenir. Çünkü, tezgahın çektiği elektrik akımı, hem çevre hem de maliyet açısından çok büyük önem taşımaktadır.



Şekil 6.10 Elektrik akımı için ana etki grafikleri.

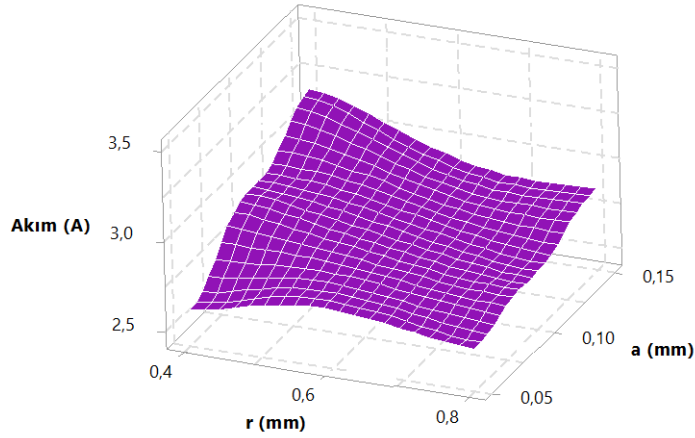
Şekil 6.10'daki ana etki grafiklere ve çizelge 6.6'daki optimim noktalara bakıldığında, optimum (minimum) elektrik akımı; büyük takım uç yarıçapı (2. Seviye - 0,8 mm), düşük kesme derinliği (1. Seviye - 0,05 mm), düşük kesme hızı (1. Seviye - 140 m/dak), düşük ilerleme miktarı (1. Seviye - 0,05 mm/dev) değerlerinde ve seviyelerinde elde edilmiştir. Ayrıca takım uç yarıçapının artması, kesme derinliğinin düşmesi, kesme hızının düşmesi ve ilerleme miktarının düşmesi elektrik akımını düşürerek, avantaj sağlamaktadır.

Çizelge 6.6 Elektrik akımı için optimum noktalar.

Kesme parametre seviyeleri	Uç yarıçapı (mm)	Kesme derinliği (mm)	Keme hızı (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/dev)
1	2,90	<b>2,62</b>	<b>2,73</b>	<b>2,73</b>
2	<b>2,74</b>	2,82	2,81	2,81
3	-	3,01	2,91	2,91
<b>Opt. Sev.</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Opt. Par.</b>	<b>0,8</b>	<b>0,05</b>	<b>140</b>	<b>0,05</b>

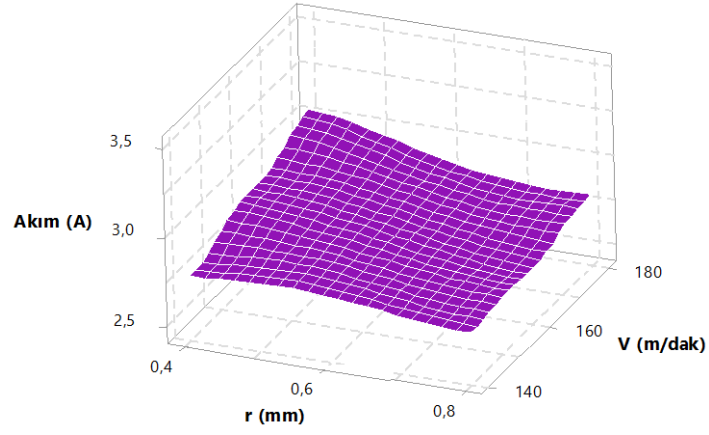
Şekil 6.11-6.15 arasındada elektrik akımı için çizilen üç boyutlu yüzey grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 6.11’de, düşük uç yarıçaplı takımıla gerçekleştirilen deneylerde, artan kesme derinliğiyle, elektrik akım değerini belirgin bir şekilde artırdığı analiz edilmiştir. Yüksek uç yarıçaplı takımıla yapılan deneylerde, artan kesme derinliği ile sınırlı miktarda elektrik akım değeri yükseldiği gözlemlenmiştir.



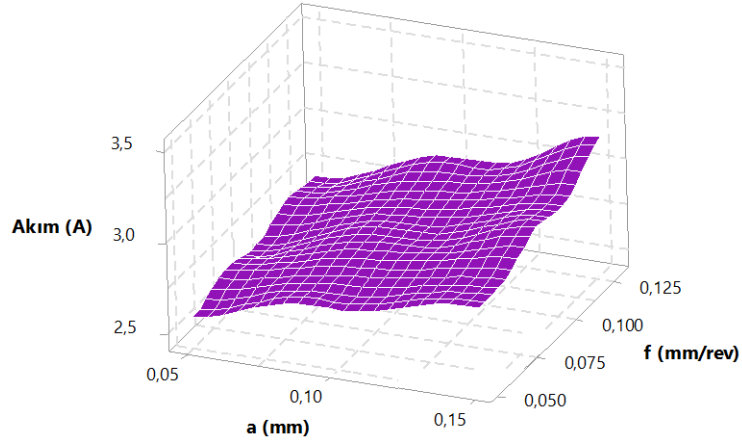
Şekil 6.11. Elektrik akımı, takım uç yarıçapı ve kesme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

Şekil 6.12’de, her iki takım uç yarıçapındada, kesme hızı artışıyla elektrik akım değerinin arttığı gözlemlenmiştir.



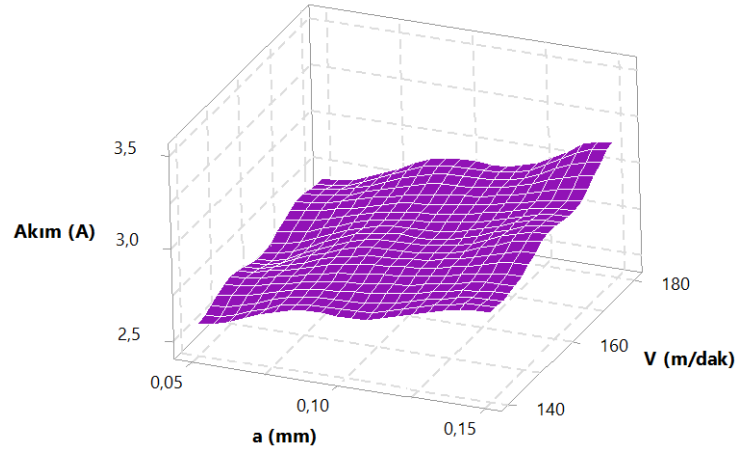
Şekil 6.12. Elektrik akımı, takım uç yarıçapı ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

Şekil 6.13'te kesme derinliği ve ilerleme miktarının artmasıyla elektrik akım değerinin arttığı görünmektedir.



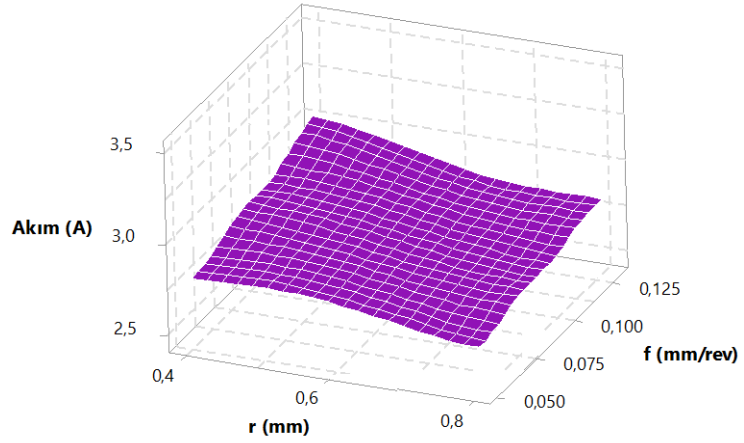
Şekil 6.13. Elektrik akımı, kesme derinliği ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

Şekil 6.14'te, kesme derinliği ve kesme hızı değerlerinin artışıyla elektrik akım değerinin artmış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.14. Elektrik akımı, kesme derinliği ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

Şekil 6.15'te düşük takım uç yarıçapı ve yüksek ilerleme miktarları için, elektrik akım değerinin artış gösterdiği analiz edilmiştir.



Şekil 6.15. Elektrik akımı, takım uç yarıçapı ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

### 6.3. SES ŞİDDETİ SEVİYESİ DEĞERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

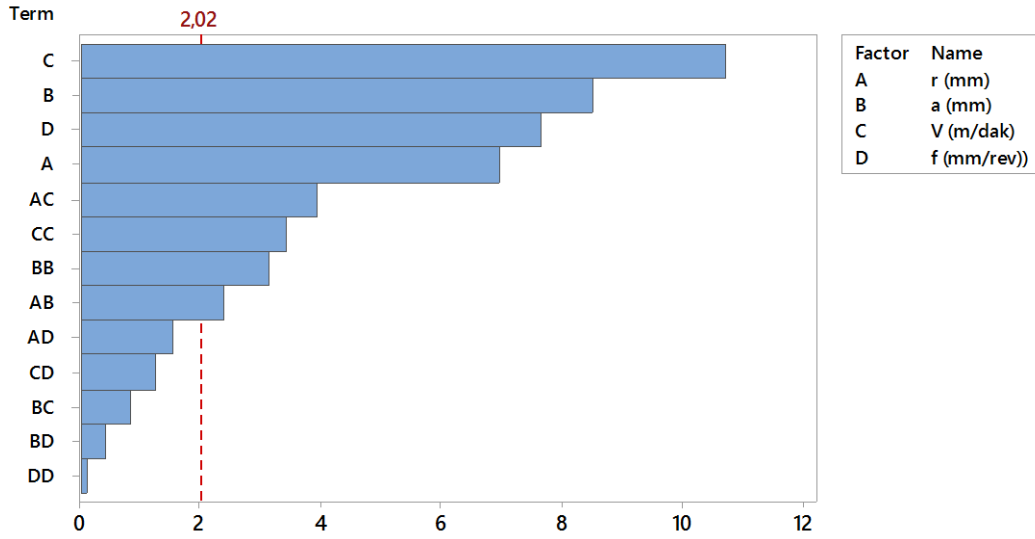
Ses şiddeti seviyesi değerleri düşük istenmektedir. Ayrıca, bu değerler birbirlerine çok yakın çıkmaktadır. Bunun nedeni, logaritmik bir değer olmasından ötürüdür. Yoksa, herhangi bir 0,1 dB değer farkında bile, çok fazla fark olduğu bilinmektedir.

Çizelge 6.7’de, ses şiddeti seviyesi için ANOVA tablosu gösterilmiştir. Ses şiddeti seviyesi üzerinde % 30,11 katkı ortanı ile kesme hızı en etkili parametre olmuştur. Kesme hızından sonra sırasıyla, kesme derinliği (% 18,97), ilerleme miktarı (% 15,36) ve takım uç yarıçapı (% 12,64) ses şiddeti seviyesi üzerinde diğer kuvvetli etkili parametreler olmuşlardır.

Çizelge 6.7. Ses şiddeti seviyesi için ANOVA tablosu.

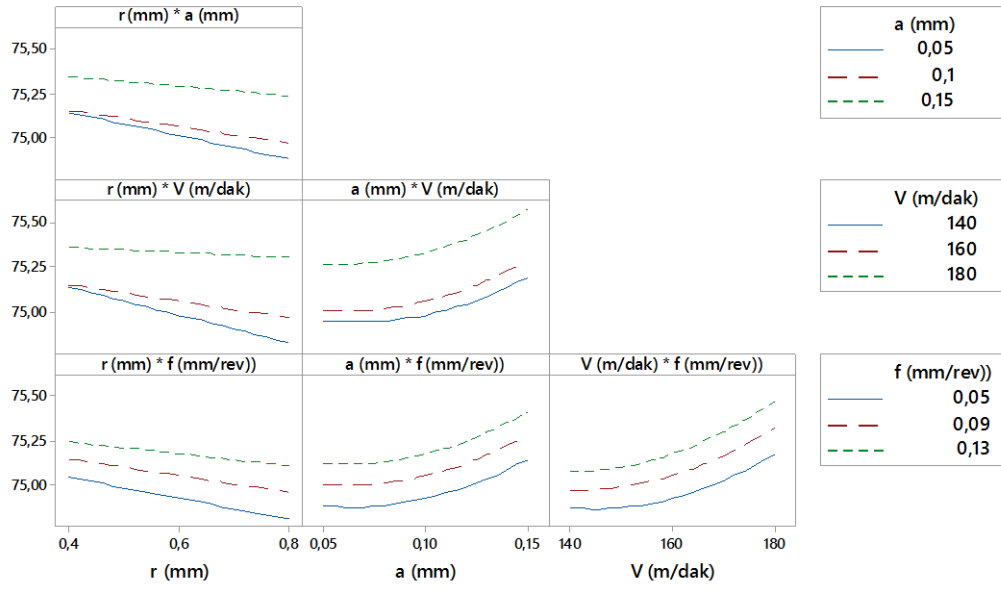
Kaynak	SD	Düz KT	Düz KO	F-değeri	P-değeri	% Katkı	Önem Sev.
$r$	1	0,46296	0,46296	48,29	<b>0,000</b>	<b>12,64</b>	<b>Önemli</b>
$a_p$	1	0,69444	0,69444	72,43	<b>0,000</b>	<b>18,97</b>	<b>Önemli</b>
$V_c$	1	1,10250	1,10250	114,99	<b>0,000</b>	<b>30,11</b>	<b>Önemli</b>
$f$	1	0,56250	0,56250	58,67	<b>0,000</b>	<b>15,36</b>	<b>Önemli</b>
$a_p^2$	1	0,09481	0,09481	9,89	<b>0,003</b>	<b>2,59</b>	<b>Önemli</b>
$V_c^2$	1	0,11343	0,11343	11,83	<b>0,001</b>	<b>3,10</b>	<b>Önemli</b>
$f^2$	1	0,00009	0,00009	0,01	0,922	0,00	Önemsiz
$r \times a_p$	1	0,05444	0,05444	5,68	<b>0,022</b>	<b>1,49</b>	<b>Önemli</b>
$r \times V_c$	1	0,14694	0,14694	15,33	<b>0,000</b>	<b>4,01</b>	<b>Önemli</b>
$r \times f$	1	0,02250	0,02250	2,35	0,133	0,61	Önemsiz
$a_p \times V_c$	1	0,00667	0,00667	0,70	0,409	0,18	Önemsiz
$a_p \times f$	1	0,00167	0,00167	0,17	0,679	0,05	Önemsiz
$V_c \times f$	1	0,01500	0,01500	1,56	0,218	0,41	Önemsiz
<b>Hata</b>	40	0,38352	0,00959			10,47	
<b>Toplam</b>	53	3,66148				100,00	

Şekil 6.16’deki pareto grafiğinde, sırasıyla; kesme hızı ( $V_c$ ), kesme derinliği ( $a$ ), ilerleme miktarı ( $f$ ) ve takım uç yarıçapının ( $r$ ) ses şiddeti seviyesinden etkilendiği analiz edilmiştir.



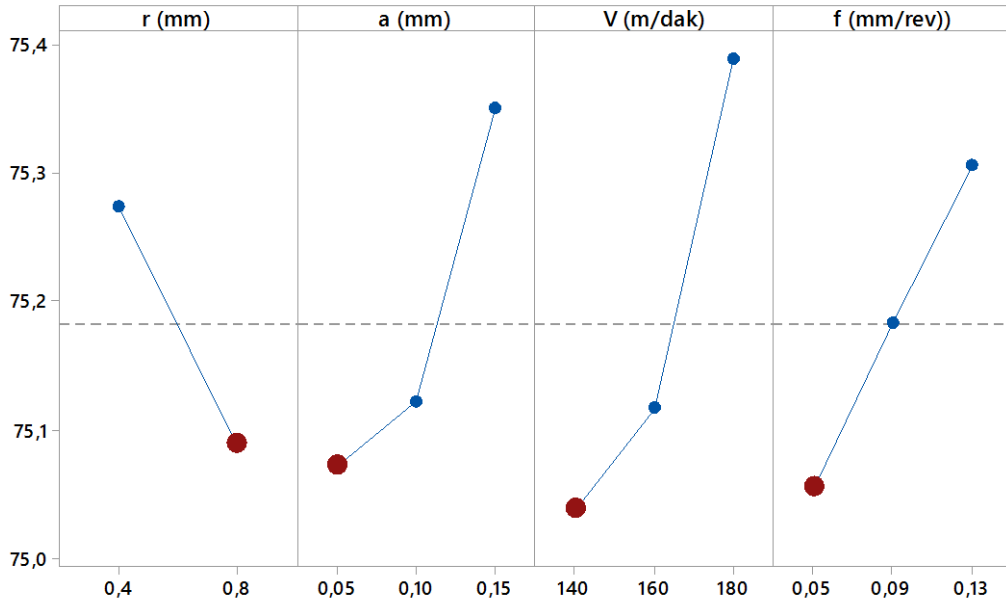
Şekil 6.16. Ses şiddeti seviyesi için pareto grafiği.

Şekil 6.17'deki etkileşim grafiklerine bakılarak, takım uç yarıçapı ile kesme hızı % 4,01 katkı oranı sunarken, takım uç yarıçapı ile kesme derinliği etkileşimi % 1,49 katkı oranı sunduğu analiz edilmiştir. Hem  $(r \times V_c)$  etkileşim parametresi, hem de  $(r \times a_p)$  etkileşim parametresi benzer bir etkileşim sergilemiştir. Her iki etkileşim parametresi içinde, düşük takım uç yarıçapı değeri olan 0,4 mm değeri için, düşük ve orta seviye kesme derinliği ve kesme hızında eşit ses şiddeti seviyesi değeri elde edilmişken, yüksek seviye kesme derinliği ve kesme hızına göre ses şiddeti seviyesi düşük olarak ölçülmüştür. Fakat takım uç yarıçapı büyüdüğünde, tüm kesme derinliği ve kesme hızında düşüş yaşanmıştır ve bu parametreler için, ses şiddeti seviyesi değerleri düşmesine rağmen, birbirinden daha uzak değerler almışlardır. Son olarak 2. Derece etkileşim sunan kesme hızı  $(V_c^2)$  ve kesme derinliği  $(a_p^2)$  sırasıyla % 3,10 ve % 2,59 oranında katkı sunmuşlardır.



Şekil 6.17. Ses şiddeti seviyesi için etkileşim grafikleri.

Ses şiddeti seviyesinin en fazla etkilendiği girdi parametresi kesme hızı olmuştur. Optimum (düşük) kesme hızı seviyesi olan 140m/dak ile yüksek kesme hızı değeri olan 180 m/dak değerlerinin ortalamaları arasında %1 bile fark oluşmamaktadır.



Şekil 6.18. Ses şiddeti seviyesi için ana etki grafikleri .

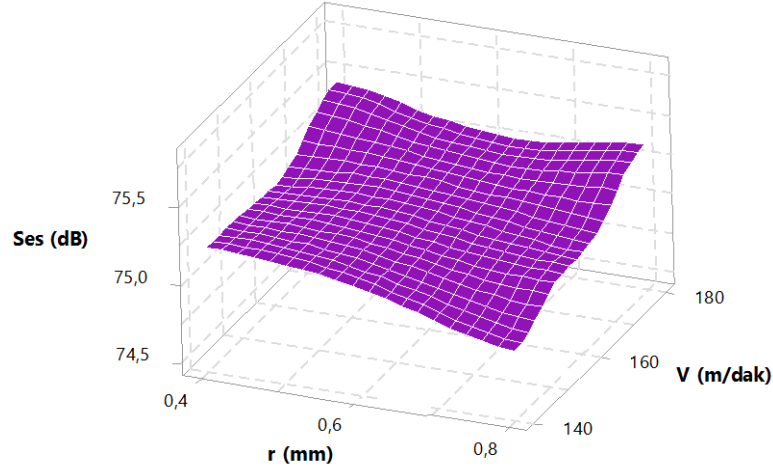


Çizelge 6.8 ve Şekil 6.18'e bakılarak, büyük uç yarıçapı (2. Seviye 0,8 mm değeri), düşük kesme derinliği (1. seviye 0,05 mm değeri), düşük kesme hızı (1. seviye 140 m/dak) ve düşük ilerleme miktarı (1. Seviye 0,05 mm/dev) değerlerinde, optimum (minumum) ses şiddeti seviyesi elde edilmektedir.

Çizelge 6. 8. Ses şiddeti seviyesi için optimum noktalar.

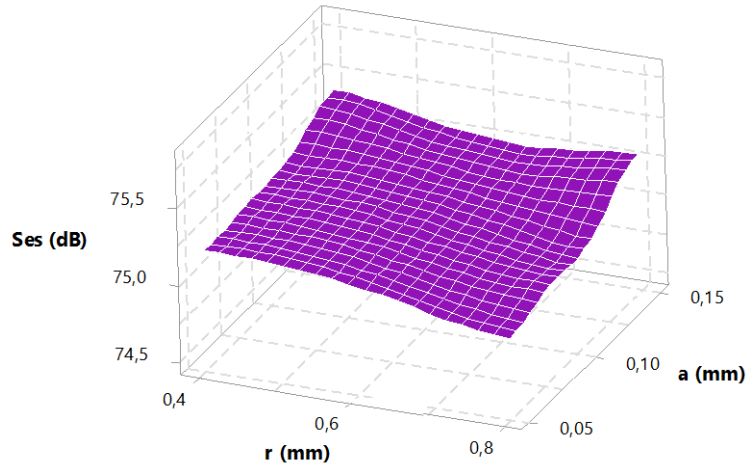
Kesme parametre seviyeleri	Uç yarıçapı (mm)	Kesme derinliği (mm)	Keme hızı (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/dev)
1	75,27	<b>75,08</b>	<b>75,04</b>	<b>75,06</b>
2	<b>75,09</b>	75,12	75,11	75,18
3	-	75,35	75,39	75,31
<b>Opt. Sev.</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Opt. Par.</b>	<b>0,8</b>	<b>0,05</b>	<b>140</b>	<b>0,05</b>

Şekil 6.19 ve şekil 6.20'de, ses şiddeti seviyesi için çizilen üç boyutlu yüzey grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Ses şiddeti seviyesi, takım uç yarıçapı ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği

Şekil 6.19'da takım uç yarıçapı ve kesme hızı grafiğinde, yüksek takım uç yarıçapında, kesme hızı artışıyla, ses şiddeti seviyesi değeri açık bir şekilde artmıştır. Düşük takım uç yarıçapında 140 ve 160 m/dak'lık kesme hızı değerlerinde ses şiddeti seviyesinden etkilenmediği ve 180 m/dak'lık kesme hızı değerlerine çıkıldığında ise bariz bir şekilde, ses şiddeti seviyesi arttığı analiz edilmiştir.



Şekil 6.20. Ses şiddeti seviyesi, takım uç yarıçapı ve kesme derinliği için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği

Şekil 6.20’de, takım uç yarıçapı ve kesme derinliği grafiğinde, her iki takım uç yarıçapındada, kesme derinliği artışıyla, ses şiddeti seviyesi değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

#### 6.4. ENERJİ TÜKETİMİ DEĞERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

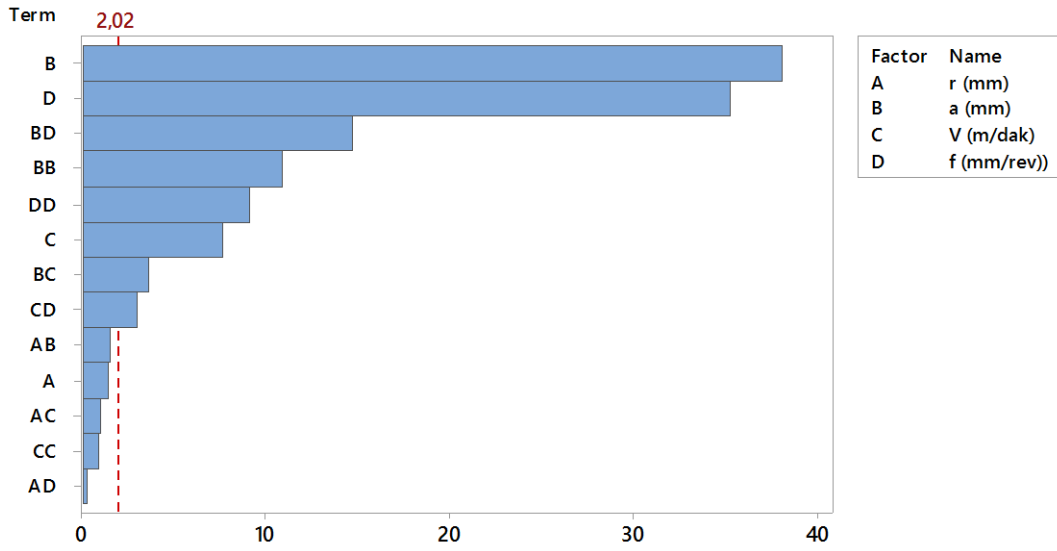
Çizelge 6.9. Enerji tüketimi için ANOVA tablosu.

Kaynak	SD	Düz KT	Düz KO	F-değeri	P-değeri	% Katkı	Önem Sev.
$r$	1	1,94	1,94	2,16	0,150	0,07	Önemli
$a_p$	1	1307,15	1307,15	1453,35	0,000	44,82	Önemli
$V_c$	1	53,08	53,08	59,01	0,000	1,82	Önemli
$f$	1	1118,96	1118,96	1244,10	0,000	38,36	Önemli
$a_p^2$	1	106,20	106,20	118,07	0,000	3,64	Önemli
$V_c^2$	1	0,80	0,80	0,89	0,352	0,03	Önemli
$f^2$	1	75,04	75,04	83,44	0,000	2,57	Önemsiz
$r \times a_p$	1	2,09	2,09	2,32	0,135	0,07	Önemli
$r \times V_c$	1	0,88	0,88	0,98	0,328	0,03	Önemli
$r \times f$	1	0,04	0,04	0,04	0,833	0,00	Önemsiz
$a_p \times V_c$	1	12,02	12,02	13,36	0,001	0,41	Önemli
$a_p \times f$	1	194,59	194,59	216,35	0,000	6,67	Önemli
$V_c \times f$	1	7,94	7,94	8,82	0,005	0,27	Önemli
Hata	40	35,98	0,90			1,23	
Toplam	53	2916,70				100,00	

Elektrik akımı ölçümü ile, kullanılan CNC tezgahın, enerji tüketimini elde etmek mümkündür. Elektrik akımı ile, enerji tüketimi arasında her ne kadar doğru bir orantı

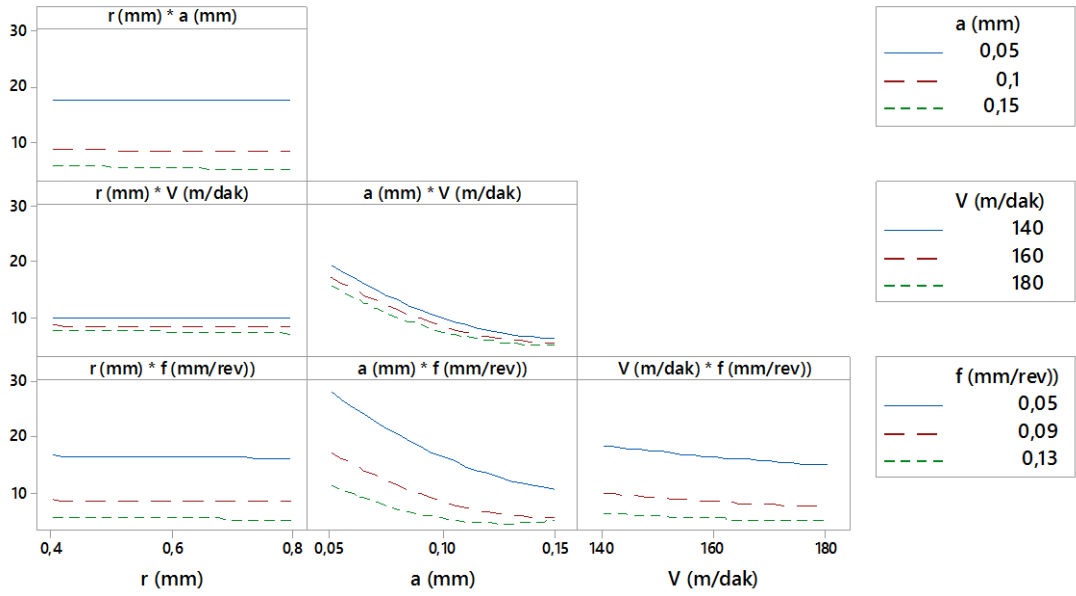
olduğu bilinse de, aslında tezgahın enerji tüketim değerini hesaplamak için, çıkartılacak malzeme miktarı her bir işlem için eşit olacağından, çok paso yani kesme derinliği düşük olan deneyler, çok daha fazla enerji sarfiyatına yol açmış olacaktır.

Çizelge 6.9’da ANOVA tablosu gösterilmiştir. Bu tabloya göre enerji tüketimi üzerinde % 48,63 katkı oranı ile en etkili parametre, kesme derinliği olarak tespit edilmiştir. Kesme derinliğine %38,36 katkı oranı ile çok yakın olan ilerleme miktarında enerji tüketimi üzerinde kuvvetli bir etki sağlamıştır.



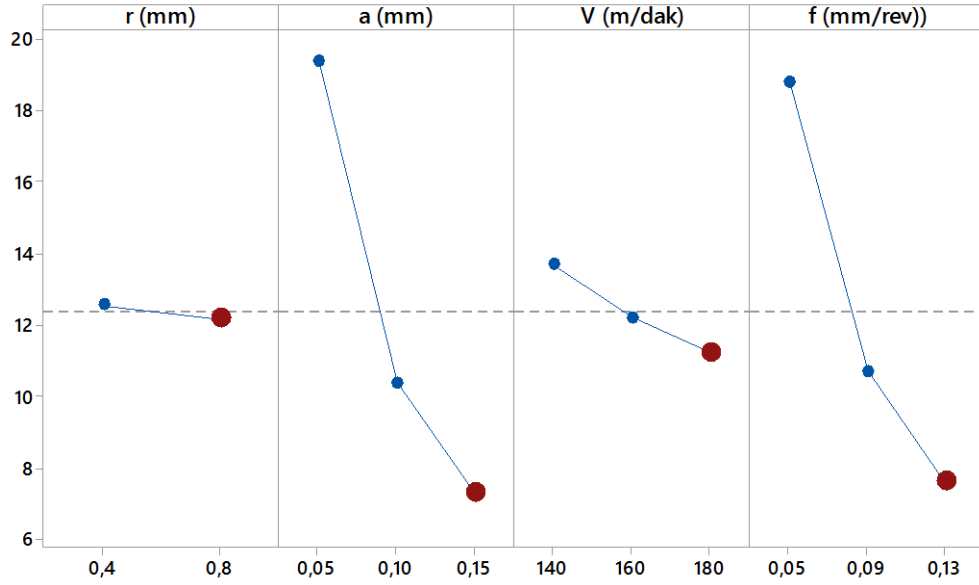
Şekil 6.21. Enerji tüketimi için pareto grafiği.

Şekil 6.21’deki pareto grafiği incelendiğinde, kesme derinliği (a) ve ilerleme miktarının (f), enerji tüketiminden çok fazla etkilendiği görülmektedir. Ayrıca, kesme hızınınında, hatırı sayılır miktarda enerji tüketimi üzerinde etkili olduğu görünürken, takım uç yarıçapının, enerji tüketimi üzerinde etkili olmadığı analiz edilmiştir.



Şekil 6.22. Enerji tüketimi için etkileşim grafikleri.

Şekil 6.22'deki etkileşim grafiklerinede bakılarak, kesme derinliği ile ilerleme miktarlarının etkileşimi (% 6,67) ve bu parametrelerin 2. dereceden etkileşimleri, sırası ile enerji tüketiminin etkilendiği parametreler olmuşlardır. Sonrasında, kesme derinliği ile kesme hızı etkileşimi (% 0,41) ve kesme hızı ile ilerleme oranı etkileşimi (% 0,27) enerji tüketimi üzerinde azda olsa katkı sunan parametreler olduğu analiz edilmiştir. ( $a_p \times f$ ) etkileşim grafiği incelendiğinde, düşük kesme derinliği olan 0,05 mm değerinde, tüm ilerleme miktarı değerlerinde enerji tüketimi yüksekken, yüksek kesme derinliğinde (0,15 mm) enerji tüketimi düşmektedir ve tüm bu değerler birbirine yakınlaşmaktadır. Hatta yüksek ve orta seviyedeki ilerleme miktarları 0,15 mm kesme derinliğinde, neredeyse aynı değerdedir. Yani yüksek kesme derinliği ve ilerleme miktarı, enerji tüketimine avantaj sağlamıştır. Bununda en büyük nedeni, enerji tüketimi hesabı yapılırken, eşit miktarda talaş kaldırılması gerektiğidir.



Şekil 6.23. Enerji tüketimi için ana etki grafikleri.

Enerji tüketiminde, diğer çıktı parametreleri gibi düşük olmasını isteriz. Çünkü, günümüzde enerji tüketiminin doğurduğu sonuçlar çok önemlidir. Takım uç yarıçapının enerji tüketimi üzerinde, neredeyse hiç bir etkisi olmadığı, şekil 6.23'teki ana etki grafiğinden analiz edilmiştir. Artan kesme derinliği ile, enerji tüketiminin % 165 oranında düştüğü, analiz edilmiştir ve en fazla değişim kesme derinliğinde gözlemlendiği için enerji tüketimi en çok bu parametreden etkilenmiştir. Sonrasında ise yakın değerde olan % 146 oranında düşen ilerleme miktarı, enerji tüketiminden etkilenen diğer önemli parametre olmuştur.

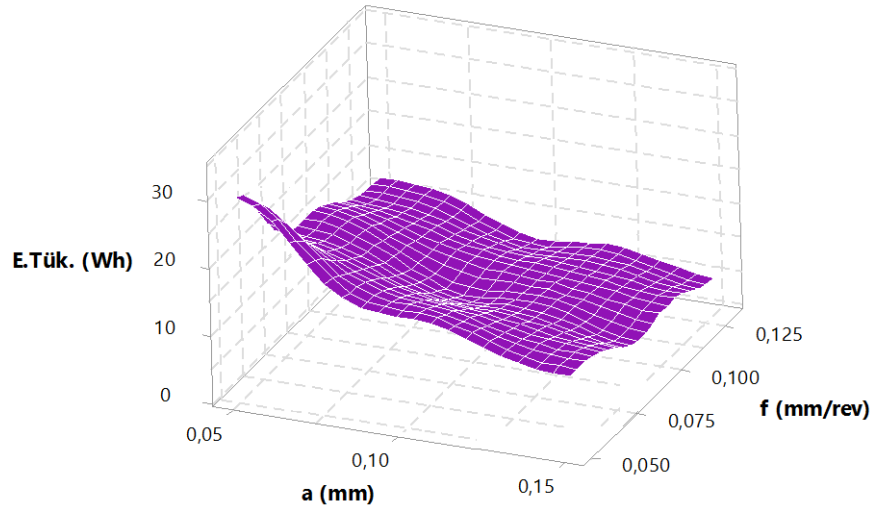
Çizelge 6.10. Enerji tüketimi için optimum noktalar.

Kesme parametre seviyeleri	Uç yarıçapı (mm)	Kesme derinliği (mm)	Keme hızı (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/dev)
1	12,56	19,39	13,67	18,78
2	<b>12,18</b>	10,38	12,20	10,70
3	-	<b>7,33</b>	<b>11,24</b>	<b>7,63</b>
<b>Opt. Sev.</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>Opt. Par.</b>	<b>0,8</b>	<b>0,15</b>	<b>180</b>	<b>0,13</b>

Çizelge 6.10'daki tablodan, optimum parametre ve optimum seviyeye değerleri çıkartılmıştır. Optimum (minimum) enerji tüketimi; 12,18 Wh ortalama enerji tüketim değeri ile büyük takım uç yarıçapı (2. Seviye 0,8 mm), 7,33 Wh ortalama tüketim değeri ile yüksek kesme derinliği (3. Seviye 0,15 mm), 11,24 Wh ortalama

tüketim değeri ile yüksek kesme hızı (3. Seviye 180 m/dak), 7,63 Wh ortalama tüketim değeri ile yüksek ilerleme miktarı (3. Seviye 0,13 mm/dev) değerlerinde ve seviyelerinde elde edilmiştir.

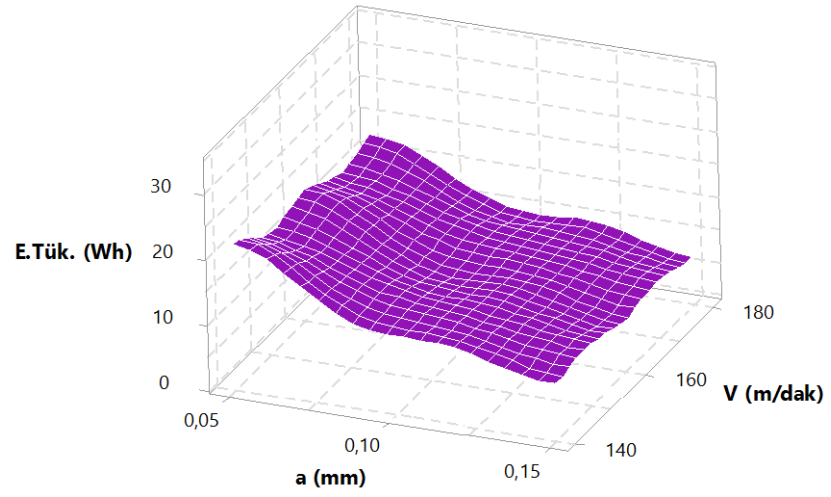
Şekil 6.24-6.26 arasında, enerji tüketimi için çizilen üç boyutlu yüzey grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 6.24. Enerji tüketimi, kesme derinliği ve ilerleme için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

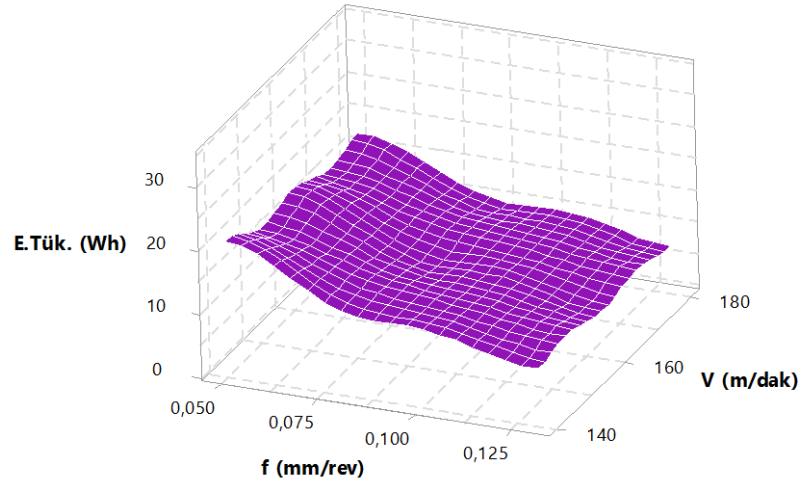
Şekil 6.24'te kesme derinliği ve ilerleme değerlerindeki artışla enerji tüketim değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Yüksek kesme derinliğinde ilerlemenin belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlenirken, düşük kesme derinliğinde ilerlemenin artışıyla enerji tüketim değerleri çok belirgin olarak düştüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 6.25'te kesme derinliği artışıyla düşen enerji tüketiminin, kesme hızı değerlerinin artışıyla belirgin bir etkisi olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.25. Enerji tüketimi, kesme derinliği ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

6.26'da yine artan ilerleme ile enerji tüketim değerinin düştüğü ve buna rağmen, kesme hızının önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 6.26. Enerji tüketimi, ilerleme ve kesme hızı için çizilen üç boyutlu yüzey grafiği.

## 6.5. REGRESYON DENKLEMLERİ

Girdi (işleme parametreleri veya bağımsız değişkenler) ve çıktı parametreleri (yanıt değişkenleri veya bağımlı değişkenler) arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için, çoklu regresyon analizi yapılmıştır ve her bağımlı değişken için hesaplanmıştır.  $R^2$  determinasyon (belirlilik) katsayıları kullanılarak, regresyon denklemleri ile oluşturulan tahmini modelin geçerliliğini, test etme imkanı sağlamış oluruz ve  $R^2$  determinasyon katsayısı 6.9 eşitliğinden hesaplanabilmektedir.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{artık}}{SS_{model} + SS_{artık}} \quad (6.9)$$

$R^2$  Yüzey pürüzlülüğü için % 97,26, enerji tüketimi için % 98,77, elektrik akımı için % 98,26 ve ses yoğunluğu seviyesi için % 89,53 hesaplanmıştır.

Her bağımlı değişken için regresyon katsayı değerleri belirlenmiştir ve ikinci dereceden bir polinom modeli oluşturulmuştur. Tahmin edilen bağımlı değişkenler için bağımsız değişkenler ve regresyon katsayıları hesaplanmıştır. Her bir çıktı parametresi (yüzey pürüzlülüğü, ses şiddeti, elektrik akımı ve enerji tüketimi) için, çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Modellenen Eşitlik 6.10'de sunulmuştur.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 a_p + \beta_3 V_c + \beta_4 f + \beta_{22} a^2 + \beta_{33} V_c^2 + \beta_{44} f^2 + \beta_{12} (r * a_p) + \beta_{13} (r * V_c) + \beta_{14} (r * f) + \beta_{23} (a_p * V_c) + \beta_{24} (a_p * f) + \beta_{34} (V_c * f) \quad (6.10)$$

Y bağımlı değişkenleri (cevap parametreleri) temsil ederken, a (kesme derinliği), V (kesme hızı), f (ilerleme hızı) bağımsız değişkenleri (girdi faktörleri) göstermektedir. Matematiksel modeller oluşturmak için sabit bir değer ( $\beta_0$ ) ve bunun yanında doğrusal ( $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ), 2.Dereceden ( $\beta_{22}, \beta_{33}, \beta_{44}$ ) ve etkileşimli ( $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{23}, \beta_{24}, \beta_{34}$ ) girdi parametreleri için regresyon katsayı değerleri belirlenmiştir.

Çoklu regresyon analizi sonucuna göre, yüzey pürüzlülük değerinin regresyon modeli eşitlik 6.11'de çıkartılmıştır.



$$\begin{aligned}
Ra = & -0,76 + 7,86r + 1,69a_p - 0,0256V_c + 15,75f + 60,6a_p^2 & (6.11) \\
& + 0,000128V_c^2 + 55,0f^2 - 36,36(r * a_p) - 0,02660(r * V_c) \\
& - 30,87(r*f) + 0,0583(a_p * V_c) + 58,3(a_p*f) - 0,0057(V_c*f)
\end{aligned}$$

Elektrik akımı değerinin regresyon modeli eşitlik 6.12'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
A = & 2,170 + 2,201r + 1,67a_p - 0,00714V_c - 1,61f - 3,33a_p^2 & (6.12) \\
& + 0,000040V_c^2 + 3,65f^2 - 8,222(r * a_p) - 0,00993(r * V_c) \\
& - 2,187(r*f) + 0,0366(a_p * V_c) + 21,04(a_p * f) + 0,01510(V_c*f)
\end{aligned}$$

Elektrik akımı değerinin regresyon modeli eşitlik 6.13'de sunulmuştur.

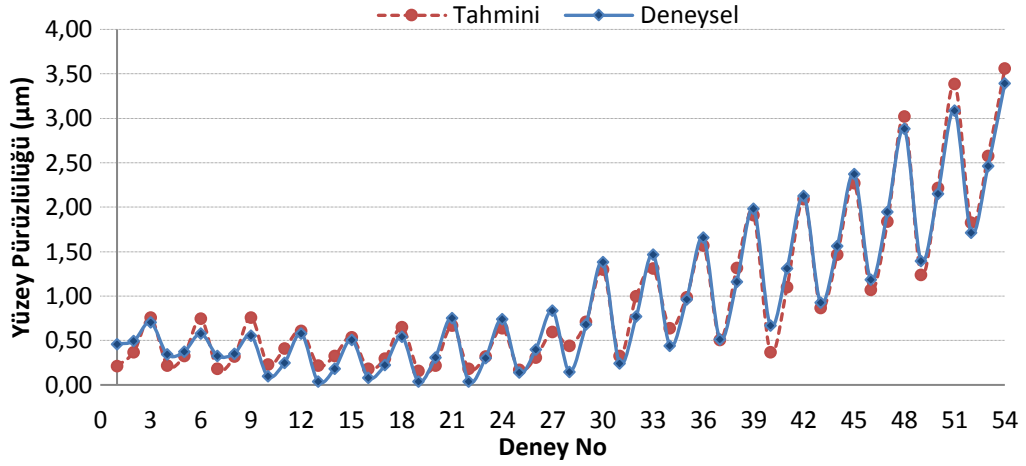
$$\begin{aligned}
S = & 82,63 - 3,689r - 9,71a_p - 0,0831V_c - 3,85f + 35,6a_p^2 & (6.13) \\
& + 0,000243V_c^2 - 1,7f^2 + 3,89(r * a_p) + 0,01597(r * V_c) \\
& + 3,13(r * f) + 0,0167(a_p * V_c) + 4,17(a_p * f) + 0,0312(V_c * f)
\end{aligned}$$

Elektrik akımı değerinin regresyon modeli eşitlik 6.14'de sunulmuştur.

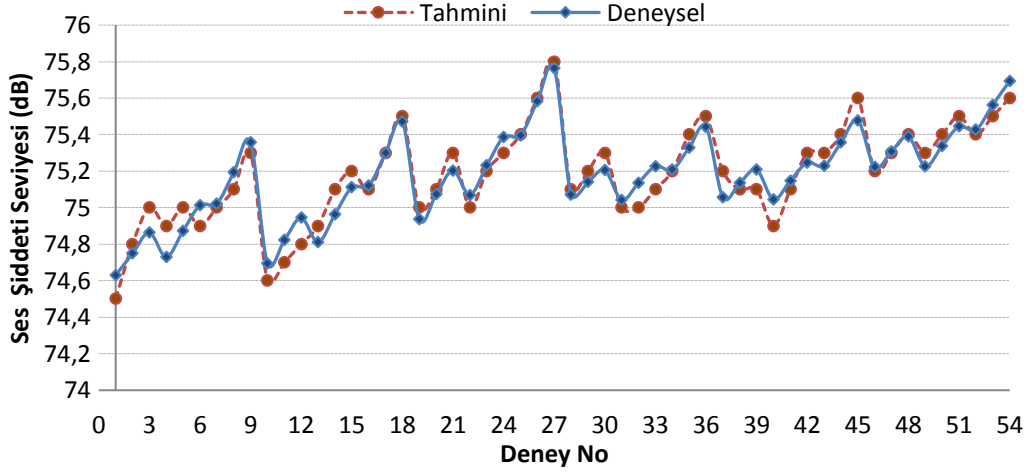
$$\begin{aligned}
E = & 114,0 + 7,34r - 585,4a_p - 0,379V_c - 680,6f + 1190a_p^2 & (6.14) \\
& + 0,000644V_c^2 + 1563f^2 - 24,1(r * a_p) - 0,0391(r * V_c) \\
& + 4,2(r * f) + 0,708(a_p * V_c) + 1423,7(a_p * f) + 0,719(V_c * f)
\end{aligned}$$

## 6.6. DENEY SONUÇLARI İLE TAHMİNİ MATEMATİKSEL MODELİN KARŞILAŞTIRILMASI

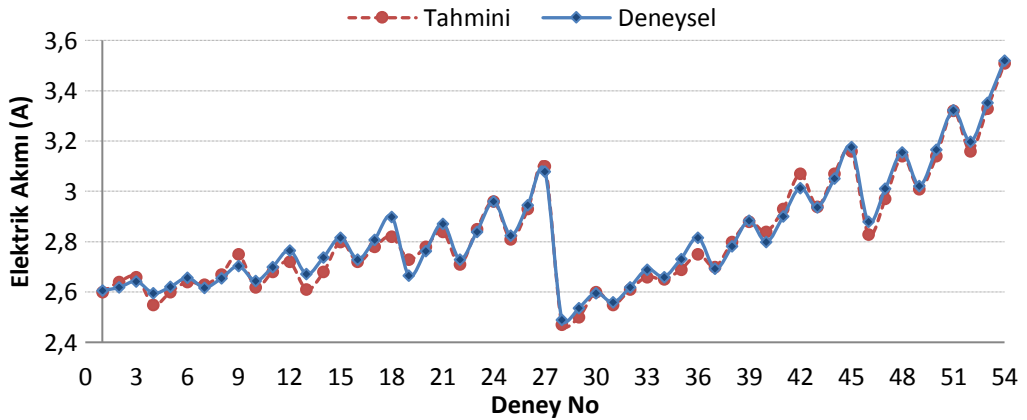
Şekil 6.18 - 6.21 deney sonuçları ile tahmini matematiksel model sonuçlarının karşılaştırmalarını ifade etmektedir. Deneysel sonuçlar mavi ve matematiksel (tahmin) modeller kırmızı ile gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi bu değerler birbirine çok yakındır ve aralarında önemli bir fark yoktur. Ayrıca, R<sup>2</sup> determinasyon katsayısı değerlerinin, istenildiği gibi yüksek değerler sağladığı görülmüştür. Bu yüksek değerler, matematiksel model değerlerinin deneysel verilere benzer sonuçlar üreteceğini göstermektedir.



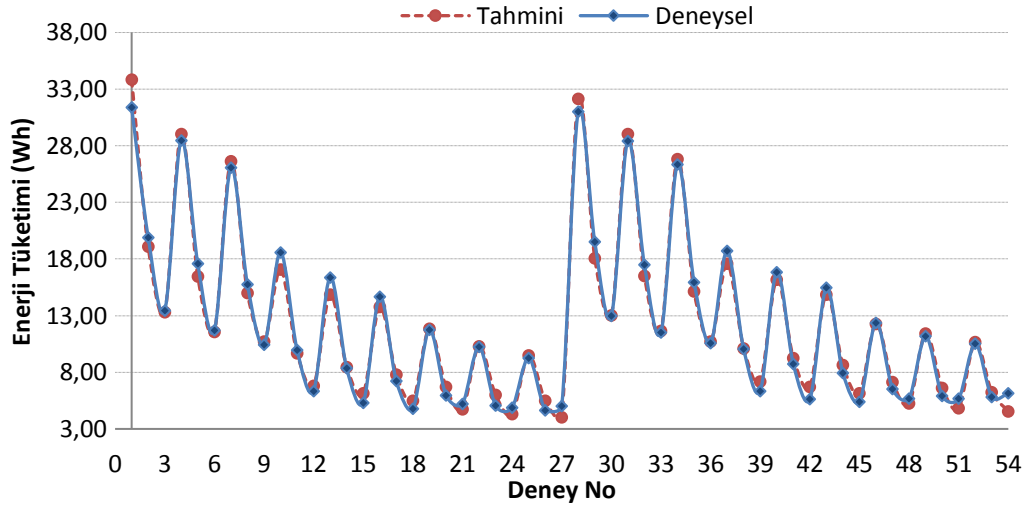
Şekil 6.27. YüzeY pürüzlülüğü için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştıırılması



Şekil 6.28. Ses şiddeti seviyesi için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştıırılması



Şekil 6.29. Elektrik akımı için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştıırılması



Şekil 6.30. Enerji tüketimi için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştırılması

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 7.1. SONUÇLAR

DIN 1.2343 sıcak iş takım çeliğinin, iki farklı takım uç yarıçaplı (0,4mm ve 0,8mm) PVD kaplı karbür takımların, sert tornalanması üzerinde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmada, girdi faktörleri olan kesme derinliği, kesme hızı, ilerleme miktarı ve takım uç yarıçapı ile çıktı değişkenleri olan yüzey pürüzlülüğü, ses şiddeti seviyesi, elektrik akımı ve enerji tüketimi arasındaki ilişki, deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu yapılan çalışmadan, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Yapılan analizlerde, her bir çıktı parametresi için ANOVA tabloları ve pareto grafikleri oluşturulmuştur ve bu grafik ve tablolardan elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için kesme hızı önemli bir etkiye sahip değilken, takım uç yarıçapı ve ilerleme miktarı en etkili, ve talaş derinliği diğer etkili parametreler olmuşlardır. Ses şiddeti için en etkili parametre kesme hızı ve sonrasında talaş derinliğidir. Elektrik akımı için ise en etkili parametre, talaş derinliği ve sonrasında sırasıyla takım uç yarıçapı, kesme hızı ve ilerleme miktarı yakın öneme sahip parametreler olmuşlardır. Enerji tüketimi için takım uç yarıçapı ve kesme hızının etkileri önemsizken, kesme derinliği ve ilerleme miktarının çok kuvvetli etkiye sahip oldukları, analiz edilmiştir.
2. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan, takım uç yarıçapı ile birlikte diğer üç kesme parametresi etkileşimleri ( $r \times a_p$ ,  $r \times V_c$ ,  $r \times f$ ) ve kesme derinliği ile ilerleme miktarı etkileşimi ( $a_p \times f$ ) önemli etkileşim parametreleridir. Kesme hızı ve ilerleme etkileşimi dışındaki tüm etkileşim parametreleri ( $r \times a_p$ ,  $r \times V_c$ ,  $r \times f$ ,  $a_p \times f$ ,  $a_p \times V_c$ ) elektrik akımı değerinden etkilendiği analiz

edilmiştir. Ses şiddeti seviyesi için takım uç yarıçapı ile etkileşimde bulunan sırasıyla kesme hızı ve kesme derinliği ( $r \times V_c$ ,  $r \times a_p$ ) farklı katkı oranları ile önemli etkileşim parametreleri olmuştur. Enerji tüketimi için ise sırasıyla, kesme derinliği ile ilerleme miktarı etkileşimi ( $a_p \times f$ ) ve kesme derinliği ile kesme hızı etkileşimi ( $a_p \times V_c$ ) önemli etkileşim parametreleri olarak elde edilmiştir.

3. İkinci dereceden etkileşim parametreleri, yüzey pürüzlülüğü için kesme derinliği ( $a_p^2$ ), ses şiddeti seviyesi için kesme hızı ( $V_c^2$ ) ardından kesme derinliği ( $a_p^2$ ) ve enerji tüketimi için ise sırasıyla kesme derinliği ( $a_p^2$ ) ve ilerleme miktarı ( $f^2$ ) olmuştur. Elektrik akımı için, herhangi bir ikinci dereceden etkileşim parametresi bulunmamaktadır.
4. Her bir çıktı parametresi üzerinde, girdi parametrelerinin önemli olan etkileşimleri için üç boyutlu yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler incelenerek önemli çıkarımlar yapılmıştır. Takım uç yarıçapı azaldıkça; elektrik akım değeri, yüzey pürüzlülüğü ve ses şiddeti seviyesi değerleri artmıştır. Takım uç yarıçapı değerinin, enerji tüketim miktarını çok fazla etkilememesine rağmen, yinede uç yarıçapı azaldıkça, arttığı analiz edilmiştir. Diğer girdi parametreleri ( $a_p, V_c, f$ ) arttıkça; elektrik akım değeri, yüzey pürüzlülüğü ve ses şiddeti seviyesi değerleri artmıştır. Enerji tüketim miktarı ise, artan kesme parametre ( $a_p, V_c, f$ ) değerleri ile, azaldığı sonucuna varılmıştır.
5. Tüm optimum (minimum) çıktı parametre değerleri için (enerji tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, elektrik akımı, ses şiddeti seviyesi) büyük takım uç yarıçapı, optimum girdi faktör seviyesi olarak belirlenmiştir. Yüksek kesme derinliği, yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme miktarı değerlerinde ve seviyelerinde, optimum enerji tüketim değerleri elde edilmiştir. Fakat, optimum elektrik akımı, optimum yüzey pürüzlülüğü ve optimum ses şiddeti seviyesi değerlerine, tam tersi düşük kesme parametre ve seviyelerindeki değerler ile

ulaşmıştır. Bu durumun en önemli sebebi, enerji tüketimi hesabında, malzemenin eşit seviyede talaş kaldırma oranına sahip olması gerektiğidir.

6. Yüzey pürüzlülük değerlerini incelediğimizde, 0,8 mm'lik uç yarıçaplı takımla gerçekleştirilen deneylerdeki sonuçlar dar bir aralıkta (0,16-0,76  $\mu\text{m}$ ) çıkmıştır. Fakat daha düşük uç yarıçaplık (0,4 mm) takım seçilerek yapılan deneylerde, değerler hem çok daha kötü hemde geniş bir aralıkta belirlenmiştir. Bu nedenle 50 HRC sertlik değerindeki malzemenin sert tornalama işlemleri için 0,8 mm takım uç yarıçaplı PVD kaplı karbür takımın pahalı takımlara alternatif olabileceği analiz edilmiştir. Öte yandan 0,4 mm takım uç yarıçaplık aynı takım kullanımı için benzer görüşte olmak mümkün olmamıştır.
7. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde, çoğu çalışmada en etkili parametre, ilerleme miktarı olmasına rağmen, ek olarak girdi faktörü, takım uç yarıçapı seçildiğinde ise, yüzey pürüzlülük üzerinde en etkili parametre takım uç yarıçapı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada da takım uç yarıçapından sonraki etkili parametre yine ilerleme miktarı olmuştur. Yapılan analizde, büyük takım uç yarıçapı, düşük ilerleme hızı, düşük kesme hızı ve düşük kesme derinliği ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Ra için % 97,26'lık bir determinasyon değeri elde edilmiştir. Ayrıca, regresyon denklemleri ile matematiksel model oluşturulmuştur ve oluşturulan bu model ile gerçek deney sonuçları arasında kayda değer bir fark olmadığı, grafiklerde sunulmuştur.
8. Tüm deney sonuçları incelendiğinde, 74,5–75,8 dB değerleri arasında ölçülen ses şiddeti seviyesi üzerinde, yüksek takım uç yarıçapı (75,09 dB), düşük kesme hızı (75,04 dB), düşük ilerleme miktarı (75,06 dB) ve düşük kesme derinliği (75,08 dB) seviye ve değerlerinde, minimum ses şiddeti seviyeleri elde edilmiştir. Artan kesme hızları ile, tezgahtan gelen ses şiddeti seviyesinin, önemli ölçüde arttığı analiz edilmiştir. Ses şiddeti seviyesi için belirleme katsayısı %89,53 olarak elde edilmiştir ve regresyon denklemleri ile tahmini bir model oluşturulmuştur. Bu tahmini model ve deney sonuçları karşılaştırıldığında da, birbirine yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

9. Ses şiddeti seviyesi, yüzey pürüzlülüğü ve elektrik akımı üzerinde, takım uç yarıçapı dışındaki kesme parametrelerini incelediğimizde, doğru orantılı bir şekilde, artan kesme parametreleri ile bu üç çıktı değerinin arttığı analiz edilmiştir. Enerji tüketimi değerleri üzerinde yapılan analizde ise, bu parametrelerin ters orantılı bir şekilde, artan kesme parametreleri ile, enerji tüketimi değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni, enerji tüketiminin hesaplanması için, talaş kalınlığının eşit miktarda çıkarılması gerekliliğidir. Bu nedenle, daha düşük kesme derinliği için, daha uzun işleme süreleri ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde, düşük kesme hızı ve düşük ilerleme oranında, işleme süresi uzamıştır ve dolayısıyla enerji tüketim miktarı artmıştır. Hem elektrik enerjisi, hemde enerji tüketimi üzerinde en etkili parametre kesme derinliği olarak analiz edilmiştir. Determinasyon katsayısı değeri, elektrik enerjisi için % 98,26 iken, enerji tüketimi için % 98,77 değeridir. Her iki çıktı parametresi için regresyon denklemleri çıkartılmış, bir tahmini matematiksel model oluşturulmuştur. Gerçek deney sonuçları ile tahmini modeller arasında, her iki çıktı parametresi için belirgin bir fark oluşmamıştır.

## 7.2. ÖNERİLER

1. Uygun enerji tasarrufu ile çevre maksimum seviyede korunabilir. Enerji tasarrufu için enerji tüketimi en aza indirilmelidir. Bu doğrultuda, enerji tüketimini azaltmak için kesme parametre değerleri optimum seviyelere getirilerek, işleme süresi kısaltılabilir. Düşük enerji tüketiminin yanı sıra, malzeme iyi bir yüzey kalitesi ile işlenmelidir. İyi bir yüzey kalitesi için, optimum takım uç yarıçapı ve düşük bir ilerleme miktarı gerekmektedir. Gelecekte sürdürülebilir ve sağlıklı bir yaşam için bu tür çalışmalara hız verilmelidir.
2. Ses şiddeti seviyesi ölçümlerinin yapılması, hem bize imalatla ilgili bazı verileri tahmin etmemize, hem de çalışanların sağlığını korumamız açısından önem teşkil etmektedir. Bu yüzden ses şiddeti seviyesi ölçümü, oldukça pratik ve ucuz bir yöntemdir ve ileriki çalışmalarda da başarı ile kullanılabilir.

3. Sert tornalama işlemlerinde, 0,8 mm değerinden daha geniş takım uç yarıçapları seçilerek, çıktı parametrelerinin üzerinde nasıl tepkiler verdiği analiz edilebilir.
4. Deneilerde kullanılan sıcak iş takım çeliğini veya diğer takım çelikleri, farklı talaşlı işleme metodlarında veya farklı soğutma uygulamalarında karşılaştırmaları yapılabilir.



## KAYNAKLAR

1. Fernando, W. L. R., Karunathilake, H. P., and Gamage, J. R., "Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review", *Cleaner Engineering And Technology*, 3: 100100 (2021).
2. Nayak, M., Sehgal, R., and Kumar, R., "Investigating machinability of AISI D6 tool steel using CBN tools during hard turning", *Materials Today: Proceedings*, 47: 3960–3965 (2021).
3. Neugebauer, R., Schubert, A., Reichmann, B., and Dix, M., "Influence exerted by tool properties on the energy efficiency during drilling and turning operations", *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 4 (2): 161–169 (2011).
4. Camposeco-Negrete, C., de Dios Calderón Nájera, J., and Miranda-Valenzuela, J. C., "Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (5–8): 1341–1347 (2016).
5. Srivastava, A. K., Dwivedi, S. P., Maurya, N. K., and Maurya, M., "3D visualization and topographical analysis in turning of hybrid MMC by CNC lathe SPRINT 16TC made of BATLIBOI", *Joint Journal Of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 7 (2): 202–208 (2020).
6. Li, Y., Zheng, G., Zhang, X., Cheng, X., Yang, X., and Xu, R., "Cutting force, tool wear and surface roughness in high-speed milling of high-strength steel with coated tools", *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 33 (11): 5393–5398 (2019).
7. Anand, A., Behera, A. K., and Das, S. R., "An overview on economic machining of hardened steels by hard turning and its process variables", *Manufacturing Review*, 6 (4): 1–9 (2019).
8. Attanasio, A., Umbrello, D., Cappellini, C., Rotella, G., and M'Saoubi, R., "Tool wear effects on white and dark layer formation in hard turning of AISI 52100 steel", *Wear*, 286–287: 98–107 (2012).
9. W.König, A.Berkold, K.-F. K., "Turning versus grinding – A comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42 (1): 39–43 (1993).

10. Matsumoto, Y., Hashimoto, F., and Lahoti, G., "Surface integrity generated by precision hard turning", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48 (1): 59–62 (1999).
11. Günay, M. and Yücel, E., "Application of taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron", *Measurement*, 46 (2): 913–919 (2013).
12. Bhemuni, V., Chalamalasetti, S. R., Konchada, P. K., and Pragada, V. V., "Analysis of hard turning process: thermal aspects", *Advances In Manufacturing*, 3 (4): 323–330 (2015).
13. He, K., Gao, M., and Zhao, Z., "Soft Computing Techniques for Surface Roughness Prediction in Hard Turning: A Literature Review", *IEEE Access*, 7: 89556–89569 (2019).
14. Zhang, Y., Ma, S., Yang, H., Lv, J., and Liu, Y., "A big data driven analytical framework for energy-intensive manufacturing industries", *Journal Of Cleaner Production*, 197: 57–72 (2018).
15. Özdemir, M., Kaya, M. T., and Akyildiz, H. K., "Analysis of surface roughness and cutting forces in hard turning of 42CrMo4 steel using taguchi and RSM method", *Mechanika*, 26 (3): 231–241 (2020).
16. Sharma, V. S., Dhiman, S., Sehgal, R., and Sharma, S. K., "Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks", *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 19 (4): 473–483 (2008).
17. Khamel, S., Ouelaa, N., and Bouacha, K., "Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool", *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 26 (11): 3605–3616 (2012).
18. Salgado, D. R. and Alonso, F. J., "An approach based on current and sound signals for in-process tool wear monitoring", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 47 (14): 2140–2152 (2007).
19. Şahin, E. and Esen, İ., "Statistical and Experimental Investigation of Hardened AISI H11 Steel in CNC Turning with Alternative Measurement Methods", *Advances In Materials Science And Engineering*, 2021: 1–17 (2021).
20. Siskova, V. and Juricka, M., "The effect of sound on job performance", *IEEE International Conference On Industrial Engineering And Engineering Management*, 1679–1683 (2014).
21. Şahinoğlu, A. and Rafighi, M., "Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 45 (2): 765–778 (2020).
22. Benlahmidi, S., Aouici, H., Boutaghane, F., Khellaf, A., Fnides, B., and

- Yallese, M., "Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI H11 steel (50 HRC) with CBN7020 tools", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 89 (1–4): 803–820 (2017).
23. Fnides, B., Boutabba, S., Fnides, M., Aouici, H., and Yallese, M. A., "Tool life evaluation of cutting materials in hard turning of AISI H11", *Estonian Journal Of Engineering*, 19 (2): 143 (2013).
  24. Saini, S., Ahuja, I. S., and Sharma, V. S., "Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in hard turning of AISI H11 tool steel using ceramic tools", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 13 (8): 1295–1302 (2012).
  25. Yurtkuran, H., Korkmaz, M. E., and Günay, M., "Modelling and optimization of the surface roughness in high speed hard turning with coated and uncoated CBN insert", *Gazi University Journal Of Science*, 29 (4): 987–995 (2016).
  26. Fnides, B., Yallese, M. A., Mabrouki, T., and Rigal, J.-F., "Application of response surface methodology for determining cutting force model in turning hardened AISI H11 hot work tool steel", *Sadhana*, 36 (1): 109–123 (2011).
  27. Bhatti, R. and Singh, R., "Optimization of cutting parameters on AISI H11 steel using multi-coated carbide tool by taguchi method", *International Journal Of Current Engineering And Technology*, 5 (4): 2418–2424 (2015).
  28. Khellaf, A., Aouici, H., Smaiah, S., Boutabba, S., Yallese, M. A., and Elbah, M., "Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 89 (1–4): 333–354 (2017).
  29. Aouici, H., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., and Rigal, J. F., "Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization", *Measurement*, 45 (3): 344–353 (2012).
  30. Rathod, K. B. and Lalwani, D. I., "Modeling of flank wear progression for coated cubic boron nitride tool during hard turning of AISI H11steel", *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 6692–6701 (2018).
  31. Aouici, H., Fnides, B., Elbah, M., Benlahmidi, S., Bensouilah, H., and Yallese, M. A., "Surface roughness evaluation of various cutting materials in hard turning of AISI H11", *International Journal Of Industrial Engineering Computations*, 7 (2): 339–352 (2016).
  32. Kumar, P., Chauhan, S. R., Pruncu, C. I., Gupta, M. K., Pimenov, D. Y., Mia, M., and Gill, H. S., "Influence of different grades of CBN inserts on cutting force and surface roughness of AISI H13 die tool steel during hard turning operation", *Materials*, 12 (1): 177 (2019).

33. D'Addona, D. M., Raykar, S. J., and Narke, M. M., "High Speed Machining of Inconel 718: Tool Wear and Surface Roughness Analysis", *Procedia CIRP*, 62: 269–274 (2017).
34. Sahu, S. and Choudhury, B. B., "Optimization of surface roughness using taguchi methodology and prediction of tool wear in hard turning tools", *Materials Today: Proceedings*, 2 (4–5): 2615–2623 (2015).
35. Patel, V. D. and Gandhi, A. H., "Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool", *Measurement*, 138: 34–38 (2019).
36. Umamaheswarrao, P., Raju, D. R., Suman, K., and Sankar, B. R., "Multi objective optimization of process parameters for hard turning of AISI 52100 steel using Hybrid GRA-PCA", *Procedia Computer Science*, 133: 703–710 (2018).
37. Tiwari, R., Das, D., Kumar Sahoo, A., Kumar, R., Kumar Das, R., and Chandra Routara, B., "Experimental investigation on surface roughness and tool wear in hard turning JIS S45C steel", *Materials Today: Proceedings*, 5 (11): 24535–24540 (2018).
38. Aneiro, F. M., Coelho, R. T., and Brandão, L. C., "Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 30 (2): 104–109 (2008).
39. Nicolodi, J. H. W., Consalter, L. A., Durán Acevedo, O. M., and de SOUZA, A. J., "Influence of cutting speed and feed rate on the wear of an S-type mixed ceramic tool in turning of AISI 4140 hardened steel", *Tehnicki Vjesnik*, 26 (4): 913–919 (2019).
40. Mir, M. J. and Wani, M. F., "Hard turning of high-carbon high chromium tool steel using CBN tools under different lubricating/cooling conditions", *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi - B Teorik Bilimler*, 6 (2): 1–1 (2018).
41. Alok, A. and Das, M., "Multi-objective optimization of cutting parameters during sustainable dry hard turning of AISI 52100 steel with newly develop HSN2-coated carbide insert", *Measurement*, 133: 288–302 (2019).
42. Allu, V. P., Linga Raju, D., and Ramakrishna, S., "Performance investigation of surface roughness in hard turning of AISI 52100 steel - RSM approach", *Materials Today: Proceedings*, 18: 261–269 (2019).
43. Bilga, P. S., Singh, S., and Kumar, R., "Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method", *Journal Of Cleaner Production*, 137: 1406–1417 (2016).
44. Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Belhadi, S., Bouhalais, M. L., and Girardin, F., "Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network

- (ANN)", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 93 (5–8): 2485–2504 (2017).
45. Panda, A., Ranjan Das, S., and Dhupal, D., "Machinability investigation of HSLA steel in hard turning with coated ceramic tool: assessment, modeling, optimization and economic aspects", *Journal Of Advanced Manufacturing Systems*, 18 (04): 625–655 (2019).
  46. Suresh, R., Joshi, A. G., and Manjaiah, M., "Experimental Investigation on tool wear in AISI H13 die steel turning using RSM and ANN methods", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 46 (3): 2311–2325 (2021).
  47. Chavan, A. and Sargade, V., "Surface integrity of AISI 52100 Steel during hard turning in different near-dry environments", *Advances In Materials Science And Engineering*, 2020: 1–13 (2020).
  48. Ginting, A., Skein, R., Cuaca, D., Herdianto, Pieter, and Masyithah, Z., "The characteristics of CVD- and PVD-coated carbide tools in hard turning of AISI 4340", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 129 (July): 548–557 (2018).
  49. Cagan, S. C. and Buldum, B. B., "Machinability investigation of Incoloy 825 in high-speed turning under dry conditions", *Revista Matéria*, 26 (4): (2021).
  50. Elkaseer, A., Abdelaziz, A., Saber, M., and Nassef, A., "FEM-based study of precision hard turning of stainless steel 316L", *Materials*, 12 (16): 1–16 (2019).
  51. Alok, A., Kumar, A., and Das, M., "Hard turning with a new HSN 2 -coated carbide insert and optimization of process parameter", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, Online: (2021).
  52. Duc, P. M., Dai, M. D., and Giang, L. H., "Modeling and optimizing the effects of insert angles on hard turning performance", *Mathematical Problems In Engineering*, Online: (2021).
  53. Labidi, A., Tebassi, H., Belhadi, S., Khettabi, R., and Yallese, M. A., "Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function", *Journal Of Failure Analysis And Prevention*, 18 (4): 1017–1033 (2018).
  54. Das, A., Patel, S. K., Hotta, T. K., and Biswal, B. B., "Statistical analysis of different machining characteristics of EN-24 alloy steel during dry hard turning with multilayer coated cermet inserts", *Measurement*, 134: 123–141 (2019).
  55. Bouacha, K., Yallese, M. A., Mabrouki, T., and Rigal, J. F., "Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 28 (3): 349–361 (2010).

56. Agrawal, A., Goel, S., Rashid, W. Bin, and Price, M., "Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC)", *Applied Soft Computing*, 30: 279–286 (2015).
57. Mir, M. J. and Wani, M. F., "Performance evaluation of PCBN, coated carbide and mixed ceramic inserts in finish-turning of AISI D2 steel", *Jurnal Tribologi*, 14 (September): 10–31 (2017).
58. Sahin, Y., "Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (7): 3478–3489 (2009).
59. James Dhilip, J. D., Jeevan, J., Arulkirubakaran, D., and Ramesh, M., "Investigation and optimization of parameters for hard turning of OHNS steel", *Materials And Manufacturing Processes*, 35 (10): 1113–1119 (2020).
60. Balwan, V. R., Dabade, B. M., and Kabnure, B. B., "Optimization of surface finish and material removal rate while turning hardened EN 353 steel using GRA", *Materials Today: Proceedings*, 59 (1): 331–338 (2022).
61. Subbaiah, K. V., Raju, C., and Suresh, C., "Parametric analysis and optimization of hard turning at different levels of hardness using wiper ceramic insert", *Measurement*, 158: 107712 (2020).
62. Tekkaya, B., Meurer, M., and Münstermann, S., "Modelling of grain size evolution with different approaches via FEM when hard machining of AISI 4140", *Metals*, 10 (10): 1–20 (2020).
63. Thangarasu, S. K., Shankar, S., Mohanraj, T., and Devendran, K., "Tool wear prediction in hard turning of EN8 steel using cutting force and surface roughness with artificial neural network", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science*, 234 (1): 329–342 (2020).
64. Bagga, P. J., Bajaj, K. S., Makhesana, M. A., and Patel, K. M., "An online tool life prediction system for CNC turning using computer vision techniques", *Materials Today: Proceedings*, 62 (6): 2689–2693 (2022).
65. Kara, F., Karabatak, M., Ayyildiz, M., and Nas, E., "Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (1): 969–983 (2020).
66. Liew, P. J., Shaaroni, A., Sidik, N. A. C., and Yan, J., "An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 114: 380–394 (2017).
67. Çetindağ, H. A., Çiçek, A., and Uçak, N., "The effects of CryoMQL conditions on tool wear and surface integrity in hard turning of AISI 52100 bearing steel", *Journal Of Manufacturing Processes*, 56 (April): 463–473 (2020).

68. Varadarajan, A. S., Philip, P. K., and Ramamoorthy, B., "Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry and wet turning", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 42 (2): 193–200 (2002).
69. Urresti, I., Llanos, I., Zurbitu, J., and Zelaieta, O., "Tool wear modelling of cryogenic-assisted hard turning of AISI 52100", *Procedia CIRP*, 102: 494–499 (2021).
70. Mallick, R., Kumar, R., Panda, A., and Sahoo, A. K., "Performance characteristics of hardened AISI D2 steel turning: A review", *Materials Today: Proceedings*, 26: 2685–2690 (2019).
71. Kumar, S. and Gandotra, S., "Effect of cooling air on machining performance during hard turning", *Materials Today: Proceedings*, 38: 2213–2216 (2020).
72. Mohrni A. S., Yanis M., K. E., "Development of surface roughness prediction model for hard turning on AISI D2 steel using cubic borone nitride insert", *Jurnal Teknologi*, 80 (1): 173–178 (2018).
73. Mia, M. and Dhar, N. R., "Prediction and optimization by using SVR, RSM and GA in hard turning of tempered AISI 1060 steel under effective cooling condition", *Neural Computing And Applications*, 31 (7): 2349–2370 (2019).
74. Abidi, Y., "Analysis of the compromise between cutting tool life, productivity and roughness during turning of C45 hardened steel", *Production Engineering Archives*, 27 (1): 30–35 (2021).
75. Ahmed, T., Mollick, N., Mahmud, S., and Ahmad, T., "Analysis of effects of machining parameters on cutting force components in turning AISI 201 stainless steel using cemented carbide cutting tool insert", *Materials Today: Proceedings*, 42: 832–837 (2021).
76. Özlü, B., "Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleipner cold work tool steel", *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 36 (3): 1241–1251 (2021).
77. Singh, A. and Sinha, M. K., "Multi-response optimization during dry turning of bio-implant steel (AISI 316L) using coated carbide inserts", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 45 (11): 9397–9411 (2020).
78. Awale, A. and Inamdar, K., "Multi-objective optimization of high-speed turning parameters for hardened AISI S7 tool steel using grey relational analysis", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 42 (7): 1–17 (2020).
79. Panda, A., Das, S. R., and Dhupal, D., "Surface roughness analysis for economical feasibility study of soated ceramic tool in hard turning operation", *Process Integration And Optimization For Sustainability*, 1 (4): 237–249 (2017).

80. Mikołajczyk, T., "Modeling of minimal thickness cutting layer influence on surface roughness in turning", *Applied Mechanics And Materials*, 656: 262–269 (2014).
81. Mikołajczyk, T., Latos, H., Pimenov, D. Y., Paczkowski, T., Gupta, M. K., and Krolczyk, G., "Influence of the main cutting edge angle value on minimum uncut chip thickness during turning of C45 steel", *Journal Of Manufacturing Processes*, 57: 354–362 (2020).
82. Rafighi, M., Özdemir, M., Al Shehabi, S., and Kaya, M. T., "Sustainable hard turning of high chromium AISI D2 tool steel using CBN and ceramic inserts", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 74 (7): 1639–1653 (2021).
83. Özdemir, M., "Analysis of the effect of tool nose radius , feed rate , and cutting depth parameters on surface roughness and cutting force in CNC lathe machining of 36CrNiMo4 alloy steel", *Gazi University Journal Of Science PART A: ENGINEERING AND INNOVATION*, 8 (2): 308–317 (2021).
84. D'Addona, D. M. and Raykar, S. J., "Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry", *Procedia CIRP*, 41: 841–846 (2016).
85. Bagga, P. J., Makhesana, M. A., Patel, K., and Patel, K. M., "Tool wear monitoring in turning using image processing techniques", *Materials Today: Proceedings*, 44: 771–775 (2021).
86. Khatai, S., Kumar, R., Sahoo, A. K., and Panda, A., "Materials Today : Proceedings Investigation on tool wear and chip morphology in hard turning of EN 31 steel using AlTiN-PVD coated carbide cutting tool", *Materials Today: Proceedings*, 59 (3): 1810–1816 (2022).
87. Meddour, I., Yallese, M. A., Khattabi, R., Elbah, M., and Boulanouar, L., "Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 77 (5–8): 1387–1399 (2015).
88. Khan, P. L. and Bhivsane, S. V., "Experimental analysis and investigation of machining parameters in finish hard turning of AISI 4340 steel", *Procedia Manufacturing*, 20: 265–270 (2018).
89. Kumar, R., Bilga, P. S., and Singh, S., "An Investigation of Energy Efficiency in Finish Turning of en 353 Alloy Steel", *Procedia CIRP*, 98: 654–659 (2021).
90. Yousefi, S. and Zohoor, M., "Effect of cutting parameters on the dimensional accuracy and surface finish in the hard turning of MDN250 steel with cubic boron nitride tool, for developing a knowledge base expert system", *International Journal Of Mechanical And Materials Engineering*, 14 (1): 1–13 (2019).
91. Deshpande, Y., Andhare, A., and Sahu, N. K., "Estimation of surface



- roughness using cutting parameters, force, sound, and vibration in turning of Inconel 718", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 39 (12): 5087–5096 (2017).
92. Sahinoglu, A. and Rafighi, M., "Machinability of hardened AISI S1 cold work tool steel using cubic boron nitride", *Scientia Iranica*, 28(5): 2655–2670 (2021).
  93. Cakir, A. K., "Analysis of surface roughness, sound level and machine current in the turning of hardened AISI S1 steel", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 74 (3): 691–703 (2021).
  94. Papandrea, P. J., Frigieri, E. P., Maia, P. R., Oliveira, L. G., and Paiva, A. P., "Surface roughness diagnosis in hard turning using acoustic signals and support vector machine: A PCA-based approach", *Applied Acoustics*, 159: 107102 (2020).
  95. Rastorguev, D. and Sevastyanov, A., "Diagnostics of chip formation and surface quality by parameters of the main drive current in the hard turning", *Materials Today: Proceedings*, 19: 1845–1851 (2019).
  96. Salgado, D. R., Cambero, I., Herrera Olivenza, J. M., García Sanz-Calcedo, J., Núñez López, P. J., and García Plaza, E., "Tool wear estimation for different workpiece materials using the same monitoring system", *Procedia Engineering*, 63 (2003): 608–615 (2013).
  97. Marani, M., Zeinali, M., Songmene, V., and Mechefske, C. K., "Tool wear prediction in high-speed turning of a steel alloy using long short-term memory modelling", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 177: 109329 (2021).
  98. Punuhsingon, C. S. C. and Oh, S.-C., "Application of Response Surface Methodology for Modeling and Optimization of Surface Roughness and Electric Current Consumption in Turning Operation", *Journal Of The Korean Society Of Manufacturing Process Engineers*, 13 (4): 56–68 (2014).
  99. Günay, M., Korkmaz, M. E., and Yaşar, N., "Finite element modeling of tool stresses on ceramic tools in hard turning", *Mechanica*, 23 (3): 432–440 (2017).
  100. Camposeco-Negrete, C. and de Dios Calderón-Nájera, J., "Sustainable machining as a mean of reducing the environmental impacts related to the energy consumption of the machine tool: a case study of AISI 1045 steel machining", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 102 (1–4): 27–41 (2019).
  101. Velchev, S., Kolev, I., Ivanov, K., and Gechevski, S., "Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning", *Journal Of Cleaner Production*, 80: 139–149 (2014).

102. Kumar, R., Singh, S., Sidhu, A. S., and Pruncu, C. I., "Bibliometric analysis of specific energy consumption (Sec) in machining operations: A sustainable response", *Sustainability (Switzerland)*, 13 (10): (2021).
103. Öztürk, B. and Kara, F., "Calculation and Estimation of Surface Roughness and Energy Consumption in Milling of 6061 Alloy", *Advances In Materials Science And Engineering*, 2020: 1–12 (2020).
104. Ayyıldız, E. A., Ayyıldız, M., and Kara, F., "Optimization of surface roughness in drilling medium-density fiberboard with a parallel robot", *Advances In Materials Science And Engineering*, 2021: 1–8 (2021).
105. Kuntoğlu, M., Acar, O., Gupta, M. K., Sağlam, H., Sarikaya, M., Giasin, K., and Pimenov, D. Y., "Parametric optimization for cutting forces and material removal rate in the turning of AISI 5140", *Machines*, 9 (5): 90 (2021).
106. Kara, F., "Taguchi optimization of surface roughness and flank wear during the turning of DIN 1.2344 tool steel", *Materials Testing*, 59 (10): 903–908 (2017).
107. Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y., Giasin, K., Mikolajczyk, T., and Sharma, S., "Modeling of cutting parameters and tool geometry for multi-criteria optimization of surface roughness and vibration via response surface methodology in turning of AISI 5140 steel", *Materials*, 13 (19): 4242 (2020).
108. Sarnobat, S. and Raval, H., "Prediction of surface roughness from cutting tool vibrations in hard turning of AISI D2 steel of different hardness with conventional and wiper geometry CBN inserts", *Journal Of Applied Mechanical Engineering*, 07 (01): 1–7 (2018).
109. Suresh, R., Basavarajappa, S., Gaitonde, V. N., and Samuel, G. L., "Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 33: 75–86 (2012).
110. Maheshwera Reddy Paturi, U., Devarasetti, H., and Kumar Reddy Narala, S., "Application of Regression and Artificial Neural Network Analysis in Modelling of Surface Roughness in Hard Turning of AISI 52100 Steel", *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 4766–4777 (2018).
111. Aouici, H., Yallese, M. A., Belbah, A., Ameer, M. F., and Elbah, M., "Experimental investigation of cutting parameters influence on surface roughness and cutting forces in hard turning of X38CrMoV5-1 with CBN tool", *Sadhana*, 38 (3): 429–445 (2013).
112. Karaaslan, F. and Şahinoğlu, A., "Determination of ideal cutting conditions for maximum surface quality and minimum power consumption during hard turning of AISI 4140 steel using TOPSIS method based on fuzzy distance", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 45 (11): 9145–9157 (2020).
113. Mia, M. and Dhar, N. R., "Modeling of surface roughness using RSM, FL and

- SA in dry hard turning", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 43 (3): 1125–1136 (2018).
114. Serin, G., Kahya, M., Ozbayoglu, M., and Unver, H. O., "Ti6Al4V iş parçasının tornalama işleminde özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlüğünü incelenmesi ve yapay sinir ağları temelli bir tahmin modeli geliştirilmesi", *Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering*, 24 (2): 517–536 (2019).
  115. Su, Y., Zhao, G., Zhao, Y., Meng, J., and Li, C., "Multi-objective optimization of cutting parameters in turning AISI 304 austenitic stainless steel", *Metals*, 10 (2): 1–11 (2020).
  116. Callister, W. D., "Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach", John Wiley & Sons, Inc., 323–357 (2000).
  117. Krauss, G., "Steels, Processing, Structure, and Performance 2nd Ed.", ASM International Materials Park, Ohio, 1–642 (2015).
  118. "ASM Handbook Volume 1- Properties and Selection: Iron Steels and High Performance Alloys", ASM International Handbook Committee Materials Park, Ohio, 1763–1887 (1990).
  119. Internet: Vikipedi özgür ansiklopedi, "Demir-Karbon Denge Diyagramı", .
  120. Hakan Koçak, "Takim Çelikleri El Kitabı", 32 (2006).
  121. Eren, N., "CBN uçları ile DIN 1.2367 çelik malzemesinin sert tornalama sırasında güç tüketimi ve yüzey pürüzlülüğü ilişkilerinin incelenmesi", *Karabük Üniversitesi*, (2021).
  122. Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing 4th Ed.", John Wiley & Sons, Inc. The United States of America, 585–599 (2017).
  123. Snr, D. E. D., "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 40 (8): 1073–1098 (2000).
  124. Che, D., Ehmann, K., and Cao, J., "Analytical modeling of heat transfer in polycrystalline diamond compact cutters in rock turning processes", *Journal Of Manufacturing Science And Engineering, Transactions Of The ASME*, 137 (3): 1–12 (2015).
  125. Dogra, M., Sharma, V. S., Sachdeva, A., Suri, N. M., and Dureja, J. S., "Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 11 (2): 341–358 (2010).
  126. Gupta, R. K., Kumar, B., Gupta, T. V. K., and Ramteke, D. S., "Theoretical and experimental analysis of hard material machining", *International Scholarly And Scientific Research & Innovation*, 7 (10): 2132–2138 (2013).

127. Davim, J. P., "Machining of Hard Materials", Springer, New York, 1–211 (2011).
128. Schneider, G. N. P., "Cutting Tool Applications Chapter 3: Machinability of Metals", 2–10 (2002).
129. Black, J T. Kohser, R. J. T. B., "DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing", 533–565 (2018).
130. Barış, Ö., Halil, D., and Engin, N., "CNC tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etki eden parametrelerin matematiksel olarak modellenmesi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 3 (2): 75–86 (2014).
131. Şahinoğlu, Abidin; Güllü, A. Ç. İ., "Analysis of surface roughness, sound level, vibration and current when machining AISI 1040 steel", 37 (2): 423–437 (2019).

## ÖZGEÇMİŞ

Emrah ŞAHİN, İlköğretimi İstanbul'da, ortaöğretimi Ankara'da tamamladı. 2002 yılında giriş yaptığı Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, Lisans eğitimini tamamladı. 2007 senesinde giriş yaptığı Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, Yüksek lisans eğitimini tamamladı. Çankırı Karatekin Üniversitesi'nde 2012 yılında Uzman ve halen 2018 yılından itibaren Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı.