

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**DIN 1.2379 ÇELİĞİNİN SERAMİK TAKIMLARLA DEĞİŞKEN  
İLERLEMELİ TORNALANMASINDA BAŞLANGIÇ AŞINMASININ  
DENEYSEL MODELLENMESİ**

**BERNA İMREK**

**DOKTORA TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Prof. Dr. Ali ORAL (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR  
Prof. Dr. Kadir ÇAVDAR  
Prof. Dr. Sare ÇELİK  
Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ

**BALIKESİR, ARALIK - 2022**

## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**DIN 1.2379 Çeliğinin Seramik Takımlarla Değişken İlerlemeli Tornalanmasında Başlangıç Aşınmasının Deneysel Modellenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Berna İMREK**

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından (2019/019) nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**DIN 1.2379 ÇELİĞİNİN SERAMİK TAKIMLARLA DEĞİŞKEN İLERLEMELİ  
TORNALANMASINDA BAŞLANGIÇ AŞINMASININ DENEYSEL  
MODELLENMESİ  
DOKTORA TEZİ  
BERNA İMREK  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. ALİ ORAL)**

**BALIKESİR, ARALIK - 2022**

Takım aşınması imalat işlemlerinde takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, üretim maliyeti gibi birçok faktörü etkilemektedir. Takım aşınması üzerine yapılan çalışmalar büyük öneme sahiptir. Bu doktora çalışmasında değişken ilerlemeli tornalama işleminin, serbest yüzey aşınmasına etkisinin araştırılması için, DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği, TNGA 160404T01020 takım ile, sabit ilerlemeli ve değişken ilerlemeli tornalama deneyleri yapılmıştır. Serbest yüzey aşınmasının en küçük değerini sağlayacak değişken ilerleme kademeleri optimize edilmiş ve ilerleme kademelerinin serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminin serbest yüzey aşınma değeri üzerinde, sabit ilerlemeli tornalama işlemine göre, kuru işleme şartlarında %9,73, kesme sıvılı işleme şartlarında %31,57 oranına varan azalma gözlenmiştir. Tornalama işleminde kesme sıvısı kullanıldığında hem değişken ilerleme hem de sabit ilerlemeli tornalama deneylerinde takım serbest yüzey aşınma değerinin azaldığı görülmüştür.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminde, serbest yüzey aşınması ve her bir ilerlemeye karşılık kesme kuvvetleri doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle modellenmiştir. Kesme enerjisine dayalı serbest yüzey aşınması ve kesme kuvvetleri modellerinin  $R^2$  ve  $p$  değerleri dikkate alındığında istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. DIN 1.2379 çeliğin TNGA 160404T01020 takım ile değişken ilerlemeli tornalamasında serbest yüzey aşınmasına olumlu etkisi görülmüştür. Çalışmada, serbest yüzey aşınmasının kesme kuvvetlerine bağlı matematiksel modeli oluşturulmuştur.

Başlangıç aşınması bölgesinde görülen aşırı aşınmanın, aşırı kesme kuvveti şiddetinden kaynaklandığı görülmüştür. Başlangıç aşınmasını azaltmak için tornalama işlemine düşük ilerleme ile başlanıp kademeli olarak artırılmalıdır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Değişken ilerlemeli tornalama, serbest yüzey aşınması (VB), modelleme

Bilim Kod / Kodları : 91438

Sayfa Sayısı : 107

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL MODELING OF INITIAL WEAR IN DIN 1.2379 STEEL IN VARIABLE FEED TURNING WITH CERAMIC TOOLS**

**PH.D THESIS**

**BERNA İMREK**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF.DR. ALİ ORAL )**

**BALIKESİR, DECEMBER - 2022**

Tool wear affects many factors such as tool life, surface roughness and production cost in manufacturing processes. Studies on tool wear are of great importance. In this doctoral study, constant feed and variable feed turning experiments were carried out with DIN 1.2379 cold work tool steel, TNGA 160404T01020 tool to investigate the effect of variable feed turning on flank wear. Variable feed rate stages were optimized to provide the smallest value of flank wear, and the effects of feed stages on flank wear were investigated.

It has been observed that the effect of the variable feed turning process, compared to the constant feed turning process is to reduce the flank wear value up to 9,73% ratio in dry machining conditions and reducing effect is 31,57% ratio in machining with cutting fluid conditions. It was concluded that the use of cutting fluid reduces the flank wear value of the tool in both constant feed turning and variable feed turning experiments compared to dry machining.

In variable feed turning, flank wear and cutting forces for each feed rate were modeled by nonlinear regression method. Considering the R-squared values and p-values of the flank wear model based on cutting energy and cutting force model were found to be statistically significant. A positive effect on flank wear was observed in the variable feed turning of DIN 1.2379 steel with the TNGA 160404T01020 tool. In this study, a mathematical model of flank wear based on cutting forces was created.

It was observed that excessive wear in the initial wear zone was caused by excessive cutting force intensity. In order to reduce the initial wear, the turning process should be started with low feed and increased gradually.

**KEYWORDS:** Variable feed turning, flank wear (VB), modelling

Science Code / Codes : 91438

Page Number : 107

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tez Çalışmasının Amacı .....	2
<b>2. METAL KESME MEKANİĞİ</b> .....	<b>3</b>
2.1 Dik Kesme Mekanîği .....	3
2.2 Eğik Kesme Mekanîği.....	4
2.3 Tornalama İşlemi .....	5
2.4 Takım Ömrü.....	7
2.5 Takım Aşınması .....	7
2.5.1 Aşınmaya Neden Olan Temel Yük Faktörleri .....	9
2.5.2 Aşınma Mekanizmaları .....	9
2.5.2.1 Abraziv Aşınma.....	9
2.5.2.2 Difüzyon Aşınması.....	10
2.5.2.3 Oksidasyon Aşınması .....	10
2.5.2.4 Yorulma Aşınması.....	10
2.5.2.5 Adhesiv Aşınma .....	11
2.5.3 Takım Aşınma Tipleri .....	11
2.5.3.1 Serbest Yüzey Aşınması.....	11
2.5.3.2 Krater Aşınması.....	12
2.5.3.3 Plastik Deformasyon .....	12
2.5.3.4 Çentik Aşınması .....	13
2.5.3.5 Isıl Çatlaklar .....	13
2.5.3.6 Mekanik Yorulma Çatlakları.....	13
2.5.3.7 Kenardan Parçacık Kopması .....	14
2.5.3.8 Takım Kırılması .....	14
2.5.3.9 Yığıma Kenar .....	14
2.6 Kesme Kuvvetleri .....	15
<b>3. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>19</b>
<b>4. MALZEME VE YÖNTEM</b> .....	<b>35</b>
4.1 Giriş .....	35
4.2 Deney cihazları ve malzemeleri.....	35
4.2.1 Kesici Takım .....	35
4.2.2 Takım Tutucu .....	36
4.2.3 İş Parçası Malzemesi.....	37
4.2.4 CNC Torna Tezgahları.....	39
4.2.5 Aşınma Ölçüm Sistemi .....	41
4.2.6 Kesme Kuvvetleri Ölçüm Sistemi.....	42
4.3 Yöntem.....	44
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>49</b>

5.1 Değişken İlerlemeli ve Sabit İlerlemeli Kuru ve Kesme Sıvısı ile Yapılan Deneyler..	49
5.1.1 Kuru İşleme Şartlarında Yapılan Deneyler .....	50
5.1.2 Kesme Sıvısı ile Yapılan Deneyler .....	51
5.1.3 Kesme Sıvısının Sabit İlerlemeli Tornalama İşlemine Etkisi .....	52
5.1.4 Kesme Sıvısının Değişken İlerlemeli Tornalama İşlemine Etkisi .....	53
5.2 Değişken İlerlemeli Tornalama İşleminde $f_1, f_2, f_3$ Bağımsız Değişkenlerinin Optimizasyonu .....	57
5.3 Serbest Yüzey Aşınmasının ve Kesme Kuvvetinin Modellenmesi için Değişken İlerlemeli Tornalama Deneyleri .....	65
5.3.1 Serbest Yüzey Aşınmasının Modellenmesi .....	67
5.3.2 Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi.....	76
5.3.2.1 $F_{c1}$ Kuvvetinin Modellenmesi.....	78
5.3.2.2 $F_{c2}$ Kuvvetinin Modellenmesi.....	79
5.3.2.3 $F_{c3}$ Kuvvetinin Modellenmesi.....	81
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>99</b>
<b>7. KAYNAKLAR .....</b>	<b>103</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>107</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: Dik kesme geometrisi. ....	3
Şekil 2.2: a) Deformasyon bölgeleri, b) takım talaş yüzeyinde yük dağılımı.....	4
Şekil 2.3: Eğik kesme geometrisi.....	5
Şekil 2.4: Tornalama işleminin geometrisi. ....	5
Şekil 2.5: Torna takımının geometrisi.....	6
Şekil 2.6: ISO 3685'e göre serbest yüzey aşınması. ....	8
Şekil 2.7: Serbest yüzey aşınmasının zamana bağlı değişimi. ....	8
Şekil 2.8: Abraziv aşınma mekanizması. ....	9
Şekil 2.9: Difüzyon aşınma mekanizması.....	10
Şekil 2.10: Oksidasyon aşınma mekanizması. ....	10
Şekil 2.11: Yorulma aşınma mekanizması.....	11
Şekil 2.12: Adhesiv aşınma mekanizması.....	11
Şekil 2.13: Serbest yüzey aşınması. ....	12
Şekil 2.14: Krater aşınması. ....	12
Şekil 2.15: Plastik deformasyon.....	12
Şekil 2.16: Çentik aşınması.....	13
Şekil 2.17: Isıl çatlaklar. ....	13
Şekil 2.18: Kenardan parçacık kopması.....	14
Şekil 2.19: Takım kırılması.....	14
Şekil 2.20: Yığılma kenar.....	15
Şekil 2.21: Kesme kuvvetleri diyagramı.....	15
Şekil 2.22: Takım yanaşma durumu.....	18
Şekil 3.1: İlerleme değişimi grafiği.....	19
Şekil 3.2: İlerlemenin artan-azalan ve doğrusal artışı gösterimi.....	20
Şekil 3.3: İlerleme değişimi. ....	21
Şekil 3.4: Takım aşınma eğrisi.....	21
Şekil 3.5: İlerlemenin değişimi. ....	22
Şekil 3.6: Değişken ilerleme uygulaması.....	26
Şekil 4.1: TNGA 160404T01020 kesici takım. ....	35
Şekil 4.2: Kesici takım kesme yuvarlatma yarıçapı.....	36
Şekil 4.3: MTJNR 2525 M16 H4 ID 8K kater.....	36
Şekil 4.4: İş parçası numunesi teknik resmi.....	37
Şekil 4.5: DIN 1.2379 iş parçası numunesi.....	38
Şekil 4.6: İş parçası malzemesinin özellikleri.....	38
Şekil 4.7: Ünlversal VRSD-251 model makro sertlik ölçüm cihazı. ....	39
Şekil 4.8: Goodway-GS-200 CNC torna tezgahı. ....	40
Şekil 4.9: MORI SEIKI NL 1500 CNC torna tezgahı. ....	40
Şekil 4.10: Dino-Lite AD4000 serisi mikroskop. ....	41
Şekil 4.11: ShuttlePix-P-400R mikroskop.....	41
Şekil 4.12: Kistler 9129AA model dinamometre.....	42
Şekil 4.13: Dinamometre, takım tutucu, iş parçası bağlantısı.....	43
Şekil 4.14: Kesme kuvveti verilerinin bilgisayara aktarımı.....	44
Şekil 4.15: İlerlemenin değişimi grafiği.....	45
Şekil 4.16: Deney sistematığı.....	48



<b>Şekil 5.1:</b> Kuru işlemede değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında elde edilen VB aşınma grafiği.....	51
<b>Şekil 5.2:</b> Kesme sıvılı işlemede, değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında VB aşınma grafiği.....	52
<b>Şekil 5.3:</b> Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, sabit ilerleme deneyleri VB aşınma grafiği.....	53
<b>Şekil 5.4:</b> Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, değişken ilerleme deneyleri VB aşınma grafiği.....	54
<b>Şekil 5.5:</b> Kuru işleme, değişken ve sabit ilerleme tornalama deney görüntüleri, a) 5s, b) 10s, c) 20s, d) 40s, e) 80s, f) 120s, g) 160s, h) 200s, i) 240s.....	55
<b>Şekil 5.6:</b> Kesme sıvılı, değişken ve sabit ilerleme tornalama deney görüntüleri, a) 5s, b) 10s, c) 20s, d) 40s, e) 80s, f) 120s, g) 160s, h) 200s, i) 240s .....	56
<b>Şekil 5.7:</b> Gürültü / Sinyal oranları.....	60
<b>Şekil 5.8:</b> Değişken ilerlemeli tornalama deneyleri aşınma görüntüleri.....	62
<b>Şekil 5.9:</b> a) Optimum değişken ilerleme b) $f = 0,130$ mm/dev sabit ilerleme deney görüntüsü.....	64
<b>Şekil 5.10:</b> Gözlenen çentik aşınması.....	64
<b>Şekil 5.11:</b> Kesme kuvveti – zaman grafiği.....	67
<b>Şekil 5.12:</b> Serbest yüzey aşınmasının (VB) geometrik yeri.....	69
<b>Şekil 5.13:</b> Deney verileri, modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerlerinin karşılaştırma grafiği.....	74
<b>Şekil 5.14:</b> Serbest Yüzey Aşınmasının (VB), kesme kuvvetinden doğan kümülatif enerjiye göre değişimi.....	75
<b>Şekil 5.15:</b> Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerlerinin karşılaştırılma grafiği.....	76
<b>Şekil 5.16:</b> Birinci ilerleme değerlerine karşılık ölçülen kesme kuvveti ve kesme kuvvetinin modeli.....	79
<b>Şekil 5.17:</b> İkinci ilerleme değerlerine karşılık ölçülen kesme kuvveti ve kesme kuvvetinin modeli.....	81
<b>Şekil 5.18:</b> Üçüncü ilerleme değerine karşılık ölçülen kesme kuvveti ve kesme kuvvetinin modeli.....	82
<b>Şekil 5.19:</b> Her bir ilerlemenin çalışma aralığında, h talaş kalınlığına göre kuvvetin grafiği.....	84
<b>Şekil 5.20:</b> Ölçülen, kuvvet ve ilerlemeye bağlı aşınma değeri.....	85
<b>Şekil 5.21:</b> 3 doğrulama deneyi için ölçülen, kuvvet ve ilerlemeye bağlı aşınma değeri... ..	85
<b>Şekil 5.22:</b> Deney verileri, modelden tahmin edilen $F_{c1}$ .....	87
<b>Şekil 5.23:</b> Deney verileri, modelden tahmin edilen $F_{c2}$ .....	87
<b>Şekil 5.24:</b> Deney verileri, modelden tahmin edilen $F_{c3}$ .....	88
<b>Şekil 5.25:</b> Deney verileri, modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değeri.....	89
<b>Şekil 5.26:</b> Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen $F_{c1}$ .....	90
<b>Şekil 5.27:</b> Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen $F_{c2}$ .....	91
<b>Şekil 5.28:</b> Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen $F_{c3}$ .....	91
<b>Şekil 5.29:</b> Deneylerden ölçülen VB, modelden tahmin edilen VB.....	92
<b>Şekil 5.30:</b> Değişken ilerlemeli tornalama deneyleri aşınma görüntüleri.....	93
<b>Şekil 5.31:</b> Değişken ilerlemeli tornalama deneyleri, kuvvet - zaman grafikleri.....	95
<b>Şekil 5.32:</b> Doğrulama deneyleri aşınma görüntüleri.....	98
<b>Şekil 5.33:</b> Doğrulama deneyleri kuvvet – zaman grafiği.....	98

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 4.1:</b> TNGA 160404T01020 kesici takıma ait geometrik boyutlar. ....	35
<b>Tablo 4.2:</b> MTJNR 2525 M16 H4 ID 8K kater için geometrik boyutlar.....	37
<b>Tablo 4.3:</b> CNC tezgahların özellikleri.....	40
<b>Tablo 4.4:</b> Kistler 9129AA dinamometrenin teknik özellikleri.....	42
<b>Tablo 5.1:</b> Sabit ilerleme için kullanılan kesme parametreleri. ....	50
<b>Tablo 5.2:</b> Değişken ilerleme için kullanılan kesme parametreleri. ....	50
<b>Tablo 5.3:</b> Kuru işlemede, değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında elde edilen VB aşınma değerleri.....	50
<b>Tablo 5.4:</b> Kesme sıvılı işlemede, değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında elde edilen VB aşınma değerleri.....	51
<b>Tablo 5.5:</b> Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, sabit ilerlemeli deneyleri için VB aşınma değerleri. ....	52
<b>Tablo 5.6:</b> Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, değişken ilerlemeli deneyleri VB aşınma değerleri. ....	53
<b>Tablo 5.7:</b> Kesme parametreleri, serbest yüzey aşınma değeri. ....	58
<b>Tablo 5.8:</b> Sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu.....	59
<b>Tablo 5.9:</b> Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve optimum ilerleme değerleri.....	60
<b>Tablo 5.10:</b> Sabit ilerlemeli kesme parametreleri.....	60
<b>Tablo 5.11:</b> Sabit ilerlemeli, optimum değişken ilerlemeli deney için VB değerleri.....	61
<b>Tablo 5.12:</b> Kesme koşulları, kesme kuvveti ve serbest yüzey aşınma değerleri.....	66
<b>Tablo 5.13:</b> Kesme koşulları, kesme kuvveti ve serbest yüzey aşınma değerleri.....	66
<b>Tablo 5.14:</b> Model parametreleri. ....	72
<b>Tablo 5.15:</b> Model katsayıları.....	72
<b>Tablo 5.16:</b> Deney verileri, model tahmini serbest yüzey aşınma ve hata oranı.....	74
<b>Tablo 5.17:</b> Model parametreleri. ....	75
<b>Tablo 5.18:</b> Doğrulama deney verileri, model tahmi serbest yüzey aşınma değerleri. ....	76
<b>Tablo 5.19:</b> $F_{c1}$ kesme kuvvetinin modellenmesi için model katsayıları.....	78
<b>Tablo 5.20:</b> $F_{c2}$ kesme kuvvetinin modellenmesi için model katsayıları.....	79
<b>Tablo 5.21:</b> $F_{c3}$ kesme kuvvetinin modellenmesi için model katsayıları.....	81
<b>Tablo 5.22:</b> Deney verileri, model tahmini $F_{c1}$ , $F_{c2}$ , $F_{c3}$ ve hata oranı.....	86
<b>Tablo 5.23:</b> Deney verileri, modelin tahmini VB ve hata oranı.....	88
<b>Tablo 5.24:</b> Model parametreleri. ....	89
<b>Tablo 5.25:</b> Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen $F_{c1}$ , $F_{c2}$ , $F_{c3}$ ve hata oranı .....	90
<b>Tablo 5.26:</b> Doğrulama deney verileri, modelden tahmini VB ve hata oranı.....	92

## SEMBOL LİSTESİ

<b>a<sub>p</sub></b>	: Kesme derinliği (mm)
<b>A<sub>s</sub></b>	: Talaş kesiti (mm <sup>2</sup> )
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum oksit
<b>b</b>	: Talaş genişliği (mm)
<b>C</b>	: Deneş koşullarına bağlı sabit
<b>E<sub>T</sub></b>	: Toplam enerji yoğunluğu
<b>f</b>	: İlerleme (mm/dev)
<b>F<sub>c</sub></b>	: Kesme kuvveti (N)
<b>F<sub>f</sub></b>	: İlerleme kuvveti (N)
<b>F<sub>t</sub></b>	: Teğetsel kuvveti (N)
<b>F<sub>r</sub></b>	: Radyal kuvvet (N)
<b>h</b>	: Kesilmemiş talaş kalınlığı (mm)
<b>i</b>	: Eğim açısı
<b>k<sub>s</sub></b>	: Özgöl kesme kuvveti
<b>k<sub>sh</sub></b>	: h kalınlığına bağlı esas özgöl kesme kuvveti (N/mm <sup>2</sup> )
<b>k<sub>γ</sub></b>	: Talaş açısı düzeltme faktörü
<b>k<sub>λ</sub></b>	: Eğim açısı düzeltme faktörü
<b>k<sub>ty</sub></b>	: Takım malzemesi ve talaş kaldırma yöntemi düzeltme faktörü
<b>k<sub>ks</sub></b>	: Kesme sıvısı faktörü
<b>k<sub>a</sub></b>	: Aşınma düzeltme faktörü
<b>k<sub>s1.1</sub></b>	: h =1 mm, b = 1mm olan talaş kesitine karşılık birim özgöl kesme kuvveti (N/mm <sup>2</sup> )
<b>L</b>	: Talaş kaldırma uzunlukları
<b>n</b>	: Parça ve takım malzemesine bağlı sabit
<b>R<sub>e</sub></b>	: Uç radyus
<b>T</b>	: Takım ömrü
<b>t</b>	: Zaman (s)
<b>TiCN</b>	: Titanyum karbon nitrit
<b>TiN</b>	: Titanyum nitrit
<b>V<sub>c</sub></b>	: Kesme hızı
<b>VB</b>	: Serbest yüzey aşınması
<b>z<sub>c</sub></b>	: Parça ve takım malzemesinin etkisini gösteren faktördür
<b>Ø<sub>c</sub></b>	: Kayma açısı
<b>Ø<sub>o</sub></b>	: Kesme açısı
<b>α<sub>r</sub></b>	: Talaş açısı
<b>α<sub>o</sub></b>	: Eşdeğer dik talaş açısı
<b>α<sub>n</sub></b>	: Eşdeğer normal talaş açısı
<b>β<sub>n</sub></b>	: Normal sürtünme açısı
<b>β<sub>a</sub></b>	: Sürtünme açısı
<b>μ</b>	: Sürtünme katsayısı
<b>τ<sub>n</sub></b>	: Normal kayma açısı
<b>τ<sub>s</sub></b>	: Kayma gerilimi
<b>γ<sub>o</sub></b>	: Boşluk açısı
<b>ρ</b>	: Sürtünme açısı
<b>χ</b>	: Yerleşme açısı

## ÖNSÖZ

Talaşlı imalat işlemlerinde, takım ömrü, takım aşınması önemli araştırma konularından biridir. Bu doktora çalışmasında sabit ilerleme yerine değişken ilerlemeli tornalama kullanımının, takım serbest yüzey aşınması üzerindeki etkisi araştırılmış ve serbest yüzey aşınması modellenmiştir. TNGA 160404T01020 kesici takımlar ile DIN 1.2379 çeliğinin değişken ilerlemeli tornalanmasında takım serbest yüzey aşınmasını tahmine yönelik takım aşınma modelinin geliştirilmesi, talaşlı imalat alanında çalışan firmalara optimum ilerleme kademelerini belirlemede, üretim maliyetlerini azaltmada ön görücü model olması açısından büyük önem taşımakta ve literatüre katkı sağlamaktadır.

Doktora tezimde bu alanda çalışmamı sağlayan, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, Prof. Dr. Ali ORAL'a çok teşekkür ederim. Bu süreçte çalışmama yön veren, destekleyen, Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR'a, Prof. Dr. Sare ÇELİK'e ve deneysel çalışmalarda sağladığı katkılardan dolayı Sabancı Üniversitesinden Dr. Emre ÖZLÜ'ye çok teşekkür ederim.

**Balıkesir, 2022**

**Berna İMREK**

## 1. GİRİŞ

Talaşlı imalat metal, plastik, ahşap gibi malzemelerin üzerinden ya da iç kısmından talaş adı verilen malzeme kaldırılarak şekil verme işlemidir. Tornalama, frezeleme, delik delme, planya-vargelleme, broşlama, taşlama, honlama, lepleme talaşlı imalat yöntemlerindedir [1]. Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan iş parçası malzemeleri genellikle demir alaşımları, alüminyum, nikel, bakır gibi malzemelerdir. Günümüzde kesici takım malzemelerindeki gelişmeler ile tornalama işlemi ile sert malzemelerin şekillendirilmesi mümkün olmaktadır. Sertlikleri 42-65 HRC arasında olan malzemeler sert malzemelerdir. Sert malzemelerin işlenmesinde kullanılan takımların abrazyon aşınma direnci, kızıl sertlik, basma ve eğilme mukavemeti, difüzyon aşınmasına karşı direnç, kesici kenarın mukavemeti / tokluğu, kimyasal kararlılık gibi özelliklere sahip olması istenmektedir. Sertlikleri 45-50 HRC'den fazla sert malzemeler seramik ya da kübik bor nitrür (CBN) takımlar ile işlenir. Sert malzemelerin işlenmesi sırasında karşılaşılan sorunlardan biri hızlı kesici kenar aşınması ya da kırılmadır [2].

Takımın müsaade edilen aşınma değerine ulaşıncaya kadar geçen çalışma zamanı takım ömrüdür. Takım ömrü aşınmaya bağlıdır. Bu nedenle kesici takım aşınmasını etkileyen iş parçası malzemesi, takım malzemesi, talaş geometrisi, kesme sıvısı kullanımı, kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği, takım geometrisi gibi etkenler takım ömrünü etkilemektedir [2].

Takım aşınmasını etkileyen faktörlerin doğru belirlenmesinin takım ömrünü artıracığı bilinmektedir. Değişken ilerlemeli tornalama stratejisi kullanılması takım ömrünü artırmak için uygulanan işleme stratejisi olarak değerlendirilebilir.

Değişken ilerlemeli tornalama stratejisi, kesici takımın parçaya düşük bir ilerleme değeri ile girmesi ve ardından ilerleme değerinin kademeli olarak öngörülen değere çıkarılması olarak tanımlanır. Kesici takımlar tornalamaya ilk başladıkları anda yüksüz durumda iken aniden maksimum kuvvete maruz kalmaktadır. Değişken ilerlemeli tornalama stratejisi kesme kuvvetlerinin ani olarak yükselen değil de kademeli olarak artışını sağlayan işleme stratejisidir [3].

## **1.1 Tez Çalışmasının Amacı**

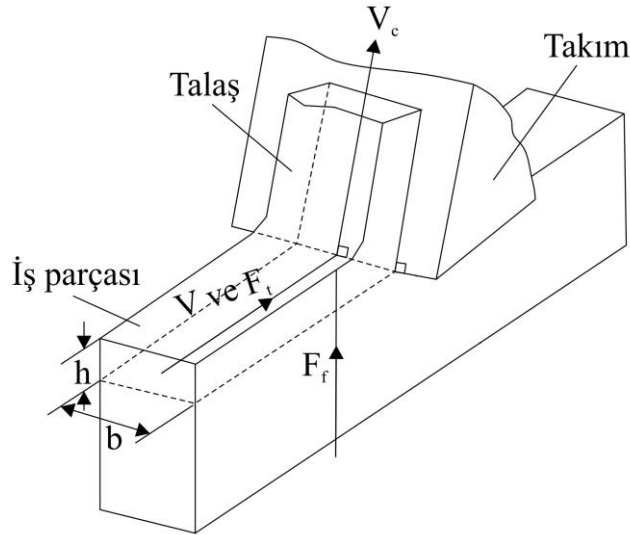
Bu doktora tez çalışmasının amacı; DIN 1.2379 çeliği, TNGA 160404T01020 takım kullanılarak kuru ve kesme sıvısı ile sabit ilerlemeli ve değişken ilerlemeli tornalama deneyleri yapılarak değişken ilerlemeli tornalama işleminin takım serbest yüzey aşınma değeri üzerinde etkisinin araştırılmasıdır. TNGA 160404T01020 takımlar ile DIN 1.2379 çeliğinin değişken ilerlemeli tornalanması işleminin verimliliğini artırmak amacıyla kuru işleme şartlarında optimum değişken ilerleme seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca TNGA 160404T01020 takımlar ile DIN 1.2379 çeliğinin değişken ilerlemeli tornalanmasında, takım serbest yüzey aşınması ve değişken ilerlemenin her kademesi için teğetsel kesme kuvvetleri modellenerek işleme için harcanan zaman ve üretim maliyetlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

## 2. METAL KESME MEKANİĞİ

Bu bölümde talaşlı imalat işleminde dik kesme ve eğik kesme mekaniği, tornalama işlemi hakkında bilgi verilmiştir.

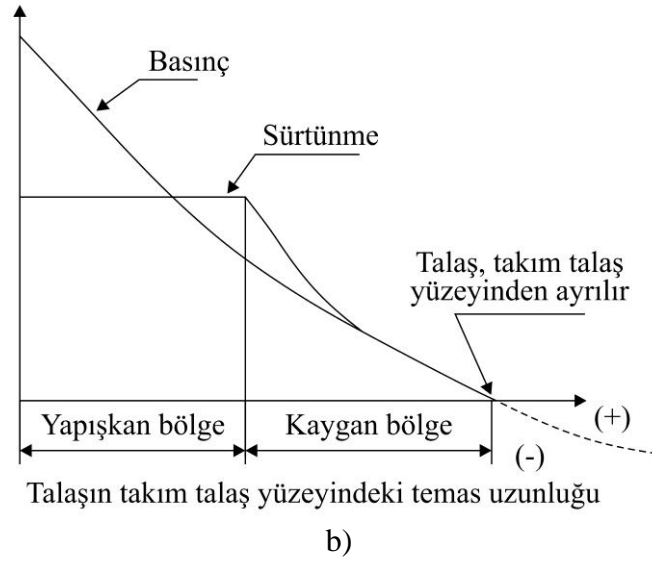
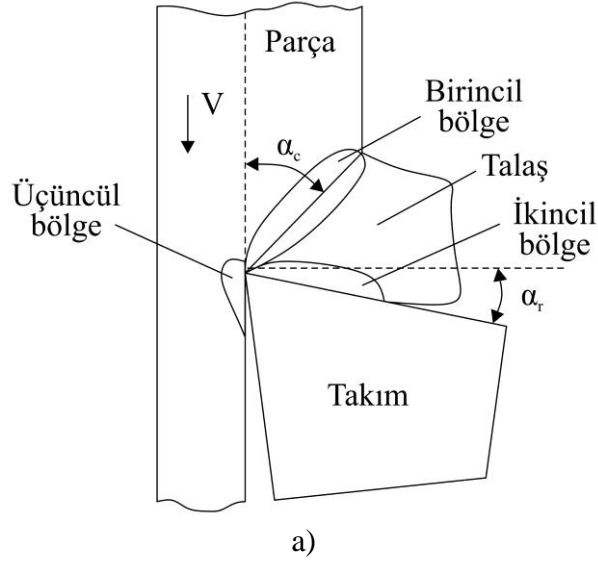
### 2.1 Dik Kesme Mekaniği

Dik kesme, kesme hızına dik konumda yerleştirilmiş düz kesici takım ağzının yaptığı bir şekillendirme gibidir. Dik kesme sürecinde, kesme işleminin takımın kesme ağzı boyunca aynı olduğu varsayılır. Dik kesme işleminde kesme kuvvetleri, kesme hızı ve kesilmemiş talaş kalınlığı yönünde meydana gelir. Bu kuvvetler teğetsel kuvvet  $F_t$  ve ilerleme kuvveti  $F_f$  dir. Teğetsel kuvvet kesme hızı yönünde, ilerleme kuvveti kesilmemiş talaş kalınlığı yönündedir. Dik kesme sürecinin geometrisi Şekil 2.1’de verilmiştir [4].



Şekil 2.1 : Dik kesme geometrisi [4].

Şekil 2.2’de verilen dik kesmenin kesit görüntüsünde görüldüğü gibi kesme süreçlerinde üç deformasyon bölgesi vardır. Kesici takımın kesme ağzının iş parçasında ilerlemesiyle, kesici takım önündeki malzeme birincil kayma bölgesinde kesilerek talaş meydana gelmektedir. Oluşan talaş bir miktar deformasyona uğrayarak ikincil deformasyon bölgesinde takımın talaş yüzeyi üzerinden akar. Takımın serbest yüzeyinin iş parçasının işlenmiş yüzeyi ile temasta olduğu bölge üçüncül bölgedir. Talaş ilk oluştuğunda takımın talaş yüzeyine yapışır bu bölge yapışkanlı bölgedir. Bu bölgede sürtünme gerilimi hemen hemen malzemenin akma kayma gerilimi ile aynıdır. Devamında talaş yapışmayı bırakır ve sabit bir sürtünme katsayısıyla takımın talaş yüzeyinden kayar. Ardından, talaş takımdan ayrılır ve talaş ile takımın talaş yüzeyi ile arasındaki temas sona erer [4].

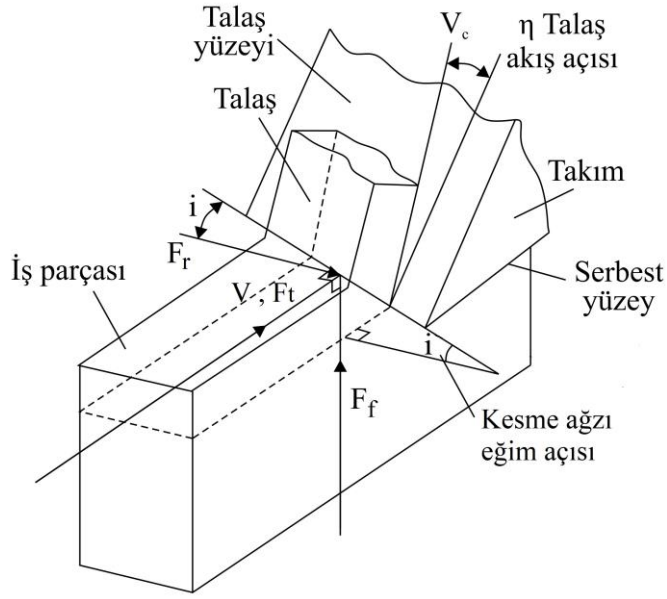


Şekil 2.2: a) Deformasyon bölgeleri, b) takım talaş yüzeyinde yük dağılımı [4].

## 2.2 Eğik Kesme Mekanikliği

Eğik kesme sürecinde, kesme ağzı bir  $(i)$  eğim açısına sahiptir. Eğik kesme işleminde teğetsel kuvvet  $F_t$  ve ilerleme kuvveti  $F_f$  ile beraber radyal yönde radyal kuvvet  $F_r$  oluşur. Eğik kesme sürecinin geometrisi Şekil 2.3’de verilmiştir [4].



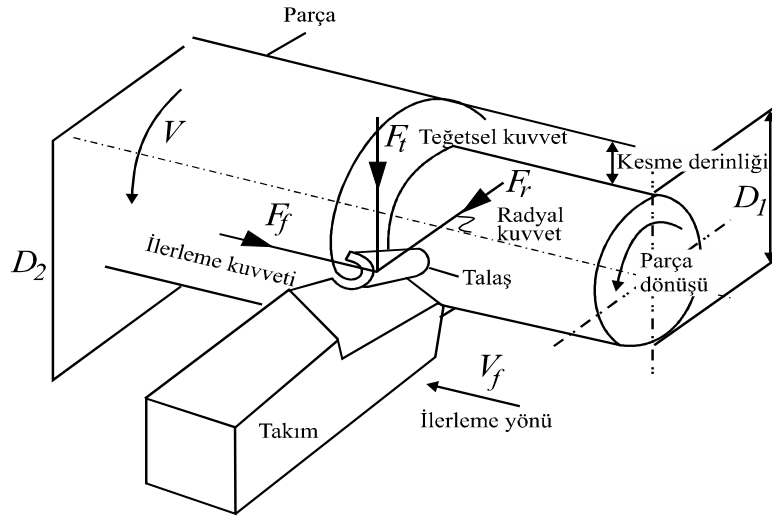


Şekil 2.3: Eğik kesme geometrisi [4].

Eğik kesme işleminde, kesme hızı  $i$  açısı sahip olması nedeniyle sürtünmenin, kaymanın, talaş akışı ve bileşke kesme kuvvetinin Kartezyen koordinatlarda  $x$ ,  $y$ ,  $z$  olarak üç yönde bileşeni mevcuttur.

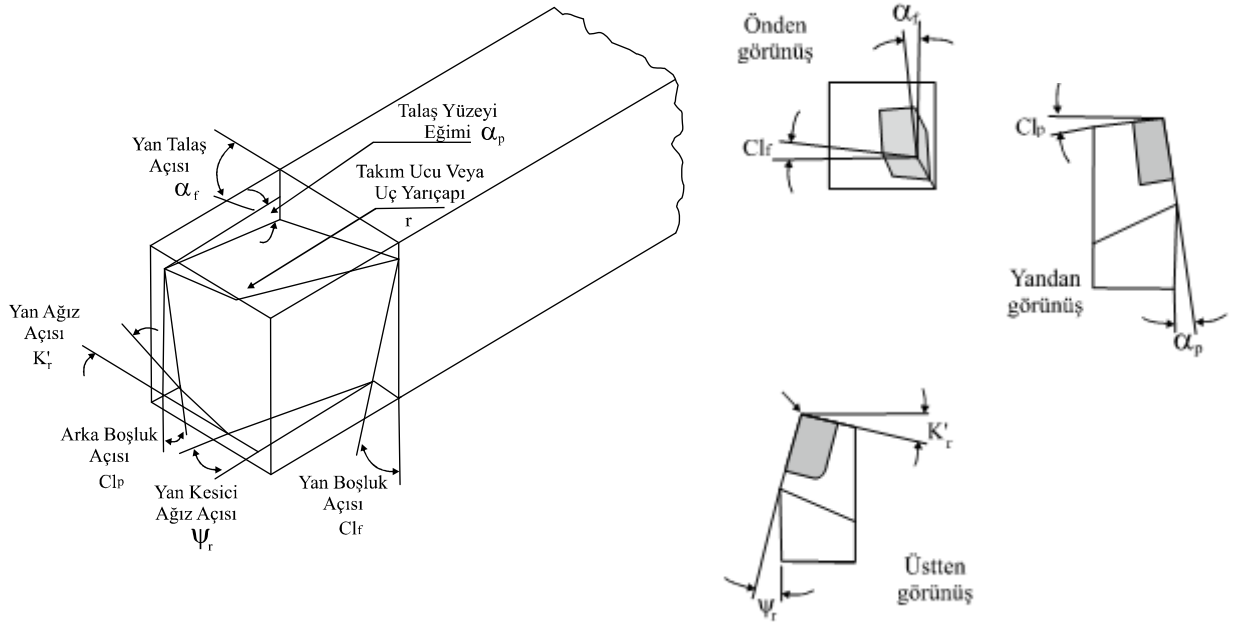
### 2.3 Tornalama İşlemi

Tornalama işlemi iş parçasının dönme hareketi ile takımın ilerleme hareketinin birleşimidir [5]. Silindirik tornalama işleminde iş miline paralel hareket eden kesici takım, iş parçasından bir miktar malzeme kaldırarak iş parçasının çapının düşmesine neden olur. Silindirik tornalama işleminin şematik gösterimi Şekil 2.4’de verilmiştir [4].



Şekil 2.4: Tornalama işleminin geometrisi [4].

Kesici takımında, takım uç yarıçapı, yanaşma açısı, yan talaş açısı, talaş yüzeyi eğim açısı gibi geometrik ifadeler vardır. Takımın talaş yüzeyi ile talaş temastadır ayrıca talaş takımının talaş yüzey boyunca akar. Talaş yüzeyinin kesme ağzı yönündeki eğimi yan talaş açısıdır. Talaş yüzeyinin iş parçası yüzeyine dik bulunan takım ucu yönündeki eğimi talaş yüzeyi eğim açısıdır [4]. Talaş yüzeyi eğim açısı dik kesme işleminde sıfırdır ve yalnız yan talaş açısı göz önünde bulundurulur. Torna işleminde kullanılan tek kesici ağızlı kesici takım geometrisi Şekil 2.5’de verilmiştir. Talaş açlarına göre negatif, sıfır ve pozitif takımlar mevcuttur [4].



**Şekil 2.5:** Torna takımının geometrisi [4].

Eşitlik (2.1), (2.2) ve (2.3)’de eğik kesme işleminin incelenmesinde kullanılan talaş yüzeyi eğim ve yan talaş açısına bağlı açı dönüşümleri verilmiştir [4].

$$\tan \alpha_0 = \tan \alpha_f \cos \Psi_r + \tan \alpha_p \sin \Psi_r \quad (2.1)$$

$$\tan i = \tan \alpha_p \cos \Psi_r + \tan \alpha_f \sin \Psi_r \quad (2.2)$$

$$\tan \alpha_n = \tan \alpha_0 \cos i \quad (2.3)$$

Burada  $i$ ,  $\alpha_0$  ve  $\alpha_n$  eşdeğer eğik, dik ve normal talaş açısıdır. Eğik kesme takımları için kesme kuvvetlerini hesaplamadan önce eşdeğer eğik ( $i$ ) ve normal talaş ( $\alpha_n$ ) açıları hesaplanır [4].

## 2.4 Takım Ömrü

Takım ömrü takımın izin verilen aşınma değerine ulaşıncaya kadar geçen çalışma zamanı olarak ifade edilir. Taylor'un takım ömrü ve kesme hızı arasında deneylere göre belirlen Eşitlik (2.4)'deki bağıntısı vardır [1].

$$V_c \cdot T^n = C \quad (2.4)$$

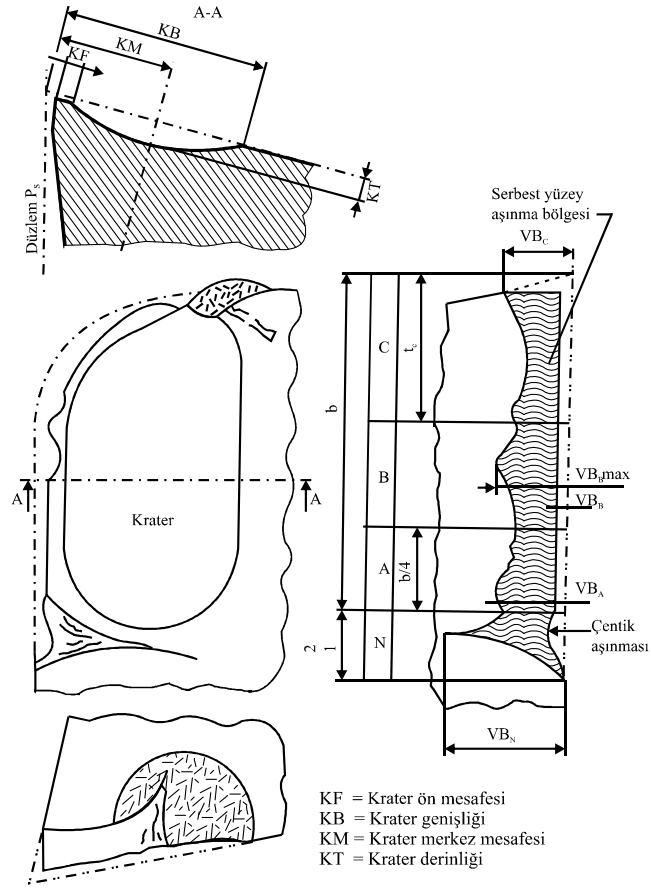
Burada;  $V_c$  kesme hızı,  $T$  takım ömrü,  $n$  parça ve takım malzemesine bağlı sabit,  $C$  deney koşullarına bağlı sabit, 1 dakikalık takım ömrüne karşılık gelen kesme hızıdır.

Takım ömrü deneylerdeki gibi sadece kesme hızı değil, gerçekte ilerleme ve kesme derinliği değerlerine de bağlıdır. Bu nedenle genişletilmiş Taylor bağıntısı Eşitlik (2.5)'de verildiği gibidir. Bu eşitlikte takım ömrü üzerinde  $V_c$  kesme hızının etkisi en yüksek,  $f$  ilerlemenin etkisi daha az,  $a_p$  kesme derinliğinin etkisi en azdır. Bundan dolayı  $k > x > y$  dir [1].

$$T = \frac{c_0}{(V_c^k \cdot f^x \cdot a_p^y)} \quad (2.5)$$

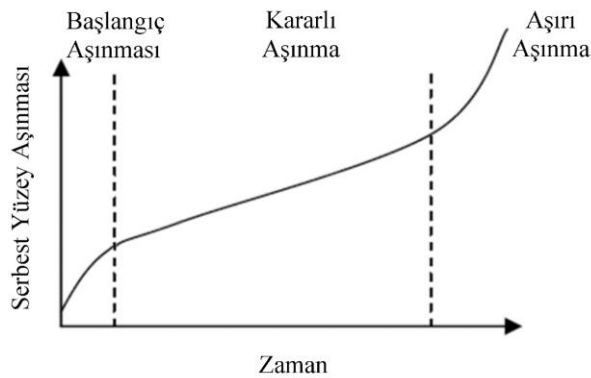
## 2.5 Takım Aşınması

Talaş ile takım yüzeyleri arasındaki, ısı oluşumu, sürtünme ve talaş baskısı nedeniyle kesici takımında aşınma oluşur [1]. Aşınma üzerinde, takım, iş parçası malzemesi ve işleme koşullarının etkileşimi etkilidir. Talaş kaldırma işlemi sırasında tüm takımlar aşınır ve aşınma takım ömrünü tamamlayana kadar sürer [2]. ISO 3685 standartlarında takım ömrü kriteri 0,3 mm'lik serbest yüzey aşınması değeri olarak tanımlanmıştır [6,7]. Serbest yüzey aşınması Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6: ISO 3685'e göre serbest yüzey aşınması [8].

Kesici takımında serbest yüzey aşınma miktarının zamana göre değişimi Şekil 2.7'de verilmiştir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi serbest yüzey aşınması zamana bağlı olarak, 3 bölgede oluşur. Birinci bölge başlangıç aşınması, ikinci bölge kararlı aşınma ve üçüncü bölge aşırı aşınma bölgesi olarak adlandırılır [9]. İlk bölüme karşılık gelen başlangıç aşınması zamanından sonra serbest yüzey aşınması, kritik bir aşınma genişliğine ulaşılan kadar sabit bir oranda yavaş yavaş artar bundan sonra aşınma hızlanır ve şiddetli hale gelir [8].



Şekil 2.7: Serbest yüzey aşınmasının zamana bağlı değişimi [8].

Serbest yüzey aşınmasının zamana bağlı gelişiminde, serbest yüzey aşınma değerinin 0,1 mm'lik miktarı, başlangıç aşınmasıdır. Gelişimi çok hızlı gerçekleşen başlangıç aşınması miktarı, toplam aşınmanın üçte birini oluşturmaktadır [9].

### 2.5.1 Aşınmaya Neden Olan Temel Yük Faktörleri

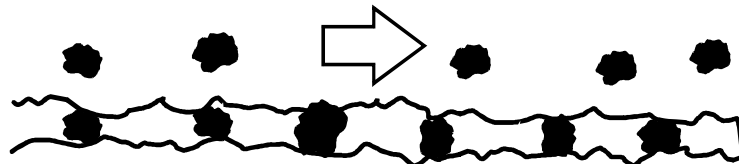
Mekanik, ısı, kimyasal ve (abraziv) aşındırıcı yük olmak üzere takım aşınmasına neden olan temel dört yük faktörü vardır. Mekanik yükün statik bileşeni ve aralıklı kesme işlemlerinden kaynaklanan dinamik bileşenleri de vardır. Talaş kaldırma işlemi kesici ucun talaş yüzeyi ve serbest yüzeyinde fazla miktarda ısı oluşur. Isıl yük frezeleme gibi işlemlerde, dinamik bir etkidir. Talaş kaldırma işleminde oluşan yeni metal yüzey takım malzemesi boyunca çok yüksek basınç ve sıcaklıkların etkisi altında kalır. Metallerin difüzyonu ve kimyasal reaksiyonlar için oluşan bu yüzey oldukça uygun bir ortam oluşturur. Abraziv yük, iş parçası malzemesi içerisinde sertlikleri bazen takım malzemesinin sertliğine yakın sert parçacıkların, takım üzerinde aşındırıcı bir etkiye neden olmasıdır [10].

### 2.5.2 Aşınma Mekanizmaları

Talaş kaldırma işlemi sırasında kesici kenar üzerine etkiyen çeşitli yük faktörleri nedeniyle abraziv, difüzyon, oksidasyon, yorulma, adhesive olarak bilinen bazı temel aşınma mekanizmaları talaş kaldırma işlemine etkide bulunurlar [2].

#### 2.5.2.1 Abraziv Aşınma

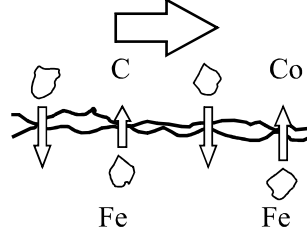
Oluşan talaş altındaki sert parçacıkların takım yüzeyinden geçerken meydana getirdiği aşınma mekanizmasıdır. İş parçası malzemesinin sert parçacıklar içeren parçaların işlenmesinde görülür. Takım malzemesinin, sert parçaların sertliğinden daha sert belirlemek bu tip aşınma mekanizmasını engelleyen yöntemlerden biridir [11]. Abraziv aşınma mekanizması şematik olarak Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8 : Abraziv aşınma mekanizması [2].

### 2.5.2.2 Difüzyon Aşınması

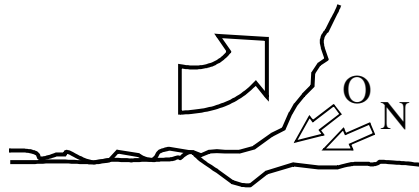
İş parçası malzemesi ile takım malzemesi arasındaki sürtünmenin etkisi ile oluşan yüksek sıcaklıklar nedeni ile birbirine kimyasal ilgisi olan malzemeler arasında difüzyon meydana gelir. Bu difüzyon kesici takım yüzeyinin zayıflamasına neden olur ve difüzyon aşınması olarak tanımlanır [11]. Difüzyon aşınma mekanizması şematik olarak Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 : Difüzyon aşınma mekanizması [2].

### 2.5.2.3 Oksidasyon Aşınması

Kesici takım bileşenleri (özellikle bağlayıcı) atmosferdeki oksijen ile reaksiyona girdiğinde oksidasyon meydana gelir. Çoğunlukla parçanın serbest yüzeyinin yakınında meydana gelir, burada takımın sıcak kısmı ve takım-talaş temas bölgesinin çevresi atmosfere maruz kalmaktadır. Oksidasyon genellikle ciddi sonuçlar doğurur. Aşınma artıklarının veya iş malzemesi parçacıklarının oksidasyonu ayrıca aşınmayı artıran sert oksit parçacıklarının üretilmesine neden olabilir. Oksidasyon alüminyum oksit esaslı seramik takımlarda oluşmaz [8]. Şematik olarak oksidasyon aşınma mekanizması Şekil 2.10'da verilmiştir.

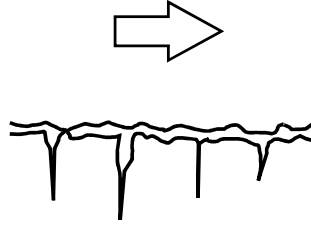


Şekil 2.10 : Oksidasyon aşınma mekanizması [2].

### 2.5.2.4 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması termo-mekanik bir olay olan, sıcaklık dalgalanmaları ve takıma etkileyen kesme kuvvetlerinin sıfır ve en yüksek değerler arasında olması, kesici kenarda çatlaklara ve kırılmalara neden olur. Aralıklı kesme işlemi, sürekli olarak ısınıp soğumaya aynı zamanda kesici kenarda şok etkisine sebep olur. Kesme kuvvetlerinin, kesici kenarın

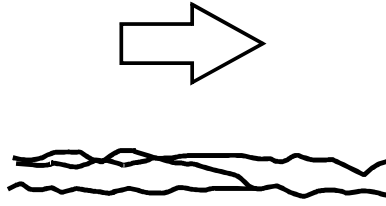
mukavemetinden çok yüksek olduğunda mekanik yorulma ortaya çıkar [2]. Yorulma aşınma mekanizması şematik olarak Şekil 2.11’de verilmektedir.



Şekil 2.11 : Yorulma aşınma mekanizması [2].

#### 2.5.2.5 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınmaya takımın talaş yüzeyindeki düşük sıcaklıklar neden olur. Adhesiv aşınma mekanizması büyük bir çoğunlukla kenar ile talaş arasında yığma kenar oluşumuna sebep olur [2]. Şematik olarak adhesiv aşınma mekanizması Şekil 2.12’de verilmektedir.



Şekil 2.12 : Adhesiv aşınma mekanizması [2].

#### 2.5.3 Takım Aşınma Tipleri

Kesici takımlarda görülen aşınma tipleri; krater aşınması, serbest yüzey aşınması, plastik deformasyon, ısıl çatlaklar, mekanik yorulma çatlakları, çentik aşınması, kesici kenardan parçacık kopması, kesici ucun kırılması ve yığma kenar oluşumudur [2].

##### 2.5.3.1 Serbest Yüzey Aşınması

Kesici kenarın serbest yüzeyinde abraziv aşınma mekanizması nedeniyle oluşan aşınma tipidir. Ana kesici kenar, yardımcı kesici kenar ve uç yarıçapı veya paralel kenar talaşın oluşumu sırasında ve sonrasında iş parçası ile temas etmesi sonucu oluşur. En sık görülen aşınma tipidir ve istenen serbest yüzey aşınmasının gelişiminin kontrolünün sağlamaktır. Belirli bir değeri aştığında yüzey kalitesi olumsuz etkilenir, sürtünme artar, hassasiyet azalır [2]. Serbest yüzey aşınmasına ait bir görüntü Şekil 2.13’de verilmiştir.



**Şekil 2.13 :** Serbest yüzey aşınması [12].

### 2.5.3.2 Krater Aşınması

Kesici takım ucu talaş yüzeyi ile takım talaş yüzeyinden akan sıcak talaşın kimyasal etkileşimi nedeniyle oluşur. Takım krater dayanımının iyileştirilmesi için kaplamalı kesici takımlar kullanılabilir [11]. Krater aşınması olmuş bir kesici takım uç görüntüsü Şekil 2.14’de verilmiştir.



**Şekil 2.14:** Krater aşınması [12].

### 2.5.3.3 Plastik Deformasyon

Plastik deformasyon, kesici kenar üzerindeki yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkların birlikteliği nedeniyle oluşan takım geometrisinde deformasyona, yüksek sıcaklıklar ve talaş akışında değişmelere yol açan aşınma tipidir. Takım malzemesinde plastik deformasyon görülmemesi için yüksek kıvılcık sertlik özelliği istenir [2]. Şekil 2.15’de bir kesici takımda oluşan plastik deformasyon görülmektedir.



**Şekil 2.15:** Plastik deformasyon [12].



#### 2.5.3.4 Çentik Aşınması

Çentik aşınması, adezyon ve oksidasyon aşınma mekanizmaları, çentik aşınmanın oluşumunu etkilemektedir. Çentik, kesici kenar ile iş parça malzemesinin ayrıldığı yerde gözlenir. Aşırı çentik aşınması, ince işlemlerde yüzey kalitesini etkiler ve kesici kenar mukavemeti azalır [2]. Şekil 2.16’da kesici bir takımında oluşan çentik aşınması görülmektedir.



Şekil 2.16: Çentik aşınması [12].

#### 2.5.3.5 Isıl Çatlaklar

Genellikle, frezelemede meydana gelen sıcaklık değişimleri bu aşınmanın oluşmasında etkilidir. Isıl çatlaklar kesici kenara dik olarak meydana gelir ve takım malzemesi kesici kenardan ayrılmaya zorlanır. Bunun sonucu, takımın kırılma meydana gelebilir. Ayrıca sıcaklıklar üzerinde değişen talaş kalınlığında etkisi vardır [2]. Şekil 2.17’de görülen termal çatlaklar, genelde ısı dağılımı sebebiyle görülen yorulma aşınmasıdır.



Şekil 2.17: Isıl çatlaklar [12].

#### 2.5.3.6 Mekanik Yorulma Çatlakları

Mekanik yorulma çatlakları, kesme kuvvetlerindeki ani değişimler nedeni ile meydana gelir. Mekanik yük tek başına çatlak oluşturmaya neden olmayacak büyüklüktedir fakat, sürekli değişimi çatlakla neden olur. Mekanik yorulma çatlakları kesici kenara paralel oluşur [2].

### 2.5.3.7 Kenardan Parçacık Kopması

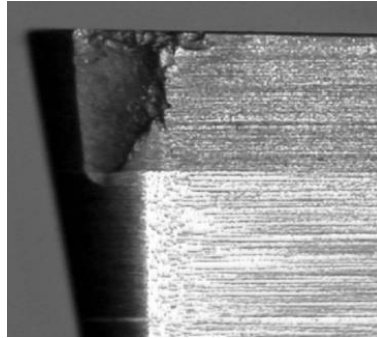
Takıma etkiyen yükün sürekli olarak alt ve üst değerler arasında değişmesi ile kaynaklanan yorulmanın etkisi ile kesici takım malzemesinden küçük parçacıkların takım yüzeyinden ayrılmasıdır. Çoğunlukla, darbeli kesme işlemlerinde görülür [2]. Kenardan parçacık kopması gerçekleşmiş bir takım görüntüsü Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18: Kenardan parçacık kopması [12].

### 2.5.3.8 Takım Kırılması

Kırılma, kesici kenarın ömrünün tamamen sona ermesidir. Kenarda oluşan büyük kırılma en tehlikeli kırılma türü olup mümkün olduğunca bu durumdan uzak durulmalıdır. Bu aşınmanın oluşmasında, geometrinin değişmesi, kesici kenarın zayıflaması, sıcaklık ve kuvvet yükselmeleri etkilidir. Ağır talaş kaldırma şartlarında, yüksek kesme hızlarında, kenar üzerindeki gerilmelerin kesici takımın mukavemet sınırını aşması ile kırılma görülebilir [2]. Takım kırılması görüntüsü Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19 : Takım kırılması [8].

### 2.5.3.9 Yığılma Kenar

Yığılma kenar, büyük çoğunlukla sıcaklık ve sıcaklıkla bağlantılı bir durum olan kesme hızının etkisindedir. Takım yüzeyine kaynak olan malzeme nedeniyle oluşarak takım kenarından parçacık kopmasına sebep olacağından bu tip aşınma istenmez. Takım ile iş parçası arasındaki afinite de bu tip aşınmanın oluşmasına etkide bulunur. Yüksek basınçlar



Merchant diyagramından, dik kesme sürecinde bileşke kesme kuvveti  $F_c$  ilerleme kuvveti  $F_f$  ve teğetsel kuvvete  $F_t$  bağlı olarak Eşitlik (2.6)'daki gibi yazılabilir [4].

$$F_c = \sqrt{F_t^2 + F_f^2} \quad (2.6)$$

Merchant'ın ince düzlem varsayımına göre optimum kesme açısı, talaş kaldırma olayının en düşük enerji ile yani minimum enerji ilkesine göre Eşitlik (2.7)'deki gibi ifade edilmektedir [1].

$$\phi_0 = 45^\circ - \frac{\rho - \gamma_0}{2} \quad (2.7)$$

Burada ( $\rho$ ) sürtünme açısıdır.  $\rho$  sürtünme açısı,  $\mu$  sürtünme katsayısına bağlı olarak Eşitlik (2.8)'de verildiği gibi hesaplanır [1].

$$\rho = \arctan \mu \quad (2.8)$$

Sürtünme açısının  $\rho$  belirlenmesi zor olduğundan; kesme kuvvetleri, belirli kesme koşullarında yapılan deneylerle belirlenen özgül kesme kuvveti  $k_s$  faktörüne bağlı hesaplanır. Kesme kuvveti ( $F_c$ ) Eşitlik (2.9) 'da verilen bağıntı ile hesaplanır [1].

$$F_c = A_s \cdot k_s \quad (2.9)$$

Burada  $k_s$  özgül kesme kuvveti,  $A_s$  talaş kesitidir.  $A_s$  talaş kesiti,  $h$  talaş kalınlığı ve  $b$  talaş genişliğine bağlı olarak Eşitlik (2.10)'dan hesaplanır.

$$A_s = h \cdot b \quad (2.10)$$

Şekil 2.22'de görülen talaş genişliği  $b$  ve talaş kalınlığı  $h$ , Eşitlik (2.11) ve Eşitlik (2.12)'den hesaplanır [1].

$$b = \frac{a_p}{\sin \chi} \quad (2.11)$$

$$h = f \cdot \sin \chi \quad (2.12)$$

Burada  $a_p$  kesme derinliği,  $\chi$  takımın parçaya göre konumunu gösteren yerleşme açısı,  $f$  ilerlemedir.

Özgül kesme kuvveti Eşitlik (2.13)'de verildiği gibi ifade edilir [1].

$$k_s = k_{sh} \cdot k_\gamma \cdot k_\lambda \cdot k_{ty} \cdot k_{ks} \cdot (k_a) \quad (2.13)$$

Burada  $k_{sh}$  talaş kalınlığına bağlı esas özgül kesme kuvveti,  $k_\gamma$  talaş açısı faktörü,  $k_\lambda$  eğim açısı faktörü,  $k_{ty}$  takım malzemesi ve talaş kaldırma yöntemi faktörü,  $k_{ks}$  kesme sıvısı faktörü,  $k_a$  aşınma faktörüdür. Esas özgül kesme kuvveti  $h$  talaş kalınlığına bağlı Eşitlik (2.14)'den hesaplanabilir [1].

$$k_{sh} = \frac{k_{s1.1}}{h^{z_c}} = k_{s1.1} \cdot h^{-z_c} \quad (2.14)$$

Burada  $k_{s1.1}$   $h = 1$  mm ve  $b = 1$  mm olan talaş kesitine karşılık birim özgül kesme kuvvetidir.  $z_c$  parça ve takım malzemesinin etkisini gösteren faktördür [1].

Kesme kuvveti Eşitlik (2.15)'de verilmiştir. Kesme kuvveti gerekli düzenlemelerden sonra Eşitlik (2.16) ve son olarak Eşitlik (2.17)'deki denklem ile ifade edilmektedir [1].

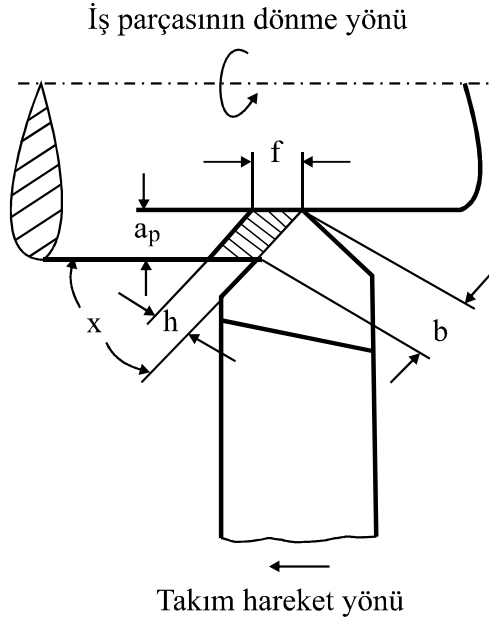
$$F_c = h \cdot b \cdot k_{sh} \cdot k_\gamma \cdot k_\lambda \cdot k_{ty} \cdot k_{ks} \cdot (k_a) \quad (2.15)$$

$$F_c = h \cdot b \cdot k_{s1.1} \cdot h^{-z_c} \cdot k_\gamma \cdot k_\lambda \cdot k_{ty} \cdot k_{ks} \cdot (k_a) \quad (2.16)$$

$$F_c = k_{s1.1} \cdot k_\gamma \cdot k_\lambda \cdot k_{ty} \cdot k_{ks} \cdot (k_a) \cdot b \cdot h^{1-z_c} \quad (2.17)$$

Burada;  $h$ : talaş kalınlığı ve  $b$ : talaş genişliğidir.

Kienzle-Victor modeli, kuvvet bileşenlerinin hesaplanmasında, yaygın olarak kullanılan bir modeldir [13].



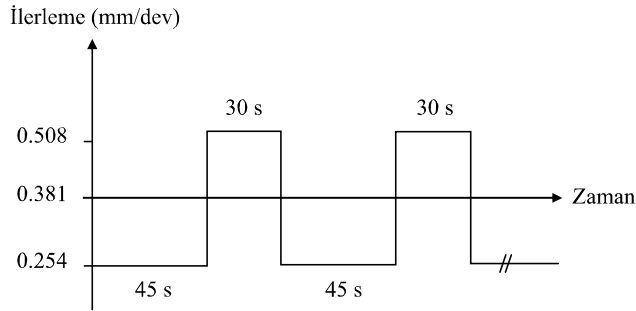
Şekil 2.22 : Takım yavaşma durumu [14].

### 3. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, talaşlı imalat işlemlerinde kesme koşullarının değişken olarak uygulandığı çalışmalar bulunmaktadır. Örnek olarak değişken ilerleme, değişken kesme hızı kullanılan bu çalışmalarda, uygulanan değişken kesme koşulunun takım aşınması, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, çıkış çapağı, talaş kırılması üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Talaşlı imalat işlemlerinde iş parçasının işlenmesinde uygun kesici takım geometrisinin seçilmesi, optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinin üretim kalitesi ve maliyeler bakımından önemli olduğu bilinmektedir. Deneysel çalışmalar maliyetli ve zaman alan çalışmalar olduğu için talaşlı imalat işlemlerinde modelleme çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Modelleme yöntemleri, ampirik modelleme, analitik modelleme, mekanik modelleme, FEA modellemesi, bu modellerden birini yapay zeka ile birleştiren yöntemler olarak beş genel kategoride ele alınabilir [15]. Talaşlı imalat alanında çalışmayı en iyi ifade edecek modelleme yöntemi belirlenerek yapılan modelleme çalışmalarına ve optimum kesme koşullarının belirlenmesine yönelik çalışmalara literatürde sıklıkla rastlanmaktadır.

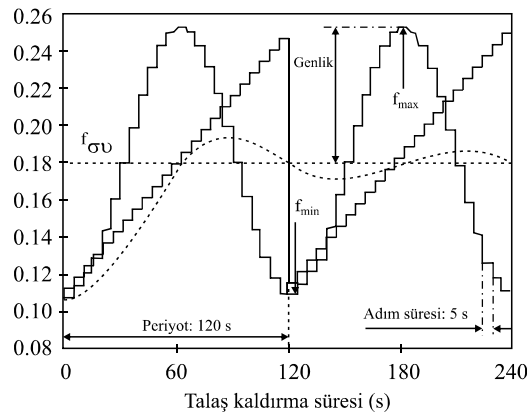
M. Balazinski ve Ch. Mpako çalışmalarında, 4140 çeliğinin SNMA 120408-E-R (ISO) kesici takım ile iki ayrı ilerleme değeri ile tornalanması deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme derinliği 1 mm, kesme hızı 122 m/dak., değişken ilerleme 0,245mm/dev ve 0,508 mm/dev değerlerinin ortalaması 0,381 mm/dev sabit ilerleme değeri olarak belirlenmiştir. İki farklı ilerleme değeri Şekil 3.1’de görüldüğü gibi biri 45 saniye diğeri 30 saniye olarak uygulanmıştır. Ayrıca 20 saniye ve 10 saniyeye olarak belirlenen süreler için de aynı ilerleme değerleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde kesme sıvısı kullanılmamıştır [16].



Şekil 3.1: İlerleme değişimi grafiği [16].

0,254 ve 0,508 mm/dev ilerleme değerleri için krater derinliği ve krater merkez pozisyonu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 1428 mm, 2143 mm ve 2852 mm olarak üç farklı kesme uzunluğu için işleme yapılmıştır. Her bir kesme uzunluğu için krater derinliği ölçümü sabit ilerlemeli, 45/30 değişken ve 20/10 değişken ilerleme olmak üzere üç farklı kesme uzunluğundaki işleme için alınmıştır. Bu yöntem basit ve kolay uygulanabilir. İki farklı ilerleme kullanımı ile krater aşınmasında %30-70 azalma gözlenir. İlerlemenin değiştiği bölgelerde yüzey hataları görüldüğünden, yüzey pürüzlüğü önemli ise bu yöntemin kullanılması önerilmez [16].

M. Balazinski vd. çalışmalarında, değişken ilerlemenin Inconel 600 iş parçasının frezelenmesinde takım ömrüne etkisini araştırmıştır. Deneysel olarak sabit talaş kaldırma hacmi dikkate alınarak, değişken ilerleme 5s'lik artışlarla, Şekil 3.2'de görülen artan-azalan ve doğrusal fonksiyon şeklinde iki farklı yöntemle uygulanmıştır [17].

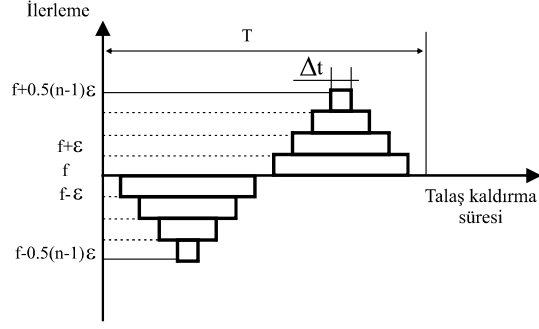


**Şekil 3.2:** İlerlemenin artan-azalan ve doğrusal artışlı gösterimi [17].

Inconel 600 iş parçasının frezelenmesi deneylerinde SPKN 1203 EDR kesici takım kullanılmıştır. Kesme hızı  $V_c = 22,6$  m/dak., kesme derinliği 1 mm, ilerleme aralığı 0,1 - 0,25 mm/dev olarak belirlenmiştir. Değişken ilerlemenin, artan-azalan ve doğrusal fonksiyona bağlı frezelemesinde krater aşınmasının sabit ilerleme değerine göre %30 azaldığı görülmüştür [17].

Z. Klim vd., 17-4PH paslanmaz çeliği frezeleme deneylerinde ANSI- SEM 43A kesici takım,  $V_c = 92$  m/dak,  $a_p = 1$  mm olarak kullanılmıştır. İlerleme 0,8 mm/dev veya değişken dizi döngüye göre  $\Delta t = 13,5$  s,  $T = 2$  dak,  $\epsilon = 0.025$ ,  $n = 5$  olarak ilerlemenin değişimi Şekil 3.3'de görüldüğü gibidir [18].

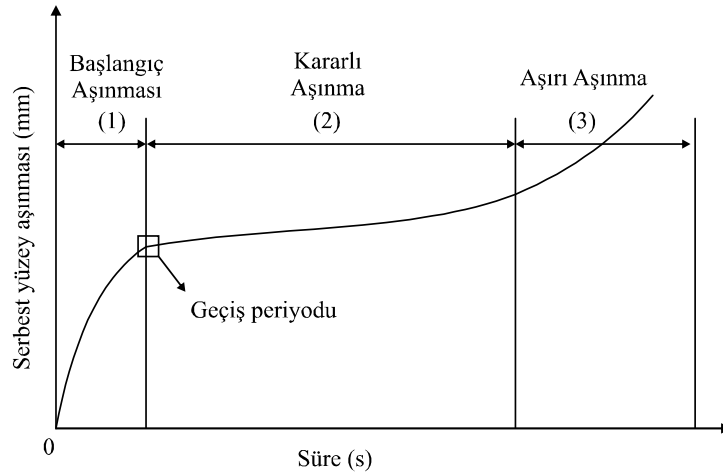




**Şekil 3.3:** İlerleme değişimi [18].

Endüstride uygulaması kolay olan bu yöntemin takım ömrünü belirli oranlarda %40 mertebesinde iyileştirdiği gösterilmiştir. Çalışmada, ilerleme değişiminin takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkisinin nicel çalışması için bir güvenilirlik modeli sunulmuştur [18].

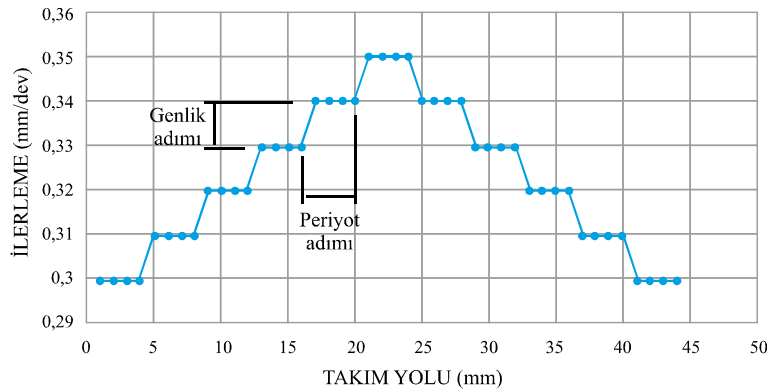
M. Memarianpour vd., çalışmasında, başlangıç koşulları 4 saniye olarak belirlenen geçiş periyodunda değiştirilerek, takım aşınması ve takım ömrü incelenmiştir. Takım aşınmasının morfolojisi, boyutu kaydedilmiş ve her koşulda analiz edilmiştir. Çalışmada  $\varnothing 118$  mm olan Inconel 718 iş parçası malzemesi, TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (PVD) kaplı CNMG 432-MR4 TS2500 kesici takım kullanılmıştır. Tornalama deneyleri CNC-Mazak Nexus 200 tezgahta kuru işleme şartlarında yapılmıştır. Yazarların önceki çalışmalarının sonuçlarına göre, kesme süresinin 4. saniyesi geçiş noktası olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi kesme işlemlerinde ilk 4s geçiş periyodu olarak dikkate alınmıştır. Geçiş periyotlarında kullanılan beş farklı kesme koşulu belirlenmiştir [19].



**Şekil 3.4 :** Takım aşınma eğrisi [19].

5 deneyde başlangıç kesme hızı 25 - 65 m/dak, ve başlangıç ilerleme değeri 0,15 - 0,35 mm/dev aralığında belirlenmiştir. İlk deneydeki kesme koşulları referans kesme koşulu olarak kabul edilmiştir. Tüm deneylerde geçiş noktasından sonra referans kesme koşulları uygulanmıştır. Tüm deneylerde kesme derinliği 1 mm olarak sabit tutulmuştur. Geçiş periyodunda daha düşük bir kesme hızı ve ilerleme hızının uygulanmasının, referans koşula kıyasla daha iyi takım ömrü sağladığı görülmüştür. Diğer bir deyişle çalışmada, kesme işleminin geçiş döneminde optimum kesme parametrelerinin kullanılması, takım ömrünü uzatarak daha uzun kesme süresi sağlayabilir denmektedir. Örneğin, başlangıç 0,15 mm/dev ilerleme hızı ve 25 m/dak kesme hızı kullanılması, sırasıyla nihai takım ömründe yaklaşık %67 ve %50 oranında iyileşmeye denen olmuştur. Ayrıca, 25 m/dak olarak daha düşük başlangıç kesme hızının uygulanması, kesici uç 300 µm'lik en yüksek serbest yüzey aşınmasına ulaştığında, daha yüksek başlangıç kesme hızlarına göre takım ömrünü yaklaşık %50 artırmıştır. Ayrıca, talaş yığıma kenar (BUE), tüm kesme koşullarında birincil aşınma modu olarak sergilenmiştir [19].

O. M. İşleyen, iş parçası 1.2738 çeliğinin frezelemesinde, kesme parametrelerinden ilerleme ve kesme hızının, talaş kaldırma sırasında değiştirilmesinin serbest yüzey aşınması ve takım ömrüne etkilerini araştırmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takım 4 köşeli, talaş kırıcısız, kaplamasız SPHN 120408 takımdır. ISO 3685 kriterindeki, VB = 0,3 mm serbest yüzey aşınma değeri aşınma kriteri belirlenmiştir. Çalışmada kesme hızının sabit, ilerlemenin değişken olduğu, ilerlemenin sabit olduğu kesme hızının değiştiği ve hem kesme hızının hem de ilerlemenin değiştiği deneyler araştırılmıştır. Kesme derinliği 2 mm olarak belirlenmiştir. Deneylerde her 4 mm işlemede bir ilerleme değişimi gerçekleştirilmiştir [20]. İlerlemenin değişim grafiği Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5 : İlerlemenin değişimi [20].

Deneyleer değerlendirildiğinde takım ömründe ortalama %50 iyileşme olduğu ve değişken ilerlemenin, değişken kesme hızına göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Değişken kesme hızınının değişken ilerleme ile beraber uygulandığı deneylerde frekans arttıça takım aşınmasında azalma, takım ömründe artış görülmektedir. Deneyleerde frekans 22 mm, 44 mm ve 66 mm olarak aynı periyotlar olarak belirlenmiştir. Takım mr açısında incelendiğinde talaş kaldırma işleminde kesme hızını ve ilerlemeyi birlikte değiştirmek, sadece kesme hızı yada sadece ilerleme değiştirildiğindeki sonuçtan iyi görülmüştür [20].

M. Balazinski vd., 17-4PH paslanmaz çeliğin değişken ilerleme ile frezelemesinin takım aşınmasına etkisi incelemiştir. Sandvik SEM43A ve GC235 takım, kesme hızı  $V_c = 92$  m/dak, 0,8 mm/dev sabit ilerleme değeri belirlenmiştir. 14 dakika sabit ilerleme, 18 dakika değişken ilerleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Değişken ilerleme de takım ömründe %30 olumlu iyileşme görülmektedir [21].

K. zdemir çalışmasında, kesme parametrelerinden ilerleme, kesme hızı, kesme derinliği ayrıca farklı yavaşma açısının başlangıç aşınmasına olan etkilerini araştırmıştır. Östemperlenmiş dökme demir iş parçası malzemesinin, TNMG 160408 sinterlenmiş karbür kesici takım kullanılarak tornalanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmasından elde edilen veriler kullanılarak çalışılan şartlarda başlangıç aşınmasının azaltılması için önerilere yer verilmiştir [7].

A. Oral vd., çalışmalarında 1050 eliğinin WNMG 080408 takımlar kullanarak değişken ilerlemeli tornalama deneyleri yapmışlardır. Deneyleerde kesme sıvısı kullanılmamış ve kesme hızı 260 m/dak, kesme derinliği 2 mm olarak belirlenmiştir. Çalışmada talaş kaldırma işleme; önerilen ilerlemenin altında bir ilerleme değeri ile başlanmış ve istenilen ilerleme değerine kademeli olarak çıkılarak, takımın parçaya girdiği andaki kesme kuvvetlerinin azaltılması dolayısı ile başlangıç aşınmasının azaltılması sağlanmıştır. Tornalama işlemlerinde başlangıç aşınmasının azaltılması çalışmasında; ilk aşınma bölgesinde oluşun aşınmaların, takımın iş parçasına ilk temasında meydana gelen yüksek kesme kuvvetleri sebebiyle oluştuğu belirtilmektedir. Takım parçaya girdiği ilk andaki kesme kuvvetleri düşük olursa başlangıç aşınmasının da düşük olacağı ifade edilmiştir [22].

A. Oral vd., çalışmalarında AISI 1050 iş parçası malzemesinin TiN kaplamalı CNMG 120408-NC3020 kesici takım kullanılarak değişken ilerlemeli tornalanma işleminde

başlangıç aşınmasındaki azalmanın takım ömrüne etkisini araştırmışlardır. İlerleme değerleri başlangıçta 1 mm uzunlukta 0,15 mm/dev ile yapılmış sonraki 1 mm'lik uzunlukta 0,20 mm/dev ile çalışılmış devamında 0,25 mm/dev değerine çıkarılmıştır. Çalışmada  $V_c = 280$  m/dak ve kesme derinliği 3 mm olarak sabit bir değerde kullanılmıştır. Deneylede soğutma sıvısı kullanılmamıştır. 120 saniye için yapılan değişken ilerlemeli tornalama işleminde takım ömrünün %47 oranında artığı belirlenmiştir [3].

A. Oral vd., çalışmalarında iş parçası malzemesi olarak AISI 1050 malzeme ve DNMG-150608 ve CNMG-120408 farklı iki kesici takım ile sabit ve değişken ilerlemeli tornalama deneyleri yapmışlardır. Çalışmada takım ömrünün sabit ilerlemeli tornalama işlemine göre %35 artış gösterdiğini belirtmişlerdir [23].

A. Oral vd. , CNGA 120404T02020 - KY1615 seramik takım ile DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği iş parçası ile soğutma sıvısı kullanılmaksızın sabit ve değişken ilerlemeli olmak üzere kaba tornalama deneyleri yapmışlardır. Kesme koşullarından  $V_c = 100$  m/dak ve  $a_p = 3$  mm olarak belirlenmiştir. Deneyler 5s, 10s, 40s, 80s, 160s süreleri için yapılmış ve deneylerin sonunda serbest yüzey aşınma ölçümleri alınmıştır. Deneylede ilk 1 mm 0,100 mm/dev, devamındaki 1 mm 0,125 mm/dev ve kalan tornalama uzunluğu 0,150 mm/dev ilerleme ile tornalanmıştır. Sabit ilerlemeli tornalama deneylerinde ilerleme 0,150 mm/dev dir. Değişken ilerlemeli tornalama işlemi kullanıldığında sabit ilerlemeli tornalamaya göre başlangıç aşınmasının daha düşük olduğu buna bağlı olarak da takım ömrünün artış eğilimi gösterdiği ifade edilmiştir [24].

U. Emiroğlu vd., çalışmalarında iş parçası olarak Al7175 alüminyum alaşımı ve AISI 4140, AISI 1040 çelik malzemeler ve kaplamasız ve talaş kırıcısız DNMA 150608 ve SPUN 120908 kesici takımlar kullanmışlardır. İş parçalarının kaba ve ince işlenmesinde değişken ilerlemeli tornalamanın talaş kırılmasına, yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ayrıca talaş kırıcısız ile talaş kırıcılı kesici uçlar için maliyet analizi çalışılmıştır. Deneylede seçilen malzeme ve takım çifti için farklı kesme parametreleri kullanılarak kaba ve hassas tornalama işlemleri yapılarak, oluşan talaş incelenmiş ve talaşın hangi kesme parametrelerin de kırıldığı belirlenmiştir. İlerlemenin değişimi, ilerlemenin düzenli aralıklarla üst değere artırılmış ve sonra aynı miktarda düzenli aralıklarla düşürülmesi şeklinde uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde sabit ilerlemeli deneyler ile değişken ilerlemeli tornalama deneyleri arasında fazla bir fark gözlenmemiştir. Değişken

ilerlemeli tornalama işleminde talaş kırıcısız kesici uç kullanımını maliyet yönünden avantaj sağlamıştır [25].

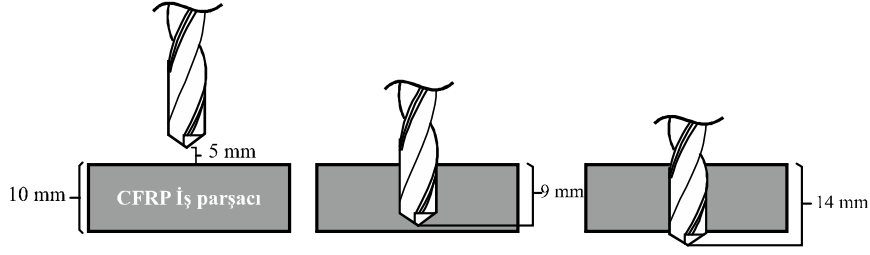
T.R Lin vd., değişken ilerleme kullanımının takım ömrü ve matkap çıkış çapağı üzerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada iş parçası malzemesi olarak 100x150x15 mm ölçülerinde östenitik paslanmaz çelik ve TiN, TiCN, CrN ve TiAlN kaplamalı 4 farklı matkap kullanılmıştır. Deneylede matkaplar Ø8 mm, kesme hızı  $V_c = 25,2$  m/dak olarak sabittir. Deneylede soğutma sıvısı kullanılmıştır. Her 5 delikten sonra takım çıkarılıp aşınma boyu ölçülmüştür. Takımın kestiği süre içinde ilerlemenin değişimi Eşitlik (3.1)'de verilmiştir [26].

$$f(x) = f_c \left[ 1 + a \cdot \sin \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{L} + \frac{3 \cdot \pi}{2} \right) \right] \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de  $f_c$  sabit ilerleme 0,1mm/dev, L iş parçası kalınlığı, x matkabın anlık gittiği yol, a sabittir. İlerlemenin artımı a sabiti değiştirilerek ayarlanır. Çalışmada değişken ilerlemenin takım ömrü ve çıkış çapağı büyük ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. En yüksek takım ömrü ve en düşük çıkış çapağı  $a = 0,6$  da gözlenmiştir. TiN ve TiCN takımların CrN ve TiAlN kaplamalı olanlara göre, paslanmaz çelik malzemenin işlenmesinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [26].

T.R Lin, değişken ilerleme ve değişken kesme hızı kullandığı çalışmasında takım ömrü, çıkış çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü, matkap aşınmasını incelemiştir. 150x100x15 mm boyutlarında östenitik paslanmaz çelik SUS304 kalite plakalar, TiN kaplı matkap kullanılmıştır. Yapılan çalışmada sabit şartlara göre, değişken kesme hızı ve değişken ilerleme tüm değerlendirme parametrelerinde daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir [27].

N. Yaşar, çalışmasında 100 mm kalınlığında karbon fiber takviyeli polimer kompozit iş parçası malzemeleri ve elmas kaplamalı tungsten karbür matkap kullanmıştır. Deneyle için, üçer farklı 120°, 130° ve 140° matkap uç açısı, 60, 100 ve 140 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev, 0,1 mm/dev ve 0,15 mm/dev ilerleme değeri belirlenmiştir. Değişken ilerlemenin şematik gösterimi Şekil 3.6'da verilmiştir. Değişken ilerleme işleminde ilerleme değeri delik çıkışına bir mm kala %50 azaltılarak uygulanmıştır [28].



**Şekil 3.6 :** Değişken ilerleme uygulaması [28].

Delme işlemlerinde sabit ve değişken ilerleme uygulanmış ve matkap uç açısı, kesme hızı, ilerleme gibi delme parametrelerinin yüzey pürüzlüğü ve delik çapı üzerine etkileri araştırılmıştır. Delme işlemlerinde değişken ilerleme uygulandığında yüzey pürüzlülüğü Ra değerleri sabit ilerleme deneylerine göre daha düşük ölçülmüş aynı zamanda delik çaplarının daha büyük olduğu belirlenmiştir. Optimum delme şartları,  $130^\circ$  matkap uç açısı, 60 m/dak kesme hızı ve ilerleme 0,05 mm/dev de, en düşük yüzey pürüzlülüğü görülmüştür. Ayrıca, değişken ilerleme ile elde edilen delik çapları sabit ilerlemedekilere göre daha yüksek belirlenmiştir [28].

O. Çalışkan, iş parçası AISI 1040 çeliğin, kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar ile farklı kesme hızları, ilerleme ve kesme derinliklerinde tornalama deneyleri gerçekleştirilerek aşınmalar, serbest yüzey aşınma eğrisinin üç bölgesi için değerlendirilmiştir. Taguchi metodu ve Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak, optimum talaş kaldırma parametreleri ayrıca parametrelerin aşınma eğrisinin üç bölgesi için etkinlik değerleri çalışılmıştır. Birinci bölgede, ilerlemenin en etkili parametre olduğu, takım aşınmasının ilerlemenin artmasıyla arttığı, takım aşınması üzerine kesme derinliğinin etkisinin az olduğu belirtilmiştir. İkinci bölgede, kesme hızının ve ilerlemenin etkisinin yakın olduğu, kesme derinliği etkinliğinin az olduğu ifade edilmiştir. Üçüncü bölgede, ilerleme en etkili kesme parametresidir [29].

Takım ömrünün üretim operasyonlarında güçlü bir ekonomik etkisi olduğundan, takım ömrünü tahmin etmeye yönelik nicel yöntemler, uzun süredir metal kesme araştırmalarının hedefi olmuştur. Takım ömrü, takım malzemesi ve kesme koşulları kadar parça gereksinimlerine de bağlı olduğundan takım ömrünü tahmin etmek için genel yöntemler geliştirmek zordur. En yaygın kullanılan takım ömrü denklemi Taylor takım ömrü denklemidir. Bazı araştırmacılar, takım aşınma oranını tahmin etmek için modeller geliştirmiştir. Takım aşınmasının tahmini için en iyi bilinen analiz Usui ve vd., tarafından geliştirilmiştir. Bu model bir karbür takım ile çeliği keserken, adezive, aşındırıcı ve difüzyon

aşınma için aşınma oranını tahmin eder. İlk çalışmalar karbür takımın termal yumuşama davranışı hakkında varsayımlara dayalıdır ve Eşitlik (3.2)'de verilmiştir [8].

$$dv = C_1 q \exp \left[ -\frac{C_2}{\theta} \right] dL_s \quad (3.2)$$

Burada; q söz konusu noktada normal gerilme,  $\theta$  arayüz sıcaklığı,  $C_1$  ve  $C_2$  deney sabitleri. Usie'nin denklemi Eşitlik (3.3)'de verilmiştir.

$$q(x) = \exp \left\{ D_1 \left[ 1 - \frac{x}{L_c} \right] \right\} \quad (3.3)$$

Burada; x kesici kenardan mesafe,  $L_c$  takım talaş temas uzunluğu,  $D_1$  deneysel sabittir [8].

Ö. Şahan çalışmasında, mikro tornalama işleminde kesme kuvvetini tahmin etmek amacıyla mekanistik model geliştirmiştir. Mekanistik model, takım burun yarıçapı ayrıca kesme kenarı açısı dikkate alınarak yarı deneysel olarak geliştirilmiştir. Deneylerde Ti6Al4V alaşımı iş parçası ve TDHB07T12S0 KCU 10, AlTiN kaplı kesici takımı kullanılmıştır. Deneyler farklı parametreler için kuru işleme şartlarında yapılmış ve dinamometre ile kesme kuvveti ölçümleri alınmıştır. Deney verileri kullanılarak model katsayıları bulunmuştur. Çalışmada, en düşük hata oranı 410 m/dak kesme hızı, 0,06  $\mu$ m talaş derinliği ve 0,0060 mm/dev ilerleme değeri için  $F_z$  kuvvetinde %1 olarak belirlenmiştir. En yüksek hata oranı, kesme hızı 200 m/dak, talaş derinliği 0,005  $\mu$ m ve ilerleme 0,0075 mm/dev için  $F_y$  kuvvetinde yaklaşık %24 belirlenmiştir. Çalışmada ilerleme ve talaş derinliğindeki artış ile kesme kuvvetlerin arttığını görülmektedir [30].

Jemielniak vd. çalışmalarında değişken ilerleme ve değişken hız kullanarak tornalama işleminde takım ömrünü tahmin etmek amacıyla model geliştirmişlerdir. Deneyleri sıcak haddelenmiş C45 çeliği iş parçası malzemesi S30S ve TiC-TiN kaplı NT25 ve kaplamalı ve kaplamasız sinter karbür kesici takımlar ile gerçekleştirmişlerdir. Kesme derinliği 2 mm olarak belirlenmiştir. Deneylerde krater aşınması ön planda yer almıştır. Değişken şartlarda tahmin yapabilmek için önce sabit parametrelerle deneyler gerçekleştirmişler kaplamasız uç için Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5)'deki ifadeleri bulmuşlardır [31].

$$KT(\mu m) = 2,27.10^{-12}.v^{6,34}.a^{3,25}.t^{1,24} + 19 \quad (3.4)$$

$$VB(mm) = 2,58.10^{-5}.v^{1,85}.a^{0,82}.t^{0,54} \quad (3.5)$$

Kaplamalı uçlar için Eşitlik (3.6) ve Eşitlik (3.7), (3.8)'deki aşınma bağıntıları belirlenmiştir.

$$KT = 3,66.10^{-10}.v^{4,74}.a^{1,87}.t^{1,07} \quad KT < 48 \mu\text{m} \text{ için} \quad (3.6)$$

$$KT = 3,45.10^{-24}.v^{10,72}.a^{4,23}.t^{2,42} \quad KT > 48 \mu\text{m} \text{ için} \quad (3.7)$$

$$VB(\mu\text{m}) = 0,088. \exp(3,44.10^{-11}.v^{4,40}.a^{1,60}.t) \quad (3.8)$$

Serbest yüzey aşınması deney sonuçları ile eşitliklerden hesaplanan değerler hemen hemen aynı çıkmıştır. Aşınma tahmini kaplamasız uçların değerlerine çok yakındır [31].

M. Radovanovic vd., C60E çeliğinin boyuna tornalanmasında kesme koşullarının kesme kuvvetine etkisi, deneysel olarak incelenmiştir. Kienzle denklemine göre özel metodoloji kullanılarak, kesme kuvvetinin her bir bileşen için kuvvet denklemleri belirlenmiştir. Kesme kuvveti için Kienzle denklemi Eşitlik (3.9)'da verilmiştir [14].

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \quad (3.9)$$

Çalışmada, ilerleme kuvveti Eşitlik (3.10) ve pasif kuvvet Eşitlik (3.11)'de verilmiştir.

$$F_f = k_{f1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_f} \quad (3.10)$$

$$F_p = k_{p1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_p} \quad (3.11)$$

Deneysel olarak, kesme kuvvetinin üç bileşeni, ana kesme kuvveti “teğetsel kuvvet”, ilerleme kuvveti ve pasif kuvveti “radyal kuvveti” ölçülmüştür. Kesme kuvveti bileşenlerini talaş genişliği, talaş kalınlığı, ilerleme, kesme derinliği ve takım kesme kenarı açısının etkilediğini bulunmuştur. Yerleşme açısının değişmesiyle kesme kuvvetinin değiştiği belirtilmiştir. Çalışmada, işleme sırasında kesme kuvvetini belirleyen teorik kesme kuvveti modelleri verilmiştir. Bu çalışmada, boyuna tornalama ile kesme koşulunun kesme kuvvetine etkisi açıklanmaktadır [14].

G. Zhang vd. çalışmalarında, tornalama işleminde enerji tüketimi ve kesme kuvvetinin tahminine dayalı bir takım aşınma modeli önermiştir Eşitlik (3.12) [32].



$$FW_v(i) = C \cdot E_{\text{accum}}(i)^p \cdot V_c(i)^q \quad (3.12)$$

Burada;  $FW_v(i)$  ayırıklaştırılmış takım kenar elemanı  $i$ 'nin kenar aşınma hacmi,  $E_{\text{accum}}(i)$  birikmiş enerji yoğunluğu,  $V_c(i)$  kesme hızı,  $C$ ,  $p$  ve  $q$  katsayıdır [32].

Kesme kuvveti tahminine dayalı doğrulanmış bir mekanik kuvvet modeli kullanılarak tornalamadaki enerji tüketimi tahmin edilebilir. Takım aşınma modeli, kesme enerjisi tüketiminin tahmini kullanılarak ve kesme hızının etkisi dikkate alınarak geliştirilmiştir. Ayrıca takım serbest yüzey aşınması, takım geometrisi kullanılarak ayrıca hesaplanır şeklinde ifade edilmiştir. Serbest yüzey aşınması modelinin tahmini literatürdeki aşınma verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Karşılaştırmalar model tahminin deney verileri ile uyumlu olduğunu göstermektedir [32].

M. Akgün vd., Inconel 625 süper alaşımının PVD ve CVD kaplı karbür uçlar kullanılarak frezelenmesinin de yanak aşınmasının (serbest yüzey aşınmasının) belirlenmesi için deneysel ve sayısal analizler yapmıştır. Ayrıca frezeleme işleminde kesme koşullarının optimizasyonu yapılmıştır. Deform 3D yazılımı, sonlu elemanlar yöntemiyle takım aşınmasının modellenmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada kesici takımdaki aşınmasını hesaplamak için Usui'nin aşınma oranı modeli kullanılmıştır. En küçük aşınmada değeri  $V_b = 0,174\text{mm}'yi$  veren optimum kesme parametreleri; kesme hızı  $V_c = 60\text{m/dak}$ , ilerleme  $f = 0,07\text{mm/diş}$ , takım kaplaması TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN-CVD için belirlenmiştir. Çalışmada takım aşınmasının tahmini için doğrusal ve ikinci dereceden polinom regresyon analizleri yapılmıştır. Kesme hızı ( $V_c$ ), ilerleme ( $f$ ) ve kesici takım ( $C_t$ ) bağımsız değişken, serbest yüzey aşınması ( $V_b$ ) bağımlı değişkendir. Yapılan varyans analiz sonuçlarına göre,  $V_b$  üzerinde en etkili parametre ilerleme miktarıdır. Doğrusal regresyonda  $V_b$  (exp) %41.5,  $V_b$  (FEA) %61.78 katkıya sahiptir. Öngörülen takım aşınması doğrusal regresyon modeli deneysel  $V_b$  (exp) Eşitlik (3.13)'de,  $V_b$  (FEA) sonlu elemanlar yöntemi ile Eşitlik (3.14)'de verilmiştir [33].

$$V_b = -0,469 - 0,1701C_t + 0,00722V_c + 5,772 \quad (3.13)$$

$$V_b(\text{FEA}) = -0,2332 - 0,0507C_t + 0,003642V_c + 3,669f \quad (3.14)$$

İkinci dereceden regresyonda Vb (exp) %97.19, Vb (FEA) %97.76 katkıya sahiptir. Öngörülen takım aşınması ikinci dereceden polinom regresyon modeli deneysel Vb (exp) Eşitlik (3.15)'de ve sonlu elemanlar yöntemi ile Vb (FEA) Eşitlik (3.16)'da verilmiştir [33].

$$Vb = -0,845 + 0,595Ct + 0,0082Vc + 1,13f - 0,000020Vc^2 - 1,1f^2 - 0,00608VcCt - 2,79fCt + 0,1131Vcf \quad (3.15)$$

$$Vb(FEA) = 0,248 + 0,1283Ct - 0,00608Vc - 1,4f + 0,000063Vc^2 + 16,6f^2 - 0,001967VcCt - 0,217fCt + 0,0260Vcf \quad (3.16)$$

Regresyon analizi sonuçları, ikinci dereceden polinom regresyon modeli ile elde edilen tahmini Vb değerlerinin doğrusal regresyon modeline göre daha etkili olduğunu göstermektedir [33].

Attanasio vd., çalışmalarında takım aşınma tahmini için yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) ve yapay sinir ağları (YSA) teknikleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu öngörü modellerini geliştirmek için, kaplamasız tungsten karbür ISO P40 kesici takım ve değişken kesme parametreleri kullanılarak AISI 1045 çelik çubukların boyuna tornalama işlemlerinden oluşan takım ömrü testleri yapılmıştır. Deneylerde kesme hızı için 200, 230, 260 m/dak üç seviye ve ilerleme değeri 0,10, 0,15, 0,20 mm/dev üç seviye olarak belirlenmiştir. Kesme derinliği 1,5 mm de sabit tutulmuş ve kesme sıvısı kullanılmamıştır. Kesici takımı üzerinde serbest yüzey aşınması ve krater aşınması (KT) incelenmiştir. RSM sonucu belirlenen aşınma modelleri Eşitlik (3.17) ve Eşitlik (3.18)'de verilmiştir [34].

$$VB(V_c, f, t) = (-0,70199 + 0,00836V_c + 1,88679f + 0,00723t - 0,00002V_c^2 - 3,89975f^2 - 0,00288t^2 - 0,001697V_c f + 0,00015V_c t + 0,02176ft)^2 \quad (3.17)$$

$$KT(V_c, f, t) = \exp(-3,2648 + 0,0367V_c + 5,6378f + 0,4999t + 0,0001V_c^2 + 11,0695f^2 - 0,0483t^2 + 0,001257V_c f + 0,0015V_c t + 0,1929ft)^2 \quad (3.18)$$

Model ile hesaplanan takım aşınma değerleri, deneysel olanlarla karşılaştırılarak doğrulanmış, bu da YSA modelinin takım aşınma parametrelerinin miktarının tahmininde RSM'den daha iyi bir yaklaşım sağladığını göstermiştir. Bu nedenle, endüstriyel bir bakış

açısından, seri üretim sırasında takım değiştirme politikasını doğru bir şekilde tanımlamak için bu model bir üretim yönetim yazılımına uygulanmalıdır şeklinde belirtilmiştir [34].

X. Luo vd., karbür kesici uçlar kullanılarak metal kesme işlemlerinde takım serbest yüzey aşınması ile kesme koşulları arasındaki içsel ilişkiyi araştırmak için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kesme mekaniği simülasyonu ile ampirik bir modeli birleştiren yeni bir serbest yüzey aşınma oranı modeli, takım serbest yüzey aşınma alan genişliğini tahmin etmek için geliştirilmiştir. Sert metal kaplı karbür kesici uçlar kullanılarak bir dizi takım aşınması kesme testi, farklı kesme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarının sonuçları, kesme hızının takım ömrü üzerinde ilerleme miktarından daha dramatik bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Önerilen aşınma oranı modelindeki aşınma sabitleri, işleme verilerine ve simülasyon sonuçlarına göre belirlenmiştir. Öngörülen ve ölçülen takım serbest yüzey aşınma alanı genişliği arasındaki iyi uyum, geliştirilen takım aşınma modelinin takım serbest yüzey aşınmasını bir dereceye kadar doğru bir şekilde tahmin edebileceğini göstermiştir [35].

Y-V Yen vd. çalışmalarında sonlu elemanlar analizi (FEA) simülasyonu tarafından tahmin edilen takım yüzeyindeki sıcaklıklara ve gerilimlere dayalı olarak, takım aşınması, ampirik bir aşınma modeli kullanılarak kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin edilebilir diye belirtmişlerdir. Bu çalışmanın genel amacı, FEM simülasyonlarını kullanarak ortogonal kesmede takım aşınma gelişimini ve takım ömrünü tahmin etmek için bir metodoloji geliştirmektir. Bu amaca yaklaşmak için önerilen metodolojinin üç farklı bölümü vardır. İlk bölümde, belirtilen takım-iş parçası çifti için bir takım aşınma modeli, kesme simülasyonları ile birlikte bir takım aşınma kesme testleri kalibrasyon seti aracılığıyla geliştirilmiştir. İkinci bölümde, takım aşınmasının hesaplanmasına ve takım geometrisinin güncellenmesine izin vermek için kullanılan ticari FEM kodunda değişiklikler yapılmıştır. Son bölüm, geliştirilen metodolojinin deneysel doğrulamasını içermektedir [36].

T. Özel vd., AISI D2 çeliklerinin (60 HRC) seramik silici (çok yarıçaplı) tasarım takımlar ile finiş tornalanmasında yüzey bitirme ve takım serbest yüzey aşınmasının modellenmesi araştırmıştır. Çoklu doğrusal regresyon modelleri ve sinir ağı modelleri, yüzey pürüzlülüğünü ve takım serbest yüzey aşınmasını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Sinir ağı modellemede, ölçülen kuvvetler, güç ve özel kuvvetler eğitim algoritmasında kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, 0,18-0,20 µm kadar düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin silici

kesici takımlar ile ulaşıldığını gösterir. Yüksek sıcaklıklar nedeniyle yüksek kesme hızlarında takım yan aşınması, kesme süresinden yaklaşık 15 dakika veya önce  $VB_c = 0,15$  mm takım ömrü kritik değerine ulaşır. Bu sonuçlar, çeşitli kesme koşulları için sinir ağı modellerinin takım aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için uygun olduğunu göstermiştir. Çoklu doğrusal regresyon modeli,  $VB_c$  ile Eşitlik (3.19)'da verildiği gibidir ve  $R^2 = 0.85$  dir [37].

$$VB_c = 2,16 \times 10^{-4} V_c + 0,23f + 6,5 \times 10^{-3} t_c - 8,7 \times 10^{-3} \quad (3.19)$$

Çoklu doğrusal regresyon modeli,  $R_a$  ile Eşitlik (3.20)'de verildiği gibidir ve  $R^2 = 0.73$  dir.

$$R_a = -1,8 \times 10^{-3} V_c + 3,44f + 1,4 \times 10^{-2} t_c + 0,16 \quad (3.20)$$

S.K Choudhury vd., matematiksel bir model geliştirerek ve deneysel sonuçlarla karşılaştırarak tornalama işleminde serbest yüzey aşınmasını kesin olarak tahmin etmek için güvenilir bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Difüzyon indeksi, aşınma katsayısı, normal yükün serbest yüzey aşınmasına göre artış hızı ve takımın sertliği gibi serbest yüzey aşınmasını etkileyen bazı önemli faktörler, matematiksel modelin geliştirilmesi için girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Geliştirilen matematiksel model, tornalama işlemi için aşınmayı giriş parametreleriyle ilişkilendirmek için kullanmıştır. Girdi parametreleri, deney tasarımı tekniğine dayalı olarak oluşturulmuştur. Model daha sonra takım aşınmasını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu takım aşınma değerleri, aralarındaki korelasyon katsayısını belirlemek için deneysel serbest yüzey aşınma değerleri ile karşılaştırılmıştır. Modelin geçerliliğini gösteren korelasyon katsayısı 0,988 olarak bulunmuştur. İş parçası dönüş hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi bağımsız işleme parametrelerinin serbest yüzey aşınması üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, serbest yüzey aşınma modelinin güvenilir olduğunu ve takım aşınması tahmini için etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [38].

Y. Huang vd., sert malzemelerin tornalanmasında takım/iş parçası malzeme özellikleri, kesme parametreleri ve işleme düzenlemesinin bir fonksiyonu olarak, CBN kesici takım serbest yüzey aşınma oranını analitik olarak modellemek için bir metodoloji sunmuşlardır. Önerdikleri model, bir CBN kesici uç ile sertleştirilmiş 52100 yatak çeliğinin finiş tornalanmasına ilişkin deneysel verilerle kalibre edilmiş ve ayrıca pratik sert tornalama

koşulları üzerinden doğrulanmıştır. Yapışmanın genel kesme koşulları üzerinde ana aşınma mekanizması olduğu gösterilmiştir, bu da belgelenmiş gözlemlerle uyumludur, ancak agresif kesme koşulları altında uzun işleme süreleri boyunca kimyasal difüzyon baskınlık kazanabilir diye belirtmişlerdir [39].

E. Şirin vd., çalışmalarında ısıtılma tabii tutulmuş 21-48-56 HRc olmak üzere üç farklı sertlikte AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin, farklı geometride iki sementit karbür takım kullanarak frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiş ve kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmalarını araştırmıştır. Deneyler kuru işleme şartlarında yapılmış, 70-90-110-130 m/dak dört farklı kesme hızı, 0,05-0,1-0,15 mm/diş üç farklı ilerleme, kesme derinliği 0,5 mm olarak belirlenmiştir. M1 (21 HRc) malzemede 0,05 mm/diş ilerleme değerinde, kesme hızın 90 m/dak da en iyi ortalama yüzey pürüzlülük değeri (0,098 mm), elde edilmiştir. M2 (48 HRc) ve M3 (56 HRc) malzemelerinde, 0,15 mm/diş ilerleme değerinde, kesme hızı 130 m/dak en kötü yüzey pürüzlülük değerleri, (M2) malzemede 0,439 mm, (M3) malzemede 0,952 mm elde edilmiştir [40].

O. Özberk çalışmasında, iki farklı kaplanmış tungsten karbür kesici takım, kesme derinliği 1mm, 60, 90, 120 m/dak olarak üç farklı kesme hızı ve 0,06, 0,09, 0,12 mm/dev olarak ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler Kuru, MQL (Minimum miktarda yağlama), Kry (Kriyojenik soğutma ile işleme), MQL + Kry (Minimum miktarda yağlama + Kriyojenik soğutma) 4 farklı soğutma şartlarında yapılmıştır. Çalışmalarında AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin tormalanmasında kesme bölgesi sıcaklığı, kesici takım titreşim genliği, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ömrü üzerine etkileri araştırılmıştır. Kuru kesme ortamında en yüksek kesici takım aşınması meydana gelmiştir. MQL, Kry ve MQL + Kry ortamlarında daha düşük aşınma gözlenmiştir. MQL + Kry soğutma sistemi uygulandığında en düşük aşınma görülmüştür. Bütün kesme şartlarında PVD kaplı takımlar CVD kaplı takımlara göre daha iyi aşınma performansı göstermiş ve ilerleme hızının ve kesme hızının artması ile takım aşınması artmıştır [41].

O. İynen çalışmasında, kesme hızı 180, 220, 260 m/dak, ilerleme 0,03, 0,07, 0,11 mm/dev, kesme derinliği 0,08, 0,14, 0,20 mm, 30, 35, 40 HRC sertlikte AISI 4340 alaşımlı çeliğin ve seramik, karbür, CBN olmak üzere üç farklı seviye belirlenerek deney planı yapılarak tormalama deneyleri yapmıştır. Kesme parametrelerinin ses, akım, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve güç tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kesme kuvvetleri, güç tüketimi,

yüzey pürüzlülüğü, ses ve akım için belirlenen matematiksel model tahminleri ile, hesaplanan/deneysel değerler arasında yakın ilişki belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda kesme hızı, güç tüketimi, akım ve ses için en önemli parametre olarak belirlenmiştir. ANOVA sonuçlarına göre; ilerlemenin teğetsel kuvvet ( $F_y$ ) üzerinde %44,74, radyal kuvvet ( $F_x$ ) üzerinde %29,17 olarak en önemli kesme parametresi olduğu belirlenmiştir. Kesme derinliği, ilerleme kuvveti ( $F_z$ ) üzerinde %53,36 olarak en önemli kesme parametresi olarak belirlenmiştir. Ayrıca kesici uç ise yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre olarak belirlenmiştir [42].

J. Loretron vd., Inconel 718 süper alaşımın işlenmesinde FEM kullanarak takım ömrü ve takım aşınmasını tahmin etmek amacıyla aşınma modeli geliştirmişlerdir. Basınç, sıcaklık ve bağıl hızlar geometrideki değişime uyum sağladıkça aşınma profilinin sürekli gelişimini yakalamak için takım geometrisi, FE'yi talaş oluşumu simülasyonunda aşamalı olarak güncellemişlerdir. Farklı sürtünme ve aşınma modelleri ve bunların tahmin edilen aşınma profili üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Analizler, Coulomb sürtünmesinden daha gelişmiş bir sürtünme modelinin, doğru aşınma tahminleri elde etmek için gerekli olduğunu göstermiştir. Sementite karbür takım, işleme alaşımı 718'in aşınma simülasyonunda mükemmel deneysel uyum sağlamıştır [43].

## 4. MALZEME VE YÖNTEM

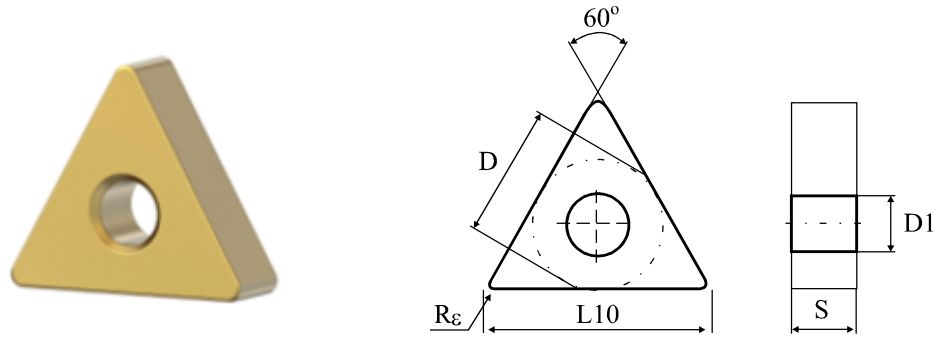
### 4.1 Giriş

Tornalama deneylerinde kullanılan, kesici takım, takım tutucu, iş parçası, CNC tezgahlar, dinamometre, aşınma görüntülerinin alındığı mikroskoplar ve sertlik ölçüm cihazı gibi deney cihazları, malzemeler ve sabit ve değişken ilerleme deney yöntemleri bu bölümde verilmiştir.

### 4.2 Deney cihazları ve malzemeleri

#### 4.2.1 Kesici Takım

Sabit ve değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde Kennametal marka, TNGA 160404T01020, KY4400 serisi, PVD yöntemi ile titanyum nitrit (TiN) kaplama, alüminyum oksit ve titanyum karbon nitrit ( $Al_2O_3/TiCN$ ) bileşimi kompozit seramik takım kullanılmıştır. Kesici takım geometrisi Şekil 4.1’de ve kesici takıma ait geometrik boyutlar Tablo 4.1’de verilmiştir [44].



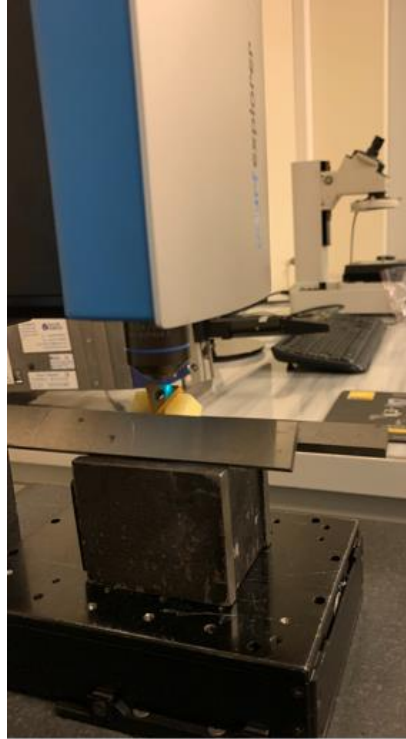
Şekil 4.1 : TNGA 160404T01020 kesici takım [44].

Tablo 4.1 : TNGA 160404T01020 kesici takıma ait geometrik boyutlar [44].

D (mm)	L10 (mm)	S (mm)	R <sub>ε</sub> (mm)	D1 (mm)
9,525	16,50	4,76	0,4	3,81

PVD (Physical Vapor Deposition), düşük sıcaklıkta (yaklaşık 500 °C) yapılan kaplama sürecidir. Titanyum nitrit, hız çeliği (HSS) ve sert metal takımlara uygulandığında takıma altın rengi veren kaplama malzemesidir. Kaplama malzemesi olan titanyum nitrit yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklığa dayanım ve ana plakete iyi yapışma özelliklerine sahiptir. TiN kaplama yüksek hızlarda takım ömrünü önemli biçimde artırır [1].

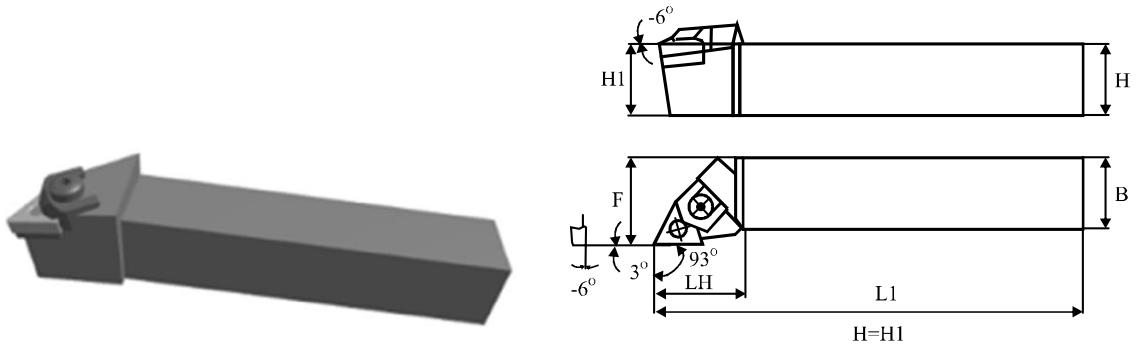
Deneylerde kullanılan TNGA 160404T01020 kesici takımın kenar yuvarlatma yarıçapı, Şekil 4.2’de görülen Nanofocus USurf mikroskop tarafından 4 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.2: Kesici takım kesme yuvarlatma yarıçapı.

#### 4.2.2 Takım Tutucu

Tornalama deneylerinde 93° yavaşma açısına sahip Kennametal, MTJNR 2525 M16 H4 ID 8K takım tutucu kullanılmıştır. Şekil 4.3’de deneylerde kullanılan takım tutucu görülmektedir. Tablo 4.2’de takım tutucuya ait geometrik boyutlar verilmiştir [45].



Şekil 4.3: MTJNR 2525 M16 H4 ID 8K kater [45].



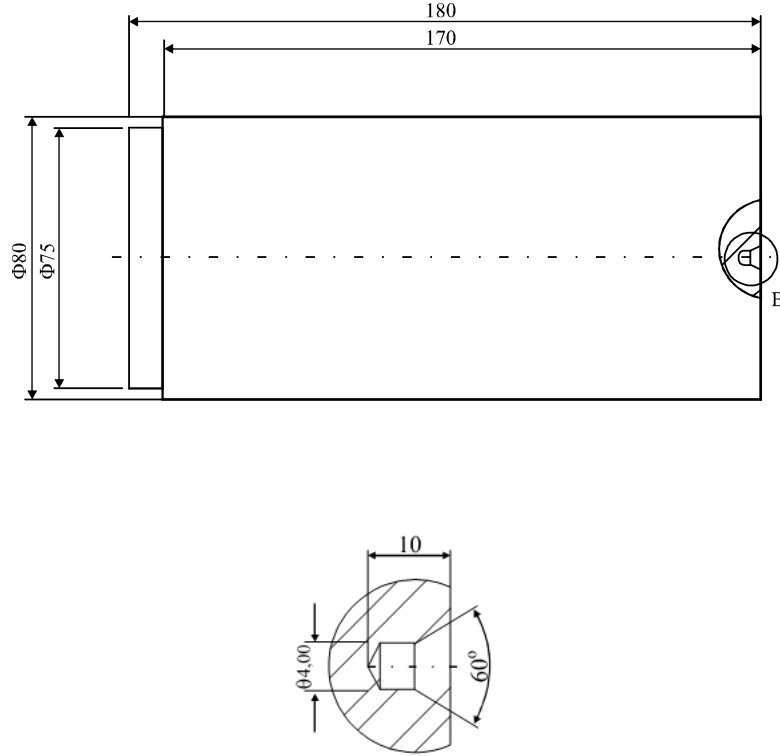
**Tablo 4.2:** MTJNR 2525 M16 H4 ID 8K kater için geometrik boyutlar [45].

Yanaşma Açısı	H (mm)	B (mm)	F (mm)	L1 (mm)	LH (mm)
93°	25	25	32	150	32

#### 4.2.3 İş Parçası Malzemesi

DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği yüksek aşınma mukavemeti ile beraber aynı sertlik değerinde iyi bir tokluk değerine sahiptir. DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği derin çekme ve sıvama kalıpları, hassas kesme ve ezme kalıpları, soğuk ve ekstrüzyon kalıpları gibi kalıpların imalatında kullanılmaktadır [46].

Deneyler çekirdeğine kadar sertleştirilmiş sertliği 58 HRC olan DIN 1.2379 (AISI X153CrMoV12) soğuk iş takım çeliği iş parçası ile yapılmıştır. İş parçası numunesi, Ø 80 x 180 mm boyutlarında, tornalama sırasında oluşacak salgıyı azaltmak için alın yüzeyin de punta deliği açılmış olarak temin edilmiştir. Şekil 4.4’de iş parçası numunesinin teknik resmi verilmiştir.



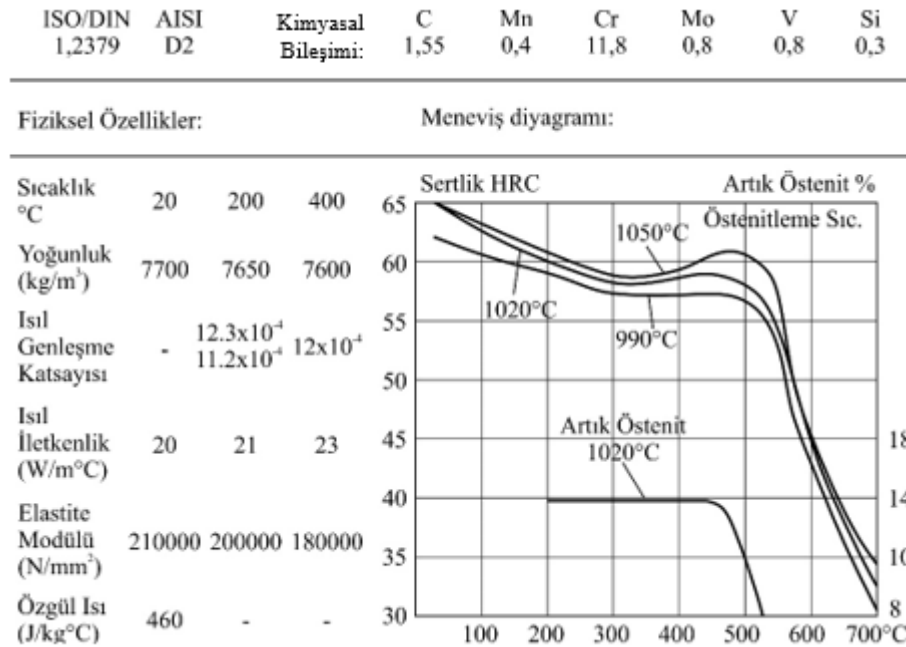
**Şekil 4.4:** İş parçası numunesi teknik resmi.

Şekil 4.5’de iş parçalarındaki salgı ve yüzeylerinde oluşan korozyonun giderilmesi için, dış yüzeyinde tornalama işlemi gerçekleştirilerek deney için hazırlanan iş paçası numunesi görülmektedir.



Şekil 4.5: DIN 1.2379 iş paçası numunesi.

Kullanılan iş paçası malzemesinin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ve meneviş diyagramı Şekil 4.6’da görülmektedir [47].



Şekil 4.6: İş paçası malzemesinin özellikleri [47].

DIN 1.2379 (AISI X153CrMoV12) soğuk iş takım çeliği silindirik numunelerin makro sertlik ölçümleri Balıkesir Üniversitesi Araştırma Geliştirme Merkezi Laboratuvarında

AFFRI SYSTEM marka, Üniversal VRSD-251 model makro sertlik cihazında Rockwell C olarak ölçülmüştür (Şekil 4.7). Numune, sertlik ölçüm cihazının V yatağına yerleştirilerek iş parçası boyunda cihazın çenelerinin izin verdiği aralıklarla dört farklı noktadan sertlik ölçülmüştür ve ölçümlerin aritmetik ortalaması sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değeri 58 HRC olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7: Üniversal VRSD-251 model makro sertlik ölçüm cihazı.

İş parçası malzemesinin sertlik dağılımını kontrol etmek amacıyla,  $\varnothing$  36,35 mm çapta iş parçası numunesinde dört farklı noktadan sertlik ölçümü yapılmış ve iç çapta numunenin ortalama sertlik değeri 57,60 HRC olarak belirlenmiştir.

#### 4.2.4 CNC Torna Tezgahları

Tornalama deneyleri, Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, CNC Laboratuvarında bulunan Şekil 4.8’de verilen Goodway-GS-200 model CNC torna tezgahında ve Sabancı Üniversitesi, Üretim Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 4.9’da verilen MORI SEIKI NL 1500 CNC torna tezgahında yapılmıştır.



Şekil 4.8: Goodway-GS-200 CNC torna tezgahı [48].



Şekil 4.9: MORI SEIKI NL 1500 CNC torna tezgahı [49].

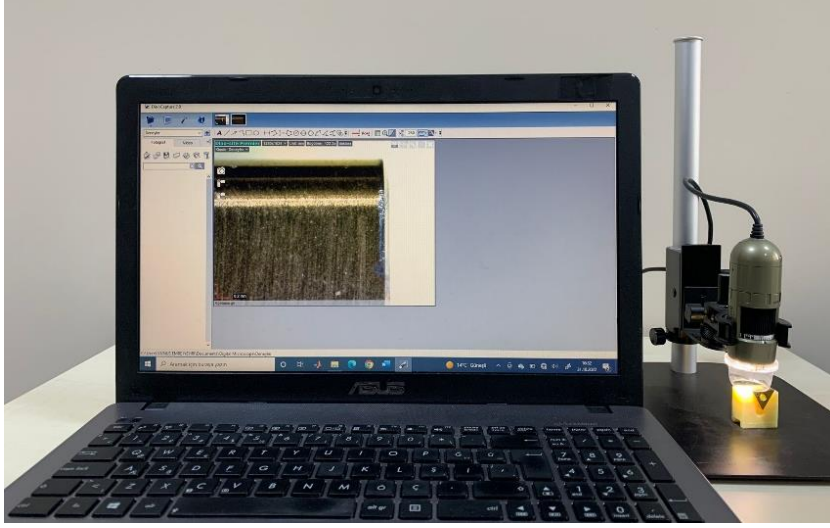
Goodway-GS-200 model CNC torna tezgahı ve MORI SEIKI NL 1500 CNC torna tezgahına ait özellikler Tablo 4.3’de verilmiştir.

**Tablo 4.3:** CNC tezgahların özellikleri.

Model	NL 1500 CNC	GS-200 CNC
En büyük tornalama çapı	386 mm	420 mm
En büyük tornalama boyu	515 mm	591 mm
Taret kesici takım bağlama sayısı	12	12
En büyük devir değeri	6000 dev/dak	4800 dev/dak
İş mili gücü	11 KW	11 KW

#### 4.2.5 Aşınma Ölçüm Sistemi

Kesici takımın kesme kenarında oluşan serbest yüzey aşınma (VB) değeri Şekil 4.10'da verilen Dino-Lite AD4000 serisi 1.3 megapixel dijital mikroskop ve Şekil 4.11'de verilen Nikon ShuttlePix-P-400R dijital mikroskop kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 4.10: Dino-Lite AD4000 serisi mikroskop.



Şekil 4.11: ShuttlePix-P-400R mikroskop [50].

#### 4.2.6 Kesme Kuvvetleri Ölçüm Sistemi

Kesme kuvvetlerinin ölçümü için Şekil 4.12’de görülen Kistler marka 9129AA modeli dinamometre kullanılmıştır. Dinamometrenin teknik özellikleri Tablo 4.4’ te verilmiştir.

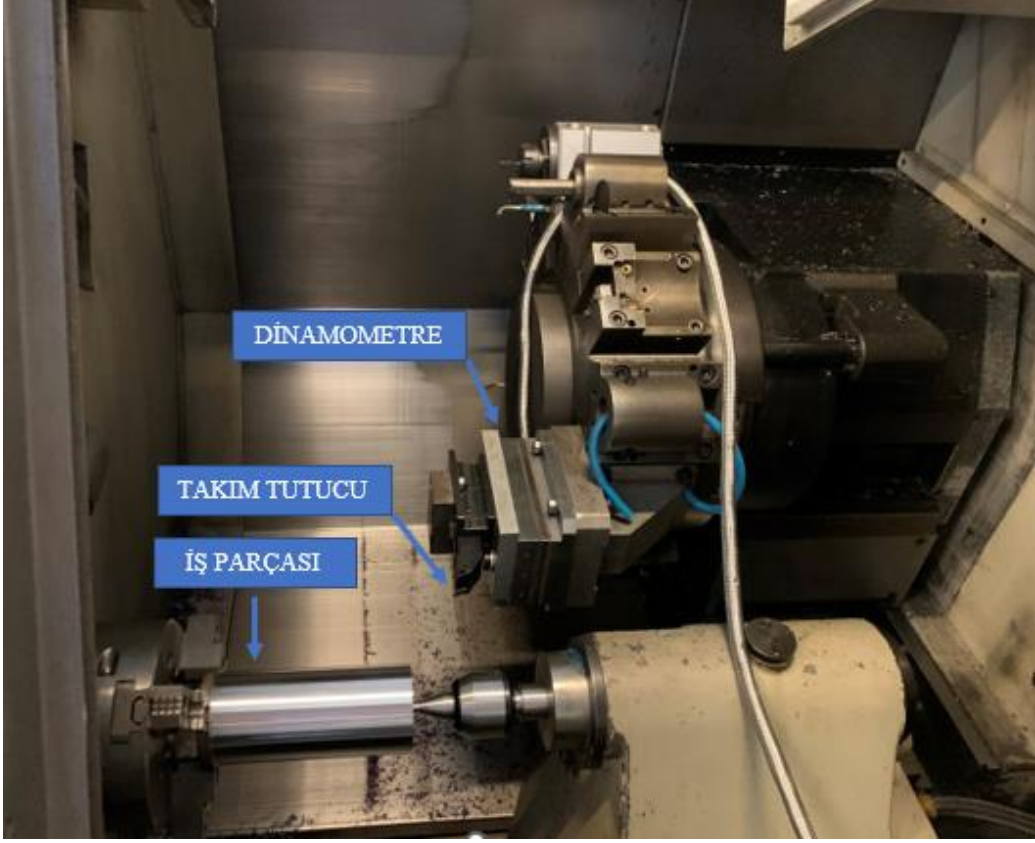


Şekil 4.12: Kistler 9129AA model dinamometre [51].

Tablo 4.4: Kistler 9129AA dinamometrenin teknik özellikleri [51].

Kistler 9129AA	
Kuvvet Aralığı	$F_x, F_y, F_z = -10 \dots 10 \text{ kN}$ $M_x, M_y, M_z = -500 \dots 500 \text{ Nm}$
Aşırı Yükleme	$F_x, F_y, F_z \text{ \%} 20$
Eşik	$< 0,01 \text{ N}$
Hassasiyet	$F_x, F_z \approx -8.1 \text{ pc/N}$ $F_x \approx -4.1 \text{ pc/N}$
Doğrusallık	$F_x, F_y, F_z \leq \pm \% 0,3 / \text{FSO}$
Histerezis	$F_x, F_y, F_z \leq \% 0,3 / \text{FSO}$
Rijitlik	$C_x, C_z \approx 1000 \text{ N}/\mu\text{m}$ $C_y \approx 4000 \text{ N}/\mu\text{m}$
Doğal Frekans	$f_{n(x)} \approx 3,5 \text{ kHz}, f_{n(y)} \approx 4,5 \text{ kHz}, f_{n(z)} \approx 3,5 \text{ Hz}$
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	$0 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$
Kapasitans	$F_x, F_y, F_z \approx 180 \text{ pF}$
İzolasyon Direnci	$> 10^{13} \text{ } \Omega$
Toprak Direnci	$> 10^8 \text{ } \Omega$
Koruma Derecesi EN60529	IP67
Ağırlık, Dinamometre	3,2 kg
Kapak plakası	2,0 kg

Deney hazırlık aşamasında Şekil 4.13’de görüldüğü gibi dinamometre torna tezgahının kesici takım tutucu mekanizmasına bağlanmıştır, takım tutucu da dinamometreye monte edilmiştir. Dinamometre tezgaha sabitlendikten sonra bağlantı kablolarının montajı yapılmıştır. İş parçası aynaya bağlanmıştır.



**Şekil 4.13:** Dinamometre, takım tutucu, iş parçası bağlantısı.

Deneyle sırasında kuvvetler dinamometre ile elektriksel sinyale dönüştürülerek, üç kanal yükselticiye (Kistler Control Unit 5233A1) aktarılmıştır. Yükselticide 3 kanal ve kanallar için 500 N, 1 kN, 2 kN ve 4 kN olmak üzere 4 kademe bulunmaktadır. Yükseltici 1kN kademesine ayarlanmış, dinamometreden gelen analog sinyalleri National Instruments'ın NI6259 16 bit, 1,25 MS/s örnekleme hızına sahip, yüksek hızlı, çok işlevli veri toplama sistemine aktarılmıştır. Veri toplama sisteminde, 3 kanal analog kuvvet sinyalleri örneklenerek sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Elde edilen 3 sayı dizisi serileştirilerek, USB seri haberleşme bağlantısından bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 4.14). Bilgisayarın USB bağlantısına gelen ölçüm verileri, LabView'da hazırlanmış bir yazılım ile grafikleri çizilerek görselleştirilmiş ve daha sonra incelenmek üzere, sabit disk ortamına MS Excel formatında depolanmıştır.



**Şekil 4.14:** Kesme kuvveti verilerinin bilgisayara aktarımı.

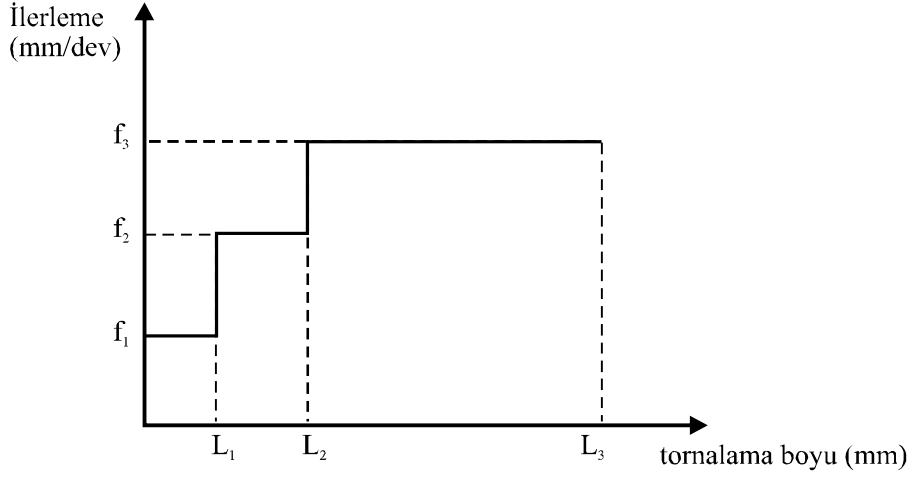
Dinamometre ile teğetsel kuvvet ( $F_t$ ), ilerleme kuvveti ( $F_f$ ) ve radyal kuvvet ( $F_r$ ) Newton (N) cinsinden ölçülmüştür. Ölçümler sırasında 35 saniye boyunca, her bir kanaldan saniyede 1000 örnek alınmıştır. Ölçülen kuvvet verilerine 500 elemanlı kayan ortalama filtresi uygulanarak ölçümlerdeki yüksek hızlı değişimler süzölmüştür. MS Excel programına aktarılan kesme kuvveti verileri için kesme kuvvetinin zamana göre değişiminin grafikleri oluşturulmuştur. Kuvvet zaman grafiklerinde x eksenini saniye cinsinden tornalama süresini y eksenini Newton cinsinden kesme kuvvetini göstermektedir.

### 4.3 Yöntem

Literatürde değişken ilerlemenin değişimi belirli bir periyotta artan-azalan olmak üzere uygulandığı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, tornalama işleminde kesici takımın pasoya girişi düşük ilerleme değeri ile başlanıp, kademeli olarak nihai değere arttırılan bir işleme stratejisi olarak uygulanmıştır.

İlerlemenin değişimi grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir. Tornalama deneylerinde kullanılmak üzere, değişken ilerlemeli tornalama deneyleri ve sabit ilerlemeli tornalama deneyleri için, CNC programı, G kodları yazılmıştır.





**Şekil 4.15 :** İlerlemenin değişimi grafiği.

Sunulan tezde deneysel çalışma üç farklı bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde; kesme hızı ( $V_c$ ) ve kesme derinliği ( $a_p$ ) sabit bir değerdir. Deneysel hem değişken ilerlemeli hem de sabit ilerlemeli tornalama olarak 5-10-20-40-80-120-160-200-240 saniye olarak belirlenen tornalama süreleri için gerçekleştirilmiştir. Deneysel kuru işleme ve kesme sıvısı kullanılarak yapılmıştır. Bu bölümde değişken ilerlemeli tornalama işleminin, kuru ve kesme sıvılı işleme şartlarında serbest serbest yüzey aşınmasına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kesme sıvısı kullanımının değişken ilerlemeli tornalama işlemi ve sabit ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, 21 adet değişken ilerlemeli tornalama deneyi yapılmıştır. Deneysel belirlenen 30 saniye işleme süresinde, kuru işleme olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde serbest yüzey aşınmasının en küçük değerini sağlayacak değişken ilerleme kademeleri optimize edilmiş, bu ilerleme kademelerinin serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Birinci ve ikinci bölümde yer alan değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde ilerleme  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulunu sağlayarak, ilerlemenin değişimi için birinci ilerleme  $f_1$  için tornalama uzunluğu  $L_1 = 1$  mm, ikinci ilerlememe  $f_2$  için sonraki  $L_2 = 1$  mm tornalama uzunluğu belirlenmiştir. Nihai ilerleme  $f_3$  için  $L_3$  tornalama boyu aşağıda ifade edildiği gibi hesaplanmıştır.  $L_1$  ve  $L_2$  tornalama boyları için gerekli  $t_1$  ve  $t_2$  tornalama sürelerini belirlemek için önce Eşitlik (4.1)'den iş parçası devir sayısı  $n$ , daha sonra Eşitlik (4.2)'den  $t_1$  ve  $t_2$  tornalama süreleri hesaplanmıştır.

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (4.1)$$

$$t = \frac{L \cdot 60}{f \cdot n} \quad (4.2)$$

Nihai  $f_3$  ilerleme değeri için kalan, tornalama süresi  $t_3$  değeri; birinci bölümde yer alan deneyler için, her bir deney için belirlenen tornalama süresinden birinci  $f_1$  ve ikinci  $f_2$  ilerleme değerleri için harcanan süre toplamı ( $t_1+t_2$ ) çıkarılarak, Eşitlik (4.3) kullanılarak belirlenir.

$$t_3 = \text{toplam deney süresi} - (t_1 + t_2) \quad (4.3)$$

İkinci bölümde yer alan deneyler için, her bir deney için belirlenen 30 saniye tornalama süresinden, birinci  $f_1$  ve ikinci  $f_2$  ilerleme değerleri için harcanan süre toplamı ( $t_1+t_2$ ) çıkarılarak, nihai  $f_3$  ilerleme değeri için kalan, tornalama süresi  $t_3$ , Eşitlik (4.4)'de verilen eşitlik kullanılarak belirlenir.

$$t_3 = 30 - (t_1 + t_2) \quad (4.4)$$

Her iki bölümdeki deney içinde ,  $t_3$  süresi kullanılarak, Eşitlik (4.2)'den nihai  $f_3$  ilerleme için gerekli tornalama boyu  $L_3$  hesaplanarak, deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için tornalama boyları ve tornalama süreleri kayıt altına alınmıştır.

Birinci ve ikinci bölümlerinde deneyler Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, CNC Laboratuvarında bulunan GS-200 model CNC torna tezgahında yapılmıştır. Her deney sonunda tornalama işleminden sonra kesici takımında meydana gelen serbest yüzey aşınma değeri ölçülmüştür. Serbest yüzey aşınması için ölçümler, hassasiyeti 1/10000 mm olan Dino-Lite AD4000 mikroskop kullanılarak X250 kat büyütme ile belirlenmiştir. Her bir deneyde kesici takımın yeni kesme kenarı kullanılmıştır.

DeneySEL çalışmanın üçüncü bölümünde ise, 18 adet değişken ilerlemeli tornalama deneyi yapılmıştır. Bu bölümünde yer alan deneyler Sabancı Üniversitesi, Üretim Araştırma Laboratuvarında bulunan MORI SEIKI NL 1500 CNC torna tezgahında yapılmıştır. Deney süresince oluşan kesme kuvvetleri ve her deney sonunda kesici takımında meydana gelen

serbest yüzey aşınma değeri ölçülmüştür. Aşınma ölçümleri ShuttlePix- P-400R dijital mikroskop ile alınmıştır. Kesme kuvveti sinyalleri Kistler marka 9129AA modeli dinamometre kullanılarak alınmıştır. Her bir deney için takımın yeni kesme kenarı kullanılmıştır.

Deneyle belirlenen 30 saniye işleme süresinde, kuru işleme olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde yapılan deney verileri ile değişken ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınmasının modellenmiştir. Ayrıca değişken ilerlemeli tornalama işleminde her bir ilerlemeye karşılık gelen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c3}$  kesme kuvvetleri modellenmiştir.

Üçüncü bölümdeki deneyler için, ilerleme  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulunu sağlayacak şekilde ilerleme değerlerine karşılık gelen  $L_1$ ,  $L_2$  ve  $L_3$  tornalama boyları herbir deney için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deneyle sırasında kesme kuvvetleri anlık ölçüldüğü için başlangıç ilerleme değerleri ( $f_1$ ) ve ikinci ilerleme değeri ( $f_2$ ) için kesme kuvvetinin sabit hale geldiği değer iş parçasının 20 tur dönmesi durumunda gerçekleşmektedir. Bu yüzden, deneylerde  $f_1$  ve  $f_2$  ilerleme değerleri için tornalama boyu, iş parçasının kendi etrafında 20 tur dönmesi sonucu aldığı yol olarak belirlenip Eşitlik (4.5) ve Eşitlik (4.6) kullanılarak belirlenmiştir.

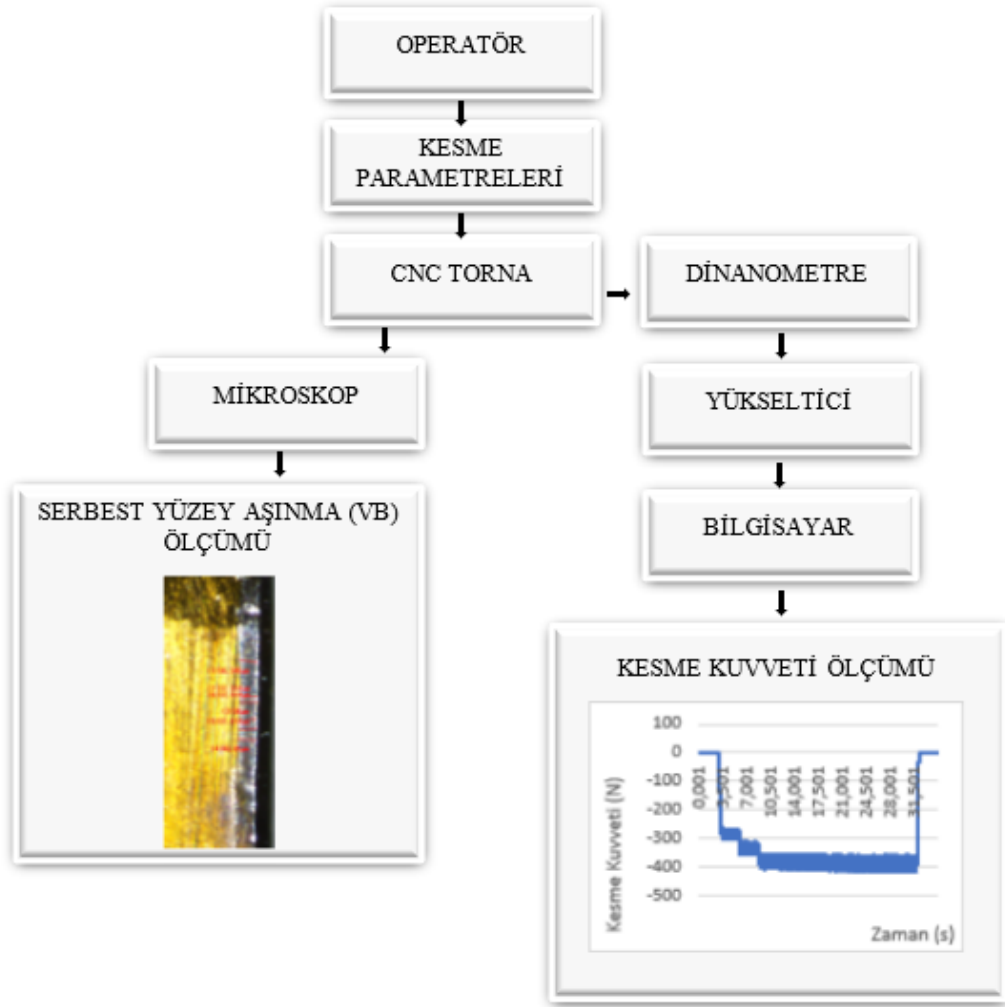
$$L_1 = f_1 \cdot 20 \quad (4.5)$$

$$L_2 = f_2 \cdot 20 \quad (4.6)$$

$L_1$  ve  $L_2$  tornalama boyları için gerekli  $t_1$  ve  $t_2$  tornalama sürelerini belirlemek için önce Eşitlik (4.1)'den ilgili devir daha sonra Eşitlik (4.2)'den  $t_1$  ve  $t_2$  tornalama sürelerini belirlenmiştir. Deneylede toplam deney süresi 30s den, birinci  $f_1$  ve ikinci  $f_2$  ilerleme değerleri için harcanan süre toplamı ( $t_1+t_2$ ) çıkarılarak, nihai  $f_3$  ilerleme değeri için kalan tornalama süresi  $t_3$  Eşitlik (4.4)'de verilen eşitlik kullanılarak belirlenir.

$t_3$  süresi kullanılarak, Eşitlik (4.2)'deki denklemden nihai ( $f_3$ ) ilerleme için gerekli tornalama boyu  $L_3$  hesaplanarak, değişken ilerlemeli tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylede herbir ilerlemeye karşılık gelen tornalama boyları ve tornalama süreleri kayıt altına alınmıştır.

Deney sistematığının şematik gösterimi Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16: Deney sistematığı.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneyleerin birinci bölümünü oluşturan değişken ilerlemenin sabit ilerlemeye göre serbest yüzey aşınması (VB) üzerindeki etkisinin araştırıldığı deneyleer için kesme koşulları ve deney sonuçları Bölüm 5.1’de verilmiştir. Deneyleerin ikinci bölümünü oluşturan optimum değişken ilerleme seviyelerinin belirlenmesi için yapılan deneyleer için kesme koşulları ve deney sonuçları Bölüm 5.2’de yer almaktadır. Deneyleerin üçüncü bölümünü oluşturan serbest yüzey aşınmasının ve değişken ilerlemenin her bir kademesine karşılık kesme kuvvetlerinin modellenmesi için yapılan deneyleer için kesme koşulları ve deney sonuçları Bölüm 5.3’de verilmiştir.

### 5.1 Değişken İlerlemeli ve Sabit İlerlemeli Kuru ve Kesme Sıvısı ile Yapılan Deneyleer

Deneysel çalışmanın birinci bölümünü oluşturan deneyleer, değişken ilerlemeli ve sabit ilerlemeli tornalama deneyleeri olarak iki grupta yapılmıştır. Hem değişken ilerlemeli hem de sabit ilerlemeli tornalama deneyleerinde tornalama süreleri 5-10-20-40-80-120-160-200-240 saniye olarak belirlenmiştir. Deneyleer kesme sıvısı kullanılmadan ve kesme sıvısı kullanılarak iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Kesme sıvısı kullanılan deneyleerde kesme sıvısının kesme bölgesine püskürtülmesi 4,2 bar basınç ile gerçekleştirilmiştir. Kesme sıvısının uygulanmasında tezgahın mevcut donanımı kullanılmıştır.

Bu bölümde sabit ilerlemeli tornalama işlemi yerine değişken ilerlemeli tornalamanın kuru ve kesme sıvısı kullanılarak uygulandığında takımın serbest yüzey aşınma değeri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kesme sıvısı kullanımının değişken ilerlemeli tornalama işlemi ve sabit ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Değişken ilerlemeli ve sabit ilerlemeli tornalama deneyleerinde kesme parametrelerinden, kesme derinliği  $a_p = 0,8$  mm ve kesme hızı  $V_c = 100$  m/dak olarak sabit bir değerlerde belirlenmiştir. Sabit ilerlemeli tornalama deneyleerinde ilerleme  $f = 0,150$  mm/dev’dir. Değişken ilerlemeli tornalama deneyleerinde, takım üreticisine ait kesme verilerine ve çalışma sürecinde gerçekleştirilen ön deneyleerden yararlanılarak, değişken ilerleme seviyesi  $f_1 < f_2 < f_3$  olacak şekilde belirlenmiştir. Sabit ilerlemeli tornalama deneyleeri için kesme parametreleri ve değişken ilerlemeli tornalama deneyleeri için kesme parametreleri Tablo 5.1’de ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.1:** Sabit ilerleme için kullanılan kesme parametreleri.

Kesme Hızı $V_c$ (m/dak)	Kesme Derinliği $a_p$ (mm)	İlerleme $f$ (mm/dev)
100	0,8	0,150

**Tablo 5.2:** Değişken ilerleme için kullanılan kesme parametreleri.

Kesme Hızı $V_c$ (m/dak)	Kesme Derinliği $a_p$ (mm)	İlerleme $f$ (mm/dev)
100	0,8	$L_1 = 1\text{mm}$ için $f_1 = 0,100$
		$L_2 = 1\text{ mm}$ için $f_2 = 0,125$
		$L_3$ için $f_3 = 0,150$

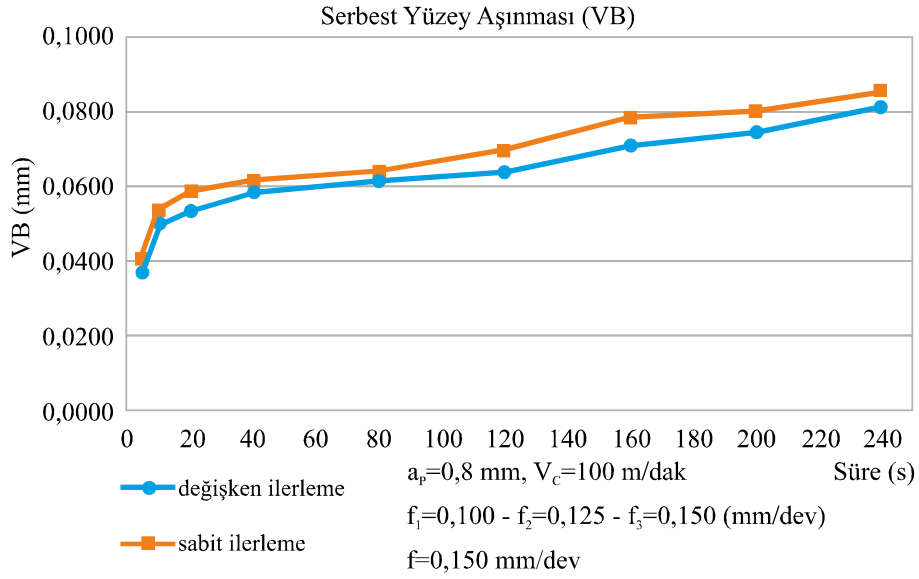
Deneyler Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, CNC Laboratuvarında bulunan GS-200 model CNC torna tezgahında yapılmıştır. Her deney sonunda tornalama işleminden sonra kesici takımında meydana gelen serbest yüzey aşınma (VB) değeri ölçülmüştür. Serbest yüzey aşınması için ölçümler, hassasiyeti 1/10000 mm olan Dino-Lite AD4000 mikroskop kullanılarak X250 kat büyütülerek ölçülmüştür.

### 5.1.1 Kuru İşleme Şartlarında Yapılan Deneyler

Belirlenen tornalama süreleri için kuru işleme şartlarında gerçekleştirilen, değişken ilerlemeli ve sabit ilerlemeli tornalama deneylerinde gözlenen serbest yüzey aşınma değerleri Tablo 5.3’de, serbest yüzey aşınma eğilimi Şekil 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.3:** Kuru işlemede, değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında elde edilen VB aşınma değerleri.

Süre (s)	Değişken ilerleme VB (mm)	Sabit ilerleme VB (mm)
5	0,0374	0,0408
10	0,0508	0,0536
20	0,0535	0,0587
40	0,0588	0,0612
80	0,0615	0,0638
120	0,0642	0,0695
160	0,0714	0,0791
200	0,0749	0,0802
240	0,0816	0,0856



**Şekil 5.1:** Kuru işlemede değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında elde edilen VB aşınma grafiği.

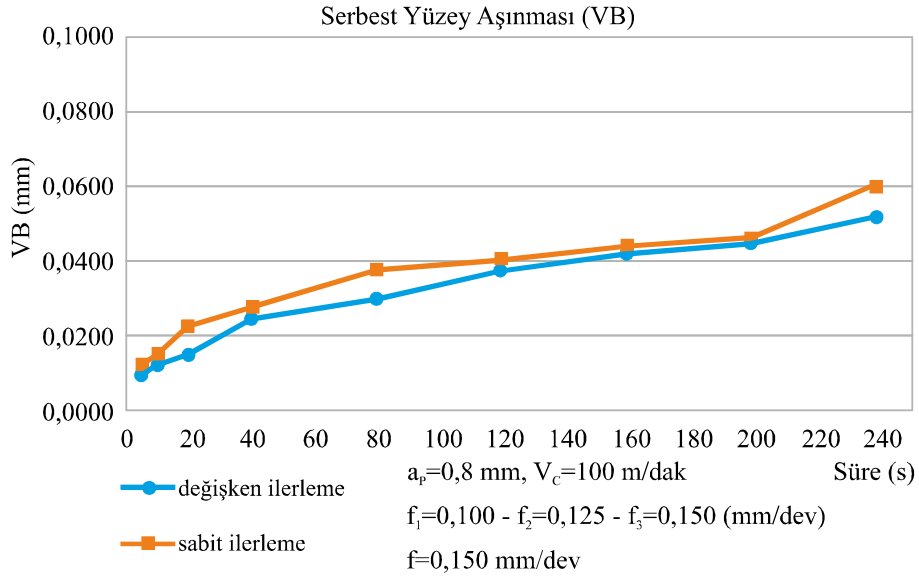
Kuru işleme şartlarında yapılan deney sonuçlarına göre, serbest yüzey aşınma değerinin değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde, sabit ilerlemeli tornalama deneylerine göre daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Kuru işleme şartlarında değişken ilerlemeli tornalama işlemi gerçekleştirildiğinde, serbest yüzey aşınma değerinde en küçük %3,60 en yüksek %9,73 azalma görülmüştür.

### 5.1.2 Kesme Sıvısı ile Yapılan Deneyler

Kesme sıvısı kullanılarak belirlenen tornalama süreleri için gerçekleştirilen değişken ilerlemeli ve sabit ilerlemeli tornalama deneylerinde gözlenen serbest yüzey aşınma değerleri Tablo 5.4'de, serbest yüzey aşınma eğilimi Şekil 5.2'de verilmiştir.

**Tablo 5.4:** Kesme sıvılı işlemede, değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında elde edilen VB değerleri.

Süre (s)	Değişken ilerleme VB (mm)	Sabit ilerleme VB (mm)
5	0,0102	0,0127
10	0,0130	0,0152
20	0,0156	0,0228
40	0,0254	0,0279
80	0,0307	0,0381
120	0,0381	0,0406
160	0,0431	0,0442
200	0,0455	0,0468
240	0,0523	0,0606



**Şekil 5.2:** Kesme sıvılı işlemede, değişken ve sabit ilerleme kullanıldığında VB aşınma grafiği.

Kesme sıvısı kullanılan şartlarda yapılan deney sonuçlarına göre, serbest yüzey aşınma (VB) değerinin değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde, sabit ilerlemeli tornalama deneylerine göre düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Kesme sıvısı kullanılan şartlarda değişken ilerlemeli tornalama işlemi gerçekleştirildiğinde, serbest yüzey aşınma değerinde, en küçük %2,48, en yüksek %31,57 azalma görülmüştür.

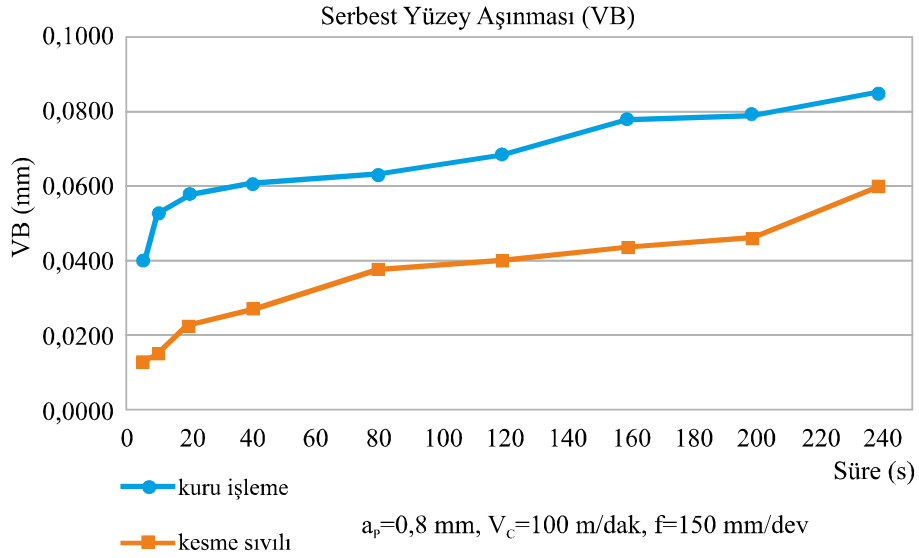
### 5.1.3 Kesme Sıvısının Sabit İlerlemeli Tornalama İşlemine Etkisi

Sabit ilerleme kullanılarak, belirlenen tornalama süreleri için gerçekleştirilen, kuru işleme ve kesme sıvılı deneylerde gözlenen serbest yüzey aşınma değerleri Tablo 5.5’de, serbest yüze aşınma eğilimi Şekil 5.3’de verilmiştir.

**Tablo 5.5:** Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, sabit ilerleme deneyleri için VB aşınma değerleri.

Süre (s)	Kuru işleme VB (mm)	Kesme sıvılı VB (mm)
5	0,0408	0,0127
10	0,0536	0,0152
20	0,0587	0,0228
40	0,0612	0,0279
80	0,0638	0,0381
120	0,0695	0,0406
160	0,0791	0,0442
200	0,0802	0,0468
240	0,0856	0,0606





**Şekil 5.3:** Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, sabit ilerleme deneyleri VB aşınma grafiği.

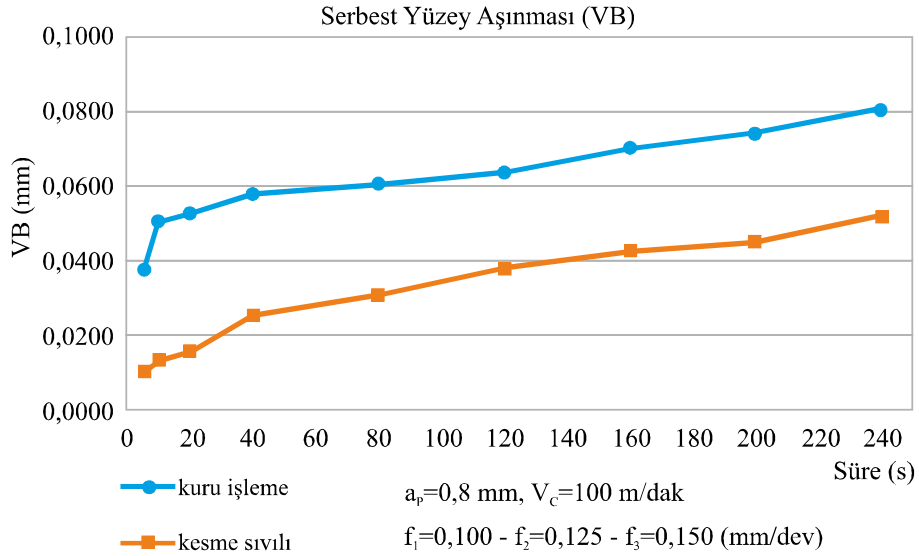
Kesme sıvısı kullanıldığında sabit ilerlemeli tornalama işleminde, kuru işlemeye göre serbest yüzey aşınma değerlerinde en küçük %29,20 ve en yüksek %71,64 azalma görülmüştür. Sabit ilerlemeli tornalama işleminde, kesme sıvısı kullanıldığında serbest yüzey aşınmasının azaldığı ve takım ömrünü olumlu etkilediği görülmüştür.

#### 5.1.4 Kesme Sıvısının Değişken İlerlemeli Tornalama İşlemine Etkisi

Değişken ilerleme kullanılarak, belirlenen tornalama süreleri için gerçekleştirilen, kuru işleme ve kesme sıvılı deneylerde gözlenen serbest yüzey aşınma değerleri Tablo 5.6'da, serbest yüzey aşınma eğilimi Şekil 5.4'de verilmiştir.

**Tablo 5.6:** Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, değişken ilerleme deneyleri VB aşınma değerleri.

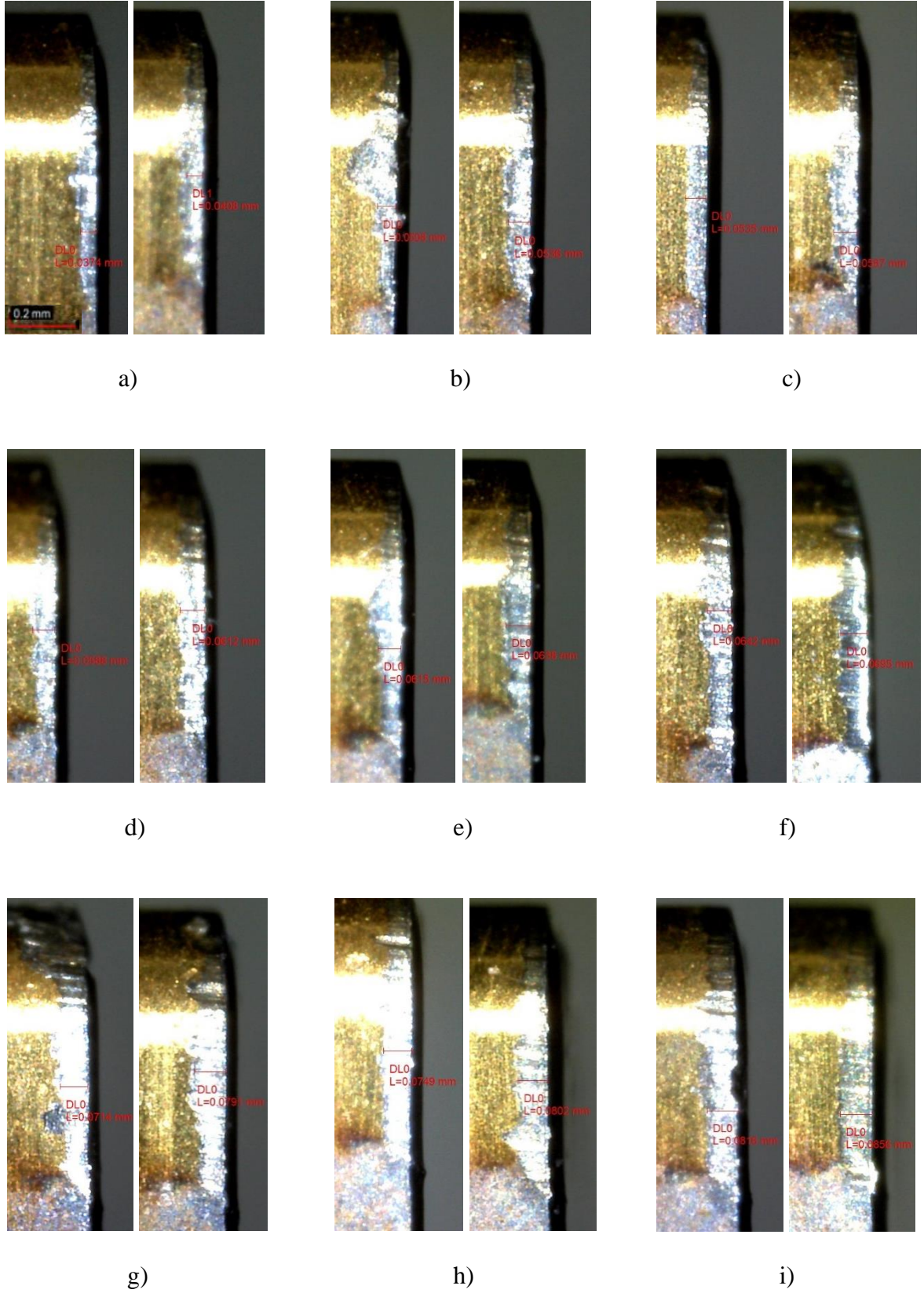
Süre (s)	Kuru işleme VB (mm)	Kesme sıvılı VB (mm)
5	0,0374	0,0102
10	0,0508	0,0130
20	0,0535	0,0156
40	0,0588	0,0254
80	0,0615	0,0307
120	0,0642	0,0381
160	0,0714	0,0431
200	0,0749	0,0455
240	0,0816	0,0523



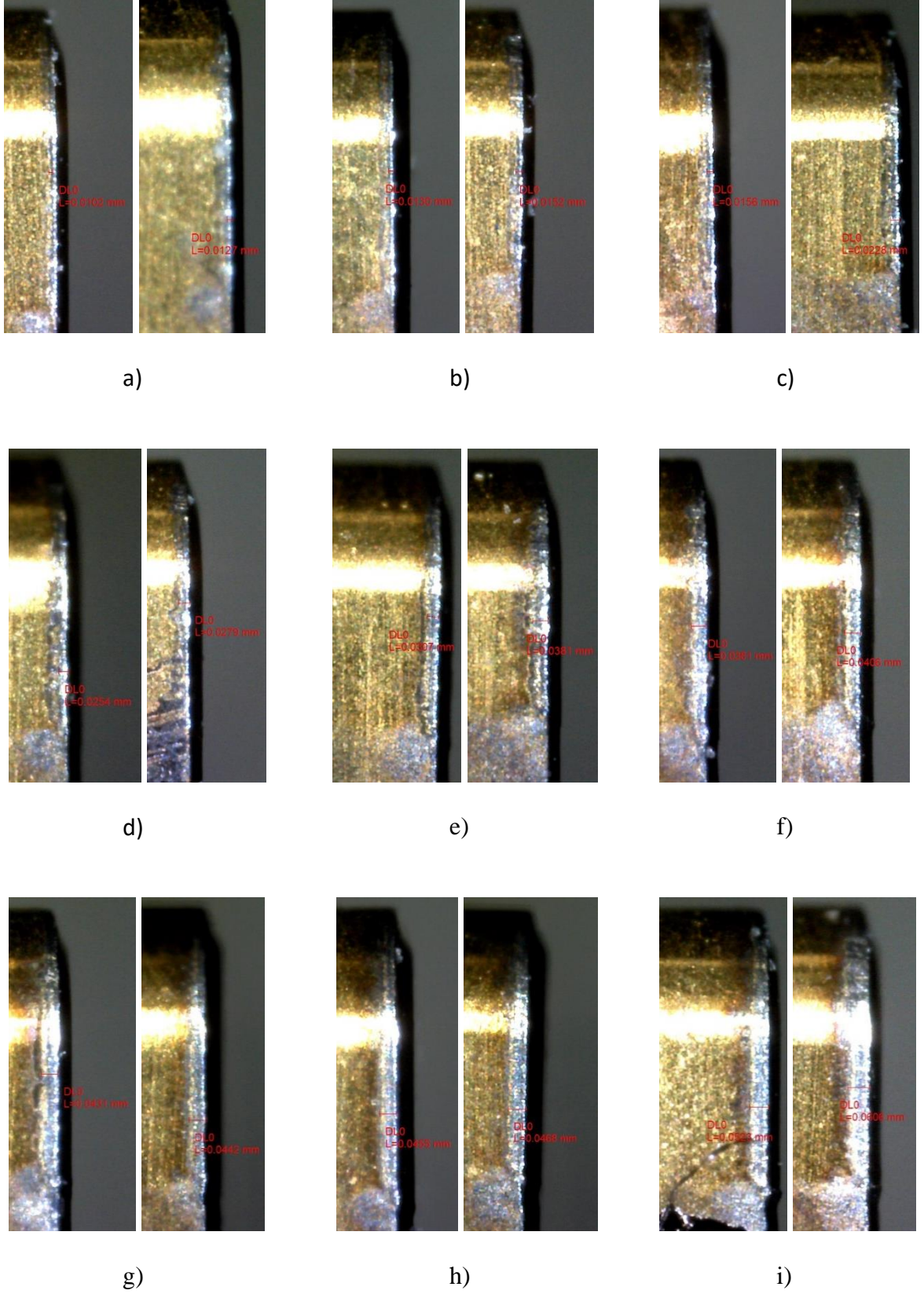
**Şekil 5.4:** Kuru işleme ve kesme sıvılı şartlarda, değişken ilerleme deneyleri VB aşınma grafiği.

Kesme sıvısı kullanıldığında değişken ilerlemeli tornalama işleminde, kuru tornalama işlemine göre aşınma değerlerinde en küçük %35,90 en yüksek %74,40 azalma görülmüştür. Değişken ilerlemeli tornalama işleminde, kesme sıvısı kullanıldığında serbest yüzey aşınmasının azaldığı ve takım ömrünü olumlu etkilediği görülmüştür.

Tablo 5.3’de verilen, kuru işleme değişken ilerlemeli ve sabit ilerlemeli deneylerde kesici takımda gözlenen serbest yüzey aşınma görüntüleri, aynı tornalama süresinde gerçekleştirilen deneyler için Şekil 5.5’de yan yana verilmiştir. Tablo 5.4’de verilen, kesme sıvılı gerçekleştirilen değişken ilerlemeli ve sabit ilerlemeli deneylerde kesici takımda gözlenen serbest yüzey aşınma görüntüleri, aynı tornalama süresinde gerçekleştirilen deneyler için Şekil 5.6’da yan yana verilmiştir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da sol tarafta değişken ilerleme, sağ tarafta sabit ilerlemeli tornalama deneylerinden elde edilen aşınma görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 5.5:** Kuru işleme, değişken ve sabit ilerleme tornalama deney görüntüleri, a) 5s, b) 10s, c) 20s, d) 40s, e) 80s, f) 120s, g) 160s, h) 200s, i) 240s.



**Şekil 5.6:** Kesme sıvılı, değişken ve sabit ilerleme tornalama deney görüntüleri, a) 5s, b) 10s, c) 20s, d) 40s, e) 80s, f) 120s, g) 160s, h) 200s, i) 240s.

## 5.2 Değişken İlerlemeli Tornalama İşleminde $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ Bağımsız Değişkenlerinin Optimizasyonu

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünü oluşturan deneyler, değişken ilerlemeli tornalama deneyi olarak yapılmıştır. Deneylerde kesme sıvısı kullanılmamıştır. Serbest yüzey aşınmasının en küçük değerini sağlayacak değişken ilerleme kademeleri optimize edilmiş, bu ilerleme kademelerinin serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneyler Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, CNC Laboratuvarında bulunan GS-200 model CNC torna tezgahında yapılmıştır. Her deney sonunda tornalama işleminden sonra kesici takımında meydana gelen serbest yüzey aşınma (VB) değeri ölçülmüştür. Serbest yüzey aşınması için ölçümler, hassasiyeti 1/10000 mm olan Dino-Lite AD4000 mikroskop kullanılarak X250 kat büyütülerek ölçülmüştür.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminde kesme parametrelerinden kesme hızı  $V_c = 100$  m/dak ve kesme derinliği  $a_p = 0,8$  mm olarak belirlenmiş, ilerleme kademeleri  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulunu sağlayarak 21 adet planlanmıştır. İlerleme değerleri, takım üreticisine ait kesme verilerine ve çalışma sürecinde gerçekleştirilen ön deneylerden sağlanan tecrübelerden yararlanarak, en düşük 0,063 mm/dev en yüksek 0,150 mm/dev aralığında belirlenmiştir. Her bir değişken ilerlemeli tornalama deneyi için kesme parametreleri Tablo 5.7'de verilmiştir. Deneyler sonunda kesici takımında gözlenen serbest yüzey aşınması (VB) değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

**Tablo 5.7:** Kesme parametreleri, serbest yüzey aşınma değeri.

Deney Numarası	f <sub>1</sub> (mm/dev)	f <sub>2</sub> (mm/dev)	f <sub>3</sub> (mm/dev)	VB (mm)
1	0,130	0,140	0,150	0,0551
2	0,063	0,106	0,149	0,0510
3	0,120	0,130	0,140	0,0449
4	0,110	0,125	0,140	0,0490
5	0,085	0,110	0,135	0,0400
6	0,063	0,073	0,083	0,0375
7	0,140	0,145	0,150	0,0592
8	0,126	0,138	0,150	0,0571
9	0,073	0,098	0,123	0,0425
10	0,063	0,100	0,137	0,0450
11	0,080	0,105	0,130	0,0375
12	0,063	0,088	0,113	0,0450
13	0,090	0,115	0,140	0,0490
14	0,114	0,132	0,150	0,0490
15	0,100	0,125	0,150	0,0510
16	0,073	0,111	0,149	0,0469
17	0,134	0,141	0,148	0,0531
18	0,121	0,135	0,149	0,0551
19	0,095	0,121	0,147	0,0490
20	0,092	0,121	0,147	0,0490
21	0,082	0,116	0,150	0,0490

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi için, bağımsız değişken olarak kademeli ilerleme değerlerini oluşturan birinci ilerleme f<sub>1</sub>, ikinci ilerleme f<sub>2</sub> ve üçüncü ilerleme f<sub>3</sub>, bağımlı değişken olarak deneyler sonunda ölçülen serbest yüzey aşınması kullanılmıştır.

En iyi performansı ifade eden değer, serbest yüzey aşınma değerinin en küçük olduğu değerdir. Bu yüzden analizlerde, Eşitlik (5.1)'de görülen “en küçük - en iyi” (S/N) (S/N) karakteristiğinden yararlanılmıştır. Burada; y<sub>i</sub>: kalite karakteristiğinin ölçülen değeri (kalite değişkeni) ve n: toplam deney (gözlem) sayısıdır [52].

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.1)$$

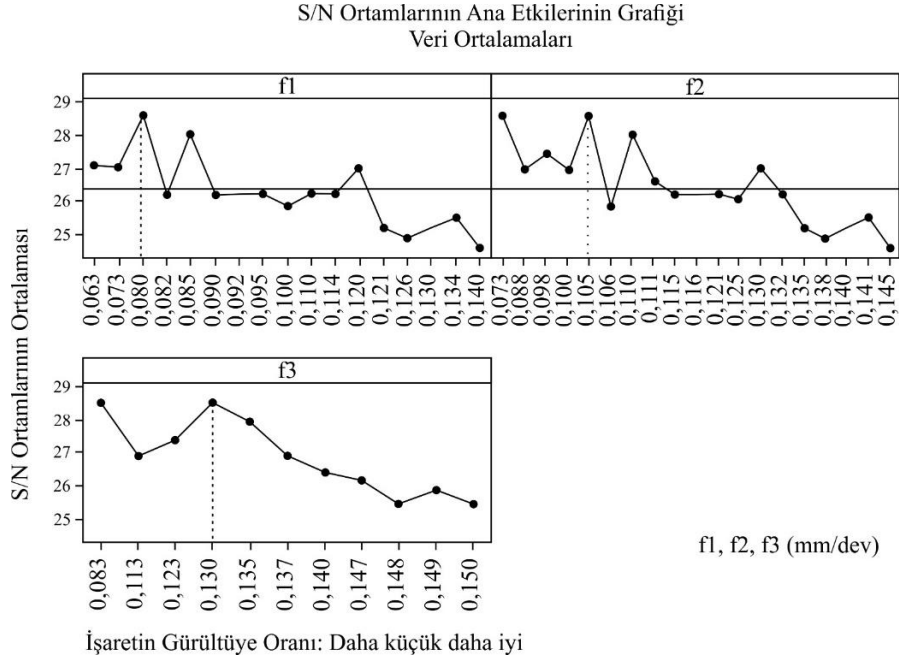
Tablo 5.8'de Rank değerleri incelendiğinde, başlangıç aşınma bölgesinde serbest yüzey aşınma (VB) değeri üzerinde, f<sub>1</sub> birinci ilerleme ve f<sub>2</sub> ikinci ilerlemenin eşit, f<sub>3</sub> nihai ilerlemenin daha az etkiye sahip değişkenler olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 5.8:** Sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu.

İşaretin gürültüye oranının cevap tablosu (Küçük olan daha iyi)			
Seviye 1	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>
1	27,06	28,52	28,52
2	27,00	26,94	26,94
3	28,52	27,43	27,43
4	26,20	26,94	28,52
5	27,96	28,52	27,96
6	26,20	26,85	26,94
7	26,20	27,96	26,45
8	26,20	26,58	26,20
9	25,85	26,20	25,50
10	26,20	26,20	25,87
11	26,20	26,20	25,47
12	26,96	26,02	
13	25,18	26,96	
14	24,87	26,20	
15	25,18	25,18	
16	25,50	24,87	
17	24,55	25,18	
18		25,50	
19		24,55	
Veri	3,97	3,97	3,05
Rank	1,5	1,5	3

Taguchi metodu kullanılarak deney sonuçlarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmasında, “en küçük – en iyi” yaklaşımıyla gerçekleştirilen Taguchi, sinyalin gürültüye oranı analizinde  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulunu sağlayan, optimum serbest yüzey aşınma değeri; birinci ilerleme değeri için  $f_1$ 'in üçüncü seviyesinde, ikinci ilerleme değeri için  $f_2$ 'nin beşinci seviyesinde, üçüncü ilerleme değeri için  $f_3$ 'ün dördüncü seviyesinde elde edilmiştir.

Şekil 5.7'de verilen Sinyal / Gürültü (S/N) oranları değerlendirildiğinde başlangıç aşınmasının en düşük olmasını sağlayacak değişken ilerleme seviyeleri değerlendirilip Tablo 5.9'da verildiği gibi, tornalama işleminde birinci, ikinci ve nihai ilerleme değerleri sırası ile 0,08 mm/dev, 0,105 mm/dev ve 0,130 mm/dev bulunmuştur.



**Şekil 5.7:** Gürültü / Sinyal oranları.

**Tablo 5.9:** Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve optimum ilerleme değerleri

Kontrol Faktörleri	Optimum seviye	Optimum ilerleme f (mm/dev)
$f_1$	3	0,080
$f_2$	5	0,105
$f_3$	4	0,130

Yapılan çalışma sonucunda belirlenen Tablo 5.9’da verilen optimum değişken ilerleme seviyelerinin, Tablo 5.7’de verilen deney planındaki on birinci deneyin değişken ilerleme değerlerinin aynı değerler olduğu görülmektedir.

Tablo 5.9’da verildiği gibi optimum değişken ilerleme seviyelerinde; 0,130 mm/dev üçüncü ilerleme değeri olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle 30 saniye, kuru işleme şartlarında,  $f=0,130$  mm/dev kullanılarak sabit ilerlemeli tornalama deneyi yapılmıştır. İlerlemenin  $f=0,130$  mm/dev olarak belirlendiği sabit ilerlemeli tornalama deneyi kesme koşulları Tablo 5.10’ da verilmiştir.

**Tablo 5.10:** Sabit ilerlemeli kesme parametreleri.

Kesme Hızı $V_c$ (m/dak)	Kesme Derinliği $a_p$ (mm)	İlerleme f (mm/dev)
100	0,8	0,130

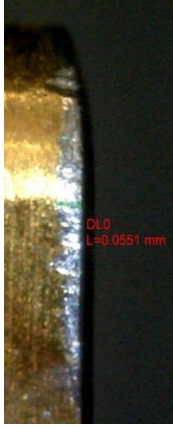


Tablo 5.11’de serbest yüzey aşınma (VB) değeri için,  $f = 0,130$  mm/dev değeri için gerçekleştirilen sabit ilerlemeli tornalama deney sonucu ve optimum sonucu veren değişken ilerlemeli deney sonucu verilmiştir. Tablo 5.11’de verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, sabit ilerlemeli tornalama yerine değişken ilerlemeli tornalama kullanımının serbest yüzey aşınması değerini % 18,4 azalttığı görülmüştür.

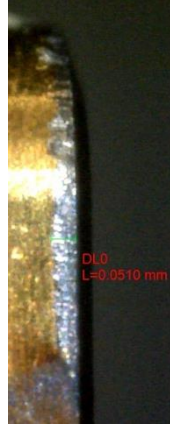
**Tablo 5.11:** Sabit ilerlemeli, optimum değişken ilerlemeli deney için VB değerleri.

Sabit ilerleme VB (mm)	Değişken ilerleme VB (mm)	% Değişim
0,046	0,0375	18,4

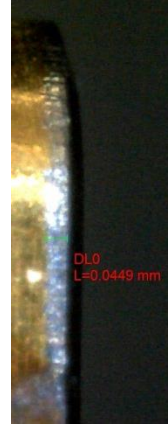
Tablo 5.7’de verilen kuru işleme şartlarında gerçekleştirilen, 21 adet değişken ilerleme tornalama deneyi için kesici takımda gözlenen serbest yüzey aşınma (VB) görüntüleri Şekil 5.8’de verilmiştir. Tablo 5.11’de ilerleme  $f = 0,130$  mm/dev için gerçekleştirilen sabit ilerlemeli tornalama deneyi ile optimum sonucu veren değişken ilerlemeli deneyde kesici takımda gözlenen serbest yüzey aşınma görüntüleri Şekil 5.9’da verilmiştir.



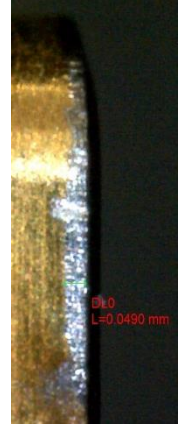
a)



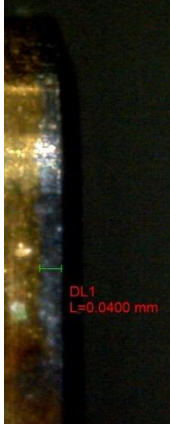
b)



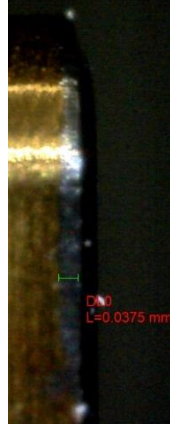
c)



d)



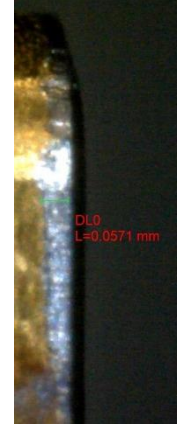
e)



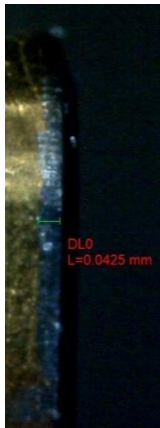
f)



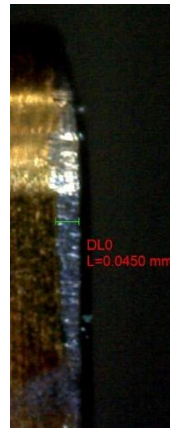
g)



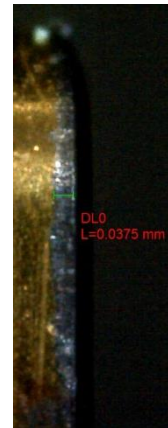
h)



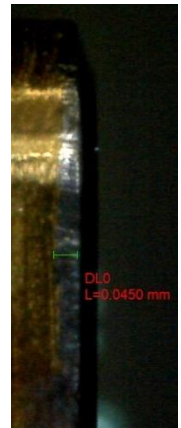
i)



j)

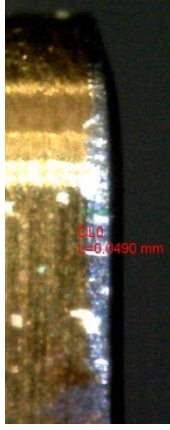


k)

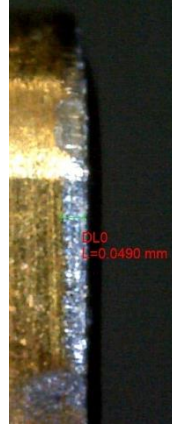


l)

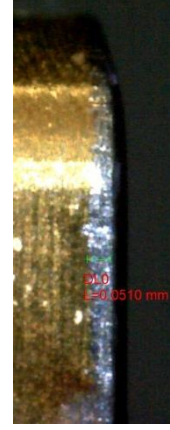
**Şekil 5.8:** Değişken ilerlemeli tornalama deneyleri aşınma görüntüleri.



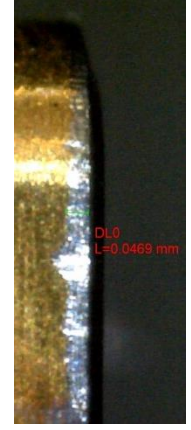
m)



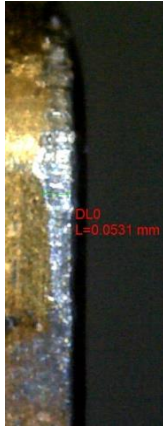
n)



o)



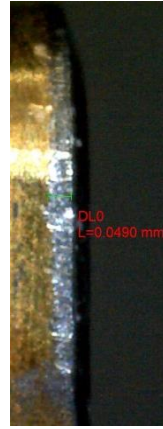
ö)



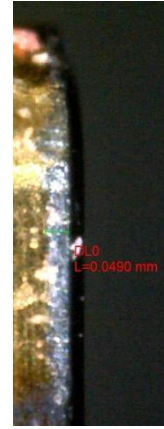
p)



r)



s)

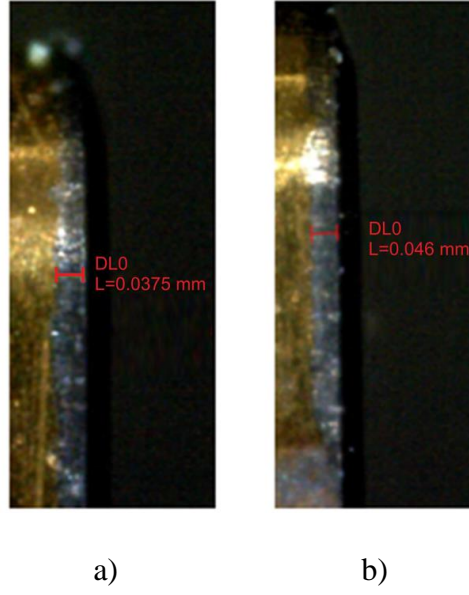


ş)



t)

Şekil 5.8: (devam).



**Şekil 5.9:** a) Optimum değişken ilerleme b)  $f = 0,130$  mm/dev sabit ilerleme deney görüntüsü.

Deneyle sonunda kullanılan kesici takımların mikroskop görüntüleri incelendiğinde bazı kesici takımların uç radyüsünde çentik aşınması gözlenmiştir. Şekil 5.10’da, Tablo 5.7’de verilen birinci ilerleme 0,130 mm/dev, ikini ilerleme 0,140 mm/dev ve üçüncü ilerleme 0,150 mm/dev olan değişken ilerleme deneyinde, takımın uç radyüsünde gözlenen çentik aşınması verilmiştir. Çalışma sürecinde, özellikle ilerleme değerinin yüksek olduğu deneyle, takım kırılması ile bitmiştir. Deneylede kullanılan seramik takımlarda oluşan çentik aşınmalarının takımında kırılmaya sebep olduğu düşünölmektedir.



**Şekil 5.10 :** Gözlenen çentik aşınması.

### 5.3 Serbest Yüzey Aşınmasının ve Kesme Kuvvetinin Modellenmesi İçin Değişken İlerlemeli Tornalama Deneyleri

Deneysel çalışmanın üçüncü bölümünde modelleme çalışmasında kullanılmak için yapılan değişken ilerlemeli tornalama deneyleri yer almaktadır. Deneyler Sabancı Üniversitesi, Üretim Araştırma Laboratuvarında bulunan MORI SEIKI NL 1500 CNC torna tezgahında yapılmıştır. Deneyler kuru işleme şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminde kesme parametrelerinden kesme hızı,  $V_c = 100$  m/dak ve kesme derinliği  $a_p = 0,8$  mm değerinde sabit tutularak, değişken ilerleme değerleri  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulunu sağlayan 18 adet deney planlanmıştır. İlerleme değerleri, takım üreticisine ait kesme verilerine ve çalışma sürecinde gerçekleştirilen ön deneylerden sağlanan tecrübelerden yararlanılarak, en düşük 0,063 mm/dev, en yüksek 0,150 mm/dev arasında belirlenmiştir. Her bir değişken ilerlemeli tornalama deneyinde kullanılan kesme parametreleri Tablo 5.12’de verilmiştir.

Modelleme çalışmasında kullanılmak üzere, her bir değişken ilerlemeli tornalama deneyinde, ilerlemenin her bir kademesi için, dinamometre ile kesme işlemi esnasında oluşan teğetsel kuvvet  $F_t$ , ilerleme kuvveti  $F_f$  ve radyal kuvvet  $F_r$  sinyalleri ölçülmüştür. Ölçülen teğetsel kuvvet  $F_t$ , kesme kuvveti  $F_c$  dir ve ölçüm değerleri Tablo 5.12’de verilmiştir. Tornalama işleminden sonra kesici takımda meydana gelen serbest yüzey aşınma (VB) değerinin birkaç noktadan ölçümü alınarak ölçümlerin ortalama değerleri Tablo 5.12’de verilmiştir.

Aşınma ölçümleri ShuttlePix- P-400R dijital mikroskop ile alınmıştır. Kesme kuvveti sinyalleri Kistler marka 9129AA modeli dinamometre kullanılarak alınmıştır. Her deney kesici takımın yeni kesme kenarı ile yapılmıştır.

**Tablo 5.12:** Kesme koşulları, kesme kuvveti ve serbest yüzey aşınma değerleri.

Deney numarası	f <sub>1</sub> (mm/dev)	f <sub>2</sub> (mm/dev)	f <sub>3</sub> (mm/dev)	F <sub>c1</sub> (N)	F <sub>c2</sub> (N)	F <sub>c3</sub> (N)	VB (µm)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,100	0,125	0,150	273,73	319,95	363,17	46,222
3	0,063	0,088	0,113	203,81	263,28	309,39	37,014
4	0,140	0,145	0,150	377,53	390,07	402,39	47,000
5	0,126	0,138	0,150	336,48	358,25	385,83	43,000
6	0,090	0,115	0,140	285,15	334,25	388,89	45,655
7	0,114	0,132	0,150	307,87	342,19	378,98	44,011
8	0,130	0,140	0,150	350,79	370,71	391,15	45,487
9	0,063	0,106	0,149	207,17	299,41	406,95	43,818
10	0,120	0,130	0,140	319,36	340,06	360,90	44,000
11	0,063	0,073	0,083	202,52	229,98	251,71	34,500
12	0,063	0,100	0,137	208,96	289,98	358,12	43,105
13	0,080	0,105	0,130	241,54	289,49	335,38	44,516
14	0,073	0,111	0,149	235,97	313,98	383,42	47,011
15	0,082	0,116	0,150	257,68	322,91	417,35	46,043
16	0,095	0,121	0,147	292,61	341,13	390,28	47,000
17	0,121	0,135	0,149	346,39	374,65	406,43	46,000
18	0,134	0,141	0,148	348,88	364,07	394,03	47,011
19	0,085	0,110	0,135	269,37	321,68	370,45	42,048

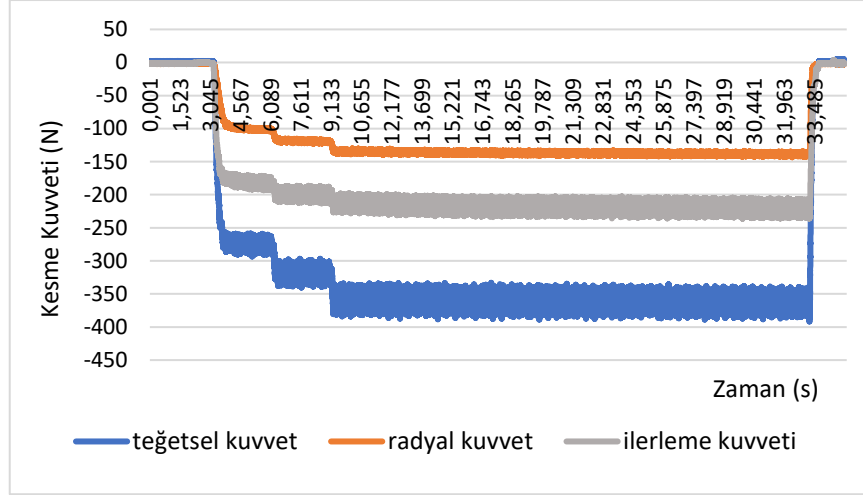
Değişken ilerlemeli tornalama deneylerinden elde edilen ölçümler ve deney parametrelerine göre, serbest yüzey aşınması modellenmiş ve serbest yüzey aşınma değerinin matematiksel denklemi elde edilmiştir. Değişken ilerlemeli tornalama işleminde, harcanan toplam enerjinin bir fonksiyonu olarak serbest yüzey aşınmasının modellenmesi çalışılmıştır. f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>, f<sub>3</sub> ilerlemelerine karşılık gelen F<sub>c1</sub>, F<sub>c2</sub>, F<sub>c3</sub> kesme kuvvetleri modellenmiş, matematiksel denklemi elde edilmiş. Serbest yüzey aşınma ile kuvvet denklemleri arasında ilişki araştırılmıştır.

Modelleme çalışması için ayrıca üç adet doğrulama deneyi yapılmıştır. Tablo 5.13'de doğrulama deneyleri sırasında ölçülen kesme kuvveti sinyalleri değeri ve kesme işleminden sonra kesici takımında meydana gelen serbest yüzey aşınma değerleri verilmiştir.

**Tablo 5.13:** Kesme koşulları, kesme kuvveti ve serbest yüzey aşınma değerleri.

Deney numarası	f <sub>1</sub> (mm/dev)	f <sub>2</sub> (mm/dev)	f <sub>3</sub> (mm/dev)	F <sub>c1</sub> (N)	F <sub>c2</sub> (N)	F <sub>c3</sub> (N)	VB (µm)
1	0,073	0,098	0,123	245,77	300,32	345,27	43,012
2	0,110	0,125	0,140	328,12	358,00	387,89	51,024
3	0,105	0,121	0,140	290,29	317,34	353,97	42,012

Şekil 5.11’de değişken ilerleme kademeleri birinci ilerleme 0,100 mm/dev, ikinci ilerleme 0,125 mm/dev ve üçüncü ilerleme 0,150 mm/dev olarak belirlenen deneyden elde edilen teğetsel, radyal ve ilerleme kuvvetlerini içeren kuvvet, zaman grafikleri örnek olarak verilmiştir. İlerleme değerindeki kademeli artışla beraber teğetsel kuvvetinde 273,73 N değerinden 319,95 N ve 363,17 N değerine arttığı görülmektedir.



Şekil 5.11: Kesme kuvveti – zaman grafiği.

### 5.3.1 Serbest Yüzey Aşınmasının Modellenmesi

Tornalama işleminde kesici takımında meydana gelen serbest yüzey aşınma değerinin, bir model aracılığıyla tornalama işlemine başlamadan belirlenebilmesi oldukça yararlı olacaktır. Talaşlı imalat işlemine başlarken, takım ömrünü etkileyen optimum kesme koşullarını belirlemek ayrıca takım serbest yüzey aşınmasını önceden tahmin etmek, üretim maliyetlerini, iş parçasının yüzey kalitesini olumlu etkileyecektir. Deneysel çalışmalar uzun zaman alan, maliyetli çalışmalardır. İlerleme ile serbest yüzey aşınması arasında bulunacak bir bağıntı kesme parametrelerinin belirlenmesi için harcanan zaman ve maliyeleri azaltacaktır.

Bu çalışmada; değişken ilerlemeli tornalama işleminde,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  ilerlemelerinde harcanan toplam enerjinin bir fonksiyonu olarak serbest yüzey aşınmasının modellenmesi çalışılmıştır.

Kesme kuvvetinin takım kenarı üzerindeki kümülatif etkisi, kesme enerjisi ile açıklanabilir. Kesme enerjisi, Eşitlik (5.2)'de ifade edildiği gibi takım kenarının hareket mesafesi, şekillenmemiş talaş uzunluğu ile çarpılan kesme kuvveti olarak tanımlanır [32].

$$E = F_{tc} \cdot s \quad (5.2)$$

Burada;  $F_{tc}$  tornalama işleminin kesme kuvveti,  $s$ : takım kenarının hareket mesafesi, şekillenmemiş talaş uzunluğu,  $E$ : kesme enerjisidir. Enerji yoğunluğu, takım kenarının birim uzunluğundaki enerji tüketimi olarak tanımlanmaktadır [32].

$$E_{in} = \frac{E}{L_e} = \frac{F_{tc} \cdot s}{L_e} \quad (5.3)$$

Eşitlik (5.3)'de  $E_{in}$  kesme enerjisi yoğunluğu,  $L_e$  takım kenarının uzunluğudur.

Kesme kuvveti dağılımını ve enerji yoğunluğu dağılımını doğru tahmin etmek için takım kenarı kuvvet/enerji modelinde ayrıklaştırılmıştır. Takım kenarının ayrık bir ögesi  $i$  ve iş parçasının bir devri için, enerji yoğunluğu Eşitlik (5.4) ve Eşitlik (5.5)'den yararlanılarak Eşitlik (5.6)'da ki gibi tanımlanmaktadır [32].

$$F_{tc}(i) = K_{tc}(i) \cdot A_c(i) \quad (5.4)$$

$$s(i) = V_c(i) \cdot t \quad (5.5)$$

$$E_{in}(i) = \frac{F_{tc}(i) \cdot s(i)}{L_e(i)} = \frac{K_{tc}(i) \cdot A_c(i) \cdot V_c(i) \cdot t}{L_e(i)} \quad (5.6)$$

Burada iş parçasının bir devri için ayrık takım kenar elemanı  $i$  nin;  $E_{in}(i)$  enerji yoğunluğu,  $F_{tc}(i)$  kesme kuvveti,  $s(i)$  şekillenmemiş talaş uzunluğu,  $L_e(i)$  takım kenarının ayrıklaştırma uzunluğu,  $K_{tc}(i)$  kesme katsayısı,  $A_c(i)$  kesme alanı,  $V_c(i)$  kesme hızı,  $t$  iş parçasının bir devir dönmesi için harcanan zamandır.

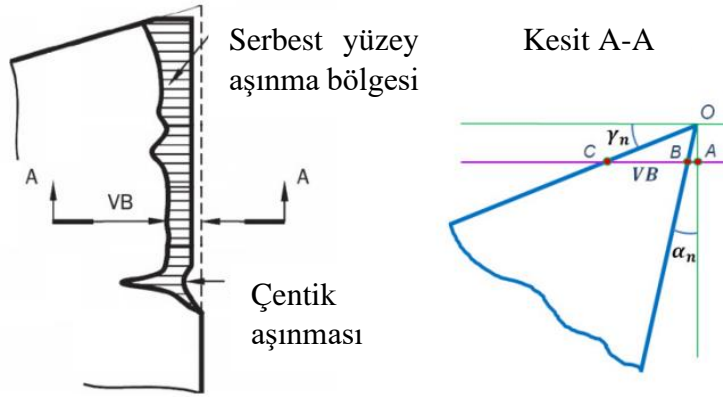
Tornalamanın belirli bir anında, takım kenarının aşınma hacmi, birikmiş enerji yoğunluğu ile ilişkilidir. Kesme sıcaklığı takım aşınmasını hızlandırır. Kesme sıcaklığını etkileyen başlıca faktörler, iş parçasının malzeme özellikleri, talaş yükü ve kesme hızıdır. Talaş yükü parametreleri, Eşitlik (5.7)'de enerji yoğunluğu denkleminde dahil edilmiştir [32].

$$FW_v(i) = C \cdot E_{accum}(i)^p \cdot V_c(i)^q \quad (5.7)$$



Burada;  $FW_v(i)$  ayrıklaştırılmış takım kenar elemanı  $i$ 'nin kenar aşınma hacmi,  $E_{accum}(i)$  birikmiş enerji yoğunluğu,  $V_c(i)$  kesme hızı,  $C$ ,  $p$  ve  $q$  katsayıdır.

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi normal talaş açısı  $\alpha_n$  ve normal boşluk açısı  $\gamma_n$  olan bir torna takımı için, ayrıklaştırılmış takım kenar elemanı  $i$ 'nin, takım kenar hacmi  $FW_v(i)$  Eşitlik (5.8)'deki gibi hesaplanabilir [32].



Şekil 5.12: Serbest yüzey aşınmasının (VB) geometrik yeri [32].

$$FW_v(i) = \ell \cdot \frac{1}{2} \cdot |\overline{BC}|^2 \cdot \frac{\tan \gamma_n}{1 - \tan \gamma_n \cdot \tan \alpha_n} \quad (5.8)$$

Burada;

$|\overline{BC}|$  = VB serbest yüzey aşınma değeri,  $\ell$  ayrık takım kenar elemanının uzunluğudur.

Eşitlik (5.7) ve Eşitlik (5.8) eşitlenip, VB serbest yüzey aşınma değeri çekilecek olursa, VB serbest yüzey aşınma değeri Eşitlik (5.9)'daki denklem olarak elde edilir [32].

$$VB = \sqrt{2C \cdot \left( \frac{1 - \tan \gamma_n \cdot \tan \alpha_n}{\ell \cdot \tan \gamma_n} \right) \cdot E_{accum}^p \cdot V_c^q} \quad (5.9)$$

Çalışmamızda deneylerde normal talaş açısı  $\alpha_n = 27^\circ$ , normal boşluk açısı  $\gamma_n = 3^\circ$  olarak alınmıştır. Ayrıklaştırılmış takım kenarının bir elemanının uzunluğu  $\ell = 1$  alınmıştır. Ayrıca Tablo 5.12'de verilen tüm değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde kesme hızı  $V_c=100$  m/dak olarak sabit bir değerdir. Bu nedenle kesme hızının katkısı ancak bir sabit değeri ifade etmektedir. Kesici kenar uzunluğuna göre ayrıklaştırma yapılmadığından, kolaylık

sağlaması için Eşitlik (5.9)'daki serbest yüzey aşınma (VB) modeli Eşitlik (5.10)'da verilen eşitlik haline indirgenmiştir.  $E_{accum}(i)$ ; birikmiş enerji yoğunluğu,  $E_T$  toplam enerji olarak yer almıştır. Birinci  $f_1$ , ikinci  $f_2$  ve üçüncü  $f_3$  ilerleme değerlerinden kaynaklanan toplam enerji  $E_T$  dir.

$$VB = f(E_T) = C \cdot E_T^p \quad (5.10)$$

Şekillenmemiş talaş uzunluğu  $s$ , Eşitlik (5.11) ve Eşitlik (5.12) kullanılarak, Eşitlik (5.13)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$D_{ort} = \frac{D_{üst} + D_{alt}}{2} \quad (5.11)$$

$D_{üst}$  üst çap, talaş kaldırma işleminden sonra  $D_{alt}$  alt çapına düşer.  $D_{ort}$  ortalama çaptır.

$$\text{Çevre} = \pi \cdot D_{ort} \quad (5.12)$$

$$s = \frac{\text{iş parçası tur sayısı} \cdot (\pi \cdot D_{ort})}{1000} \quad (5.13)$$

Modelleme çalışması için yapılan Tablo 5.12'de verilen deneyler için, değişken ilerlemenin birinci ( $f_1$ ), ikinci ( $f_2$ ) ve üçüncü ( $f_3$ ) ilerleme kademeleri için hesaplanan şekillenmemiş talaş uzunlukları  $s_1$ ,  $s_2$  ve  $s_3$  Tablo 5.14'de verilmiştir.

Çalışmada birinci ilerlemeye ( $f_1$ ) karşılık harcanan kesme enerjileri Eşitlik (5.14)'de, ikinci ilerlemeye ( $f_2$ ) karşılık harcanan kesme enerjileri Eşitlik (5.15)'de, üçüncü ilerlemeye ( $f_3$ ) karşılık harcanan kesme enerjileri Eşitlik (5.16)'da verilen eşitliklerden hesaplanmıştır.

$$E_{T1} = F_{c1} \cdot s_1 \quad (5.14)$$

$$E_{T2} = F_{c2} \cdot s_2 \quad (5.15)$$

$$E_{T3} = F_{c3} \cdot s_3 \quad (5.16)$$

Değişken ilerlemeli tornalama işlemi uygulanan deneylerde, değişken ilerlemeli tornalamada her bir ilerlemeye karşılık gelen teğetsel kesme kuvveti asıl kesme kuvveti olarak alınmış, ( $F_c$ ) kesme kuvveti şekillenmemiş talaş uzunluğu  $s$  kullanılarak birinci  $f_1$ , ikinci  $f_2$  ve üçüncü  $f_3$  ilerleme değerleri için toplam enerji  $E_T$ , Eşitlik (5.17)'de verildiği gibi ifade edilmiştir.

$$E_T = \sum_{i=1}^3 E_i = \sum_{i=1}^3 F_{ci} s_i = F_{c1} \cdot s_1 + F_{c2} \cdot s_2 + F_{c3} \cdot s_3 \quad (5.17)$$

Her bir deneyde ilerlemenin her kademesinde, ortalama çap  $D_{ort}$  dolayısı ile çevre ve iş parçası tur sayısına bağlı olarak hesaplan şekillenmemiş talaş uzunluğu ve ilerlemenin her kademesinde ölçülen teğetsel kuvvete bağlı olarak hesaplanan toplam enerji  $E_T$  değerleri, Tablo 5.14'de verilmiştir. Tablo 5.14'de birinci, ikinci, üçüncü ilerleme değerleri için ölçülen kesme kuvveti değerleri ve milimetre olarak serbest yüzey aşınma değerleri de yer almaktadır.

Modelleme için yapılan deneylerde ilerlemenin her kademesine karşılık ölçülen teğetsel kesme kuvveti ve  $s$  şekillenmemiş talaş uzunluğuna bağlı olarak Eşitlik (5.17) kullanılarak hesaplanan toplam enerji yoğunluğu girdi parametresi, deneyler sonunda ölçülen serbest yüzey aşınma değeri çıktı parametresi olarak kullanılmıştır. Yapılan 18 deney ve ilerlemenin  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  olarak her kademesi için sıfır değerinin kullanıldığı deney modellemeye sokularak, değişken ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınma modelinin katsayıları bulunmuştur. Modelleme çalışmasında, model katsayıları Matlab programı kullanılarak hesaplanmıştır.

**Tablo 5.14:** Model parametreleri.

Deney No	F <sub>c1</sub> (N)	F <sub>c2</sub> (N)	F <sub>c3</sub> (N)	s <sub>1</sub> (m)	s <sub>2</sub> (m)	s <sub>3</sub> (m)	E <sub>T</sub> (Nm)	VB (mm)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	273,73	319,95	363,17	4,92602	4,92602	40,65606	17689,54020	0,046222
3	203,81	263,28	309,39	4,92602	4,92602	40,67234	14884,50787	0,037014
4	377,53	390,07	402,39	4,39823	4,39823	41,78318	20189,21585	0,047000
5	336,48	358,25	385,83	4,92602	4,92602	40,65606	19108,58063	0,043000
6	285,15	334,25	388,89	4,92602	4,92602	40,65724	18862,36741	0,045655
7	307,87	342,19	378,98	4,78779	4,78779	40,95154	18832,16354	0,044011
8	350,79	370,71	391,15	4,78779	4,78779	40,95154	19472,58329	0,045487
9	207,17	299,41	406,95	4,78779	4,78779	40,95325	19091,32381	0,043818
10	319,36	340,06	360,90	4,78779	4,78779	40,95268	17936,98479	0,044000
11	202,52	229,98	251,71	4,78779	4,78779	40,95577	12379,69485	0,034500
12	208,96	289,98	358,12	4,66212	4,66212	41,22746	17090,49944	0,043105
13	241,54	289,49	335,38	4,66212	4,66212	41,22393	16301,40924	0,044516
14	235,97	313,98	383,42	4,39823	4,39823	41,78318	18439,31419	0,047011
15	257,68	322,91	417,35	4,39823	4,39823	41,78318	19991,77932	0,046043
16	292,61	341,13	390,28	4,53018	4,53018	41,49580	19065,93548	0,047000
17	346,39	374,65	406,43	4,53018	4,53018	41,50128	20133,80472	0,046000
18	348,88	364,07	394,03	4,53018	4,53018	39,53191	18806,54899	0,047011
19	269,37	321,68	370,45	4,53018	4,53018	41,49306	18048,66571	0,042048

Doğrusal olmayan regresyon yöntemi, Matlab fonksiyonu `fitnlm(x,y,modelfun,a0, 'Options',opts)` çağırılarak uygulanmıştır. Burada bağımsız değişken  $x = E_T$  ve bağımlı değişken  $y = VB$  dir. Fonksiyon, `opts='robust fit'` güçlü uyum seçeneği ve model fonksiyonu `modelfun=(a,x)(a(1).*x.^a(2))` olacak şekilde çağırılmıştır.  $a_0$ , aranan katsayıların başlangıç değeridir. Elde edilen serbest yüzey aşınması VB model katsayıları,  $a_1$  ve  $a_2$  Tablo 5.15'de verilmiştir.

**Tablo 5.15:** Model katsayıları.

	Tahmin	Standart Hata	T İstatistiği	p Değeri
$a_1$	0,00013496165483203	0,00012941797407921	1,04283547777859	0,311628341878468
$a_2$	0,590469804701496	0,0977169036664576	6,04265774442647	1,31851525324151e <sup>-05</sup>

Gözlem Sayısı	: 19
Hata serbestlik dereceleri	: 17
Kare Ortalamaların Karekökü Hatası	: 0,00188
R-Kare	: 0,979
Düzeltilmiş R-Kare	: 0,977
F-İstatistiğine karşı sıfır modeli	: 6.42e+03
p-değeri	: 3.41 e-25 bulunmuştur.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınma değeri tahmini için program tarafından oluşturulan Matlab kodunun matematiksel olarak ifadesi Eşitlik (5.18)'de verilmiştir.

$$VB = f(E_T) = a_1 \cdot E_T^{a_2} \quad (5.18)$$

Bulunan katsayılar yerine konularak doğrusal olmayan regresyon kullanılarak kenar aşınmasının, kesme kuvvetinin, şekillenmemiş talaş uzunluğu ile çarpımıyla hesaplanan toplam kesme enerjisi arasında bulunan bağıntı Eşitlik (5.19)'da verilmiştir. Serbest yüzey aşınma değeri oldukça düşük  $R^2$  hatası ile tahmin edilmiştir.

$$VB = 0,00013496165483203 \cdot E_T^{0,590469804701496} \quad (5.19)$$

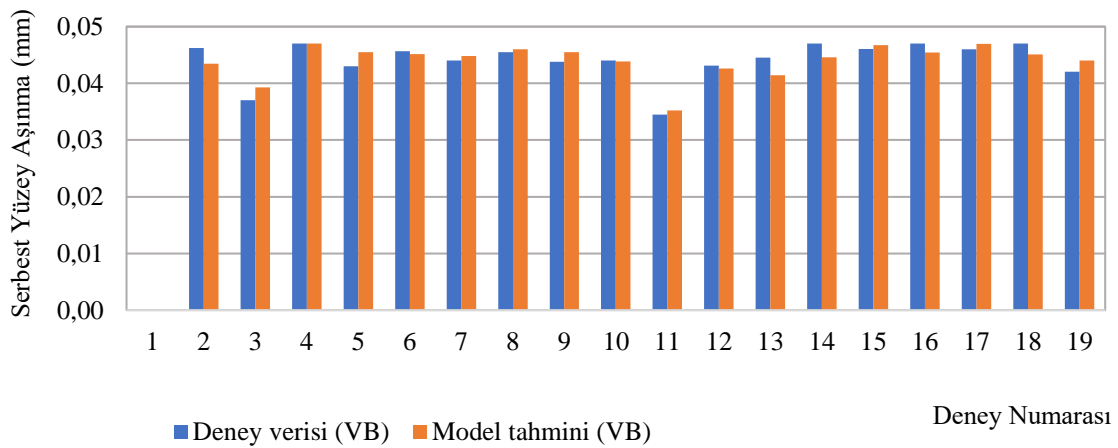
Program verilerinde kare ortalamaların karekökü hatası 0,00188 dir. Elde edilen model kabul edilebilir bir hata ile serbest yüzey aşınma değerini tahmin edebilmektedir. Bu modelleme çalışmasında Eşitlik (5.19)'da ifade edilen, toplam enerji yoğunluğuna bağlı takım serbest yüzey aşınma modeli önerilmiştir.

Tablo 5.12'de verilen deneyler sonunda ölçülen serbest yüzey aşınma değerleri, Eşitlik (5.19)'da verilen serbest yüzey aşınma modeli kullanılarak tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerleri ve hata oranları Tablo 5.16'da verilmiştir.

**Tablo 5.16:** Deney verileri, model tahmini serbest yüzey aşınma ve hata oranı.

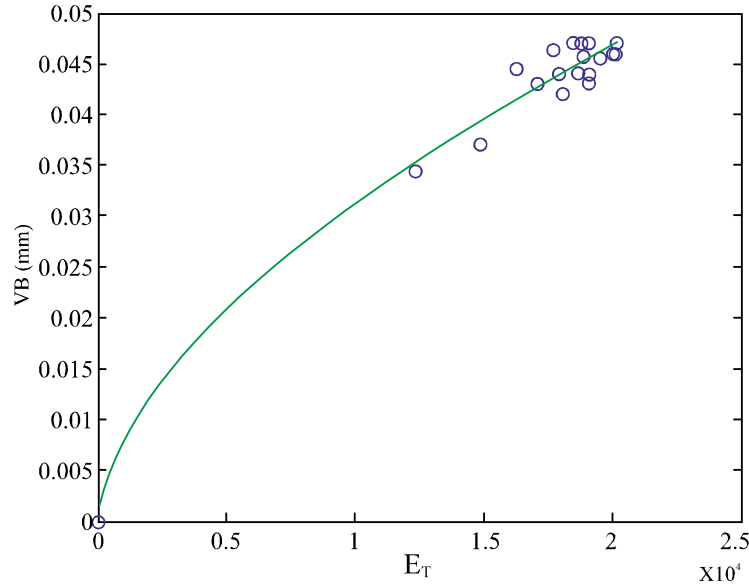
Deney Numarası	Deney verileri VB (mm)	Model tahmini VB (mm)	Hata %
1	0	0	0
2	0,046222	0,043487	5,92
3	0,037014	0,039272	6,10
4	0,047000	0,047017	0,04
5	0,043000	0,045514	5,85
6	0,045655	0,045167	1,07
7	0,044011	0,044841	1,89
8	0,045487	0,046024	1,18
9	0,043818	0,045490	3,82
10	0,044000	0,043845	0,35
11	0,034500	0,035223	2,10
12	0,043105	0,042611	1,15
13	0,044516	0,041438	6,91
14	0,047011	0,044566	5,20
15	0,046043	0,046745	1,52
16	0,047000	0,045454	3,29
17	0,046000	0,046941	2,04
18	0,047011	0,045088	4,09
19	0,042048	0,044006	4,66

Deney verileri ile modelin tahmini arasında, en yüksek % 6,91 hata oranı görülmektedir. Şekil 5.13’de deney verileri ile modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerlerinin karşılaştırılmalı grafiği verilmiştir. Karşılaştırmalar modelin tahmini ile deney verilerinin uyumlu olduğunu göstermiştir.



**Şekil 5.13:** Deney verileri, modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerlerinin karşılaştırma grafiği.

Doğrusal olmayan regresyon kullanılarak katsayıları elde edilen serbest yüzey aşınma modelinin çalışma aralığındaki kesme enerjisine göre değişiminin grafiği Şekil 5.14’de yeşil eğri olarak görülmektedir. Deney sırasında ölçülen serbest yüzey aşınması değerleri mavi daire olarak görülmektedir.



**Şekil 5.14:** Serbest Yüzey Aşınmasının (VB), kesme kuvvetinden doğan kümülatif enerjiye ( $E_T$ ) göre değişimi.

Serbest yüzey aşınma değeri modellenip matematik ifadesinin kurulmasından sonra Tablo 5.13’de verilen üç farklı değişken ilerlemeli tornalama deneyi için serbest yüzey aşınma modelinin doğrulaması yapılmıştır. Üç doğrulama deneyi için kullanılan model parametreleri,  $f_1$  birinci,  $f_2$  ikinci,  $f_3$  üçüncü ilerleme değerleri için ölçülen kesme kuvvetleri, her bir deney için hesaplanarak kayıt altına alınan şekillenmemiş talaş uzunlukları, ilerlemenin her kademesinde ölçülen teğetsel kuvvete bağlı olarak hesaplanan toplam enerji  $E_T$  değerleri ve milimetre olarak serbest yüzey aşınma değeri Tablo 5.17’ de verilmiştir.

**Tablo 5.17:** Model parametreleri.

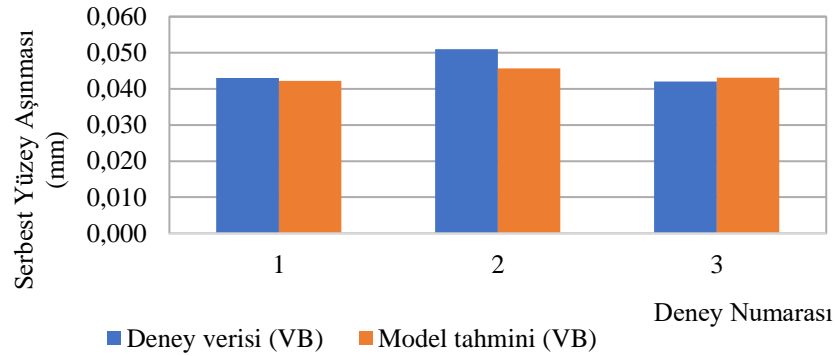
Deney No	$F_{c1}$ (N)	$F_{c2}$ (N)	$F_{c3}$ (N)	$s_1$ (m)	$s_2$ (m)	$s_3$ (m)	$E_T$ (Nm)	VB (mm)
1	245,77	300,32	345,27	4,78779	4,78779	40,94920	16753,09451	0,043012
2	328,12	358,00	387,89	4,66212	4,66212	41,22649	19190,12019	0,051024
3	290,29	317,34	353,97	4,53018	4,53018	41,49965	17442,30358	0,042012

Tablo 5.18’de doğrulama deneylerinden ölçülen serbest yüzey aşınma değerleri, Eşitlik (5.19)’da verilen serbest yüzey aşınma modelinden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerleri ve hata oranları verilmiştir.

**Tablo 5.18:** Doğrulama deney verileri, model tahmini serbest yüzey aşınma değerleri.

Deney Numarası	Deney verileri VB (mm)	Model tahmini VB (mm)	Hata (%)
1	0,043012	0,04211	2,09
2	0,051024	0,04563	10,57
3	0,042012	0,04313	2,65

Doğrulama deneyleri için deney verileri ile modelin tahmini arasında, en yüksek % 10,57 hata oranı görülmektedir. Bu oran kabul edilebilir bir seviyededir. Doğrulama deneylerinde gözlenen serbest yüzey aşınma değeri verileri ile modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değeri verilerinin karşılaştırılma grafiği Şekil 5.15’de verilmiştir.



**Şekil 5.15:** Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerlerinin karşılaştırılma grafiği.

### 5.3.2 Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi

Değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde, kademeli olarak  $f_1$  birinci,  $f_2$  ikinci ve  $f_3$  nihai ilerleme değerleri ile yapılan tornalama işlemi sırasında dinamometre ile her bir ilerlemeye karşılık takım üzerine etki eden kesme kuvvetleri  $F_c$ , tornalama boyu, tornalama süresi ve  $D_1$  tornalama başlangıç çapı,  $D_2$  son çap, kesme derinliği, kesme hızı, devir gibi diğer kesme parametreleri, deneyler sonunda serbest yüzey aşınma değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminde takım serbest yüzey aşınma değeri, toplam enerji yoğunluğuna  $E_T$  bağlı olarak Eşitlik (5.19) verildiği gibi modellenmiştir. Eşitlik (5.19) kullanılarak, toplam kesme enerjisi, enerji yoğunluğu  $E_T$  Eşitlik (5.20)’deki denklem şeklinde ifade edilmiştir. Eşitlik (5.20)’deki denklemde gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra toplam kesme enerjisi yani toplam enerji yoğunluğu  $E_T$ , Eşitlik (5.21)’deki gibi ifade edilmektedir.



$$E_T = (7409,51199245872 \cdot VB)^{1,69356670237445} \quad (5.20)$$

$$E_T = 3578877,39582158 \cdot VB^{1,69356670237445} \quad (5.21)$$

$f_1$  ilerlemesine karşılık harcanan kesme enerjileri Eşitlik (5.14)'de,  $f_2$  ilerlemesine karşılık harcanan kesme enerjileri Eşitlik (5.15)'de,  $f_3$  ilerlemesine karşılık harcanan kesme enerjileri Eşitlik (5.16)'de verilmiştir. Ayrıca bu eşitlikler kullanılarak Eşitlik (5.17)'deki toplam enerji  $E_T$  ifade edilmiştir. Eşitlik (5.17)'daki ifadeyi, Eşitlik (5.21)'de yerine yazdığımızda Eşitlik (5.22)'deki ifadeyi elde ederiz.

$$E_T = F_{c1} \cdot s_1 + F_{c2} \cdot s_2 + F_{c3} \cdot s_3 = 3578877,39582158 \cdot VB^{1,69356670237445} \quad (5.22)$$

Modelleme çalışmasının bu bölümünde  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  ilerlemelerine karşılık gelen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$  ve  $F_{c3}$  olmak üzere her bir kesme kuvvetini modellemek için Eşitlik (5.23)'de verilen kesme kuvveti denklemini temel alınarak doğrusal olmayan regresyon analizi uygulanmıştır.

$$F_s = k_{s1.1} \cdot k_\gamma \cdot k_\lambda \cdot k_{ty} \cdot k_{ks} \cdot (k_a) \cdot b \cdot h^{1-z_c} \quad (5.23)$$

Eşitlik (5.23)'deki  $k_{s1.1} \cdot k_\gamma \cdot k_\lambda \cdot k_{ty} \cdot k_{ks} \cdot (k_a)$  şeklinde ifade edilen  $k_s$  özgül kesme kuvvetidir.

Modelleme çalışmasında, Eşitlik (5.24) ile verilen talaş kalınlığı  $h$ , ilerleme  $f$ 'ye bağlı bir büyüklüktür. Eşitlik (5.25) ile verilen talaş genişliği  $b$ , kesme derinliği  $a_p$ 'ye bağlıdır. Çalışmada  $a_p = 0,8$  ve  $\chi = 93^\circ$  olarak alınmıştır.

$$h = f \cdot \sin\left(\frac{\chi}{180} \cdot \pi\right) \quad (5.24)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin\left(\frac{\chi}{180} \cdot \pi\right)} \quad (5.25)$$

Doğrusal olmayan regresyon yöntemi, Matlab fonksiyonu fitnlm(x,y,modelfun,m0, 'Options',opts) çağırılarak uygulanmıştır. Burada bağımsız değişken  $x=h$  talaş kalınlığı ve bağımlı değişken  $y=F_c$  her deneyde dinamometre aracılığı ile ölçülen teğetsel kesme

kuvvetidir. Model fonksiyonu  $modelfun = @(m,x) (m(1).*b*x.^{(1-1*m(2))})$  olarak belirlenmiştir. Fonksiyon, `opts='robust fit'` güçlü uyum seçeneği ile çağırılmıştır.  $m_0$  aranan model parametrelerinin başlangıç değerlerini içerir. Doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile belirlenmek istenen model parametrelerinden  $m_1 = k_s$  Eşitlik (5.23)'deki özgül kesme kuvvetidir. Diğer model parametresi  $m_2 = z_c$  Eşitlik (5.23)'de  $(1-z_c)$  üstel ifadesindeki  $z_c$ ' ye karşılık gelmektedir.

### 5.3.2.1 $F_{c1}$ Kuvvetinin Modellenmesi

İlk ilerleme değeri  $f_1$ 'e karşılık ölçülen  $F_{c1}$  kesme kuvveti değerleri ile elde edilen model katsayıları,  $m_{1,1}$  ve  $m_{1,2}$  Tablo 5.19'de verilmiştir.

**Tablo 5.19:**  $F_{c1}$  kesme kuvvetinin modellenmesi için model katsayıları.

	Tahmin	Standart Hata	T İstatistiği	p Değeri
$m_{1,1}$	1848,91823225697	140,4860393924	3,1608680852098	$2,41995437388843e^{-10}$
$m_{1,2}$	0,292495349457192	0,0332469619700502	8,79765645115724	$9,77582865220497e^{-08}$

Gözlem Sayısı	: 19
Hata serbestlik dereceleri	: 17
Kare Ortalamaların Karekökü Hatası	: 10,5
R-Kare	: 0,989
Düzeltilmiş R-Kare	: 0,988
F-İstatistiğine karşı sıfır modeli	: 8,39e+03
p-değeri	: 3,5e-26

$F_{c1}$  kesme kuvvetinin hesaplanması için, doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile tahmin edilecek parametreler ile modelin matematiksel olarak ifadesi Eşitlik (5.26)'da verilmiştir.

$$F_{c1} = m_{1,1} \cdot b_1 \cdot h_1^{(1-m_{1,2})} \quad (5.26)$$

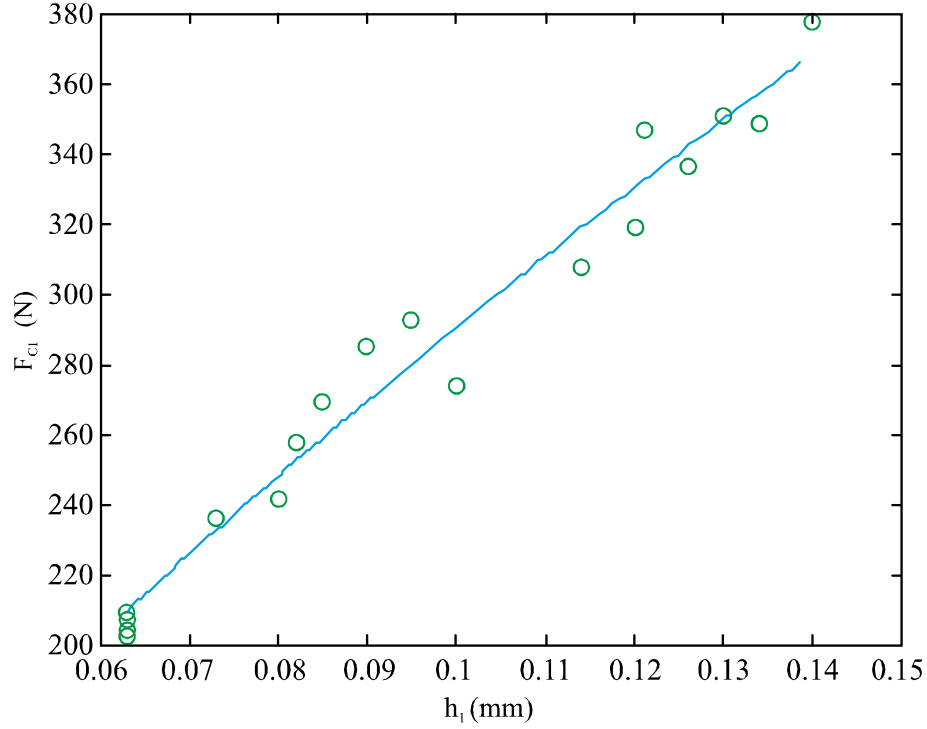
Tahmin edilen model parametreleri yerine konarak, birinci ilerleme değerine karşılık gelen kesme kuvveti Eşitlik (5.27)'de görülmektedir.

$$F_{c1} = 1848,91823225697 \cdot b_1 \cdot h_1^{(1-0,292495349457192)} \quad (5.27)$$

Eşitlik (5.27) gerekli sadeleştirmeler yapılnca, Eşitlik (5.28)'de verildiği gibi ifade edilir.

$$F_{c1} = 1848,91823225697 \cdot b_1 \cdot h_1^{0,707504650542808} \quad (5.28)$$

Deneysel olarak kullanılan  $f$  çalışma aralığına karşılık  $h$  değerleri için  $F_{c1}$  kuvvetinin Eşitlik (5.28)'den elde edilen modelinin grafiği, Şekil 5.16'da sürekli olarak çizilmiştir. Noktalar deneyde ölçülen birinci ilerlemeye ait değerlerdir.



**Şekil 5.16:** Birinci ilerleme değerlerine karşılık ölçülen kesme kuvveti ve kesme kuvvetinin modeli.

### 5.3.2.2 $F_{c2}$ Kuvvetinin Modellenmesi

İkinci ilerleme değeri  $f_2$ 'ye karşılık ölçülen  $F_{c2}$  kesme kuvveti değerleri ile elde edilen model katsayıları,  $m_{2,1}$  ve  $m_{2,2}$  Tablo 5.20'de verilmiştir.

**Tablo 5.20:**  $F_{c2}$  kesme kuvvetinin modellenmesi için model katsayıları.

	Tahmin	Standart Hata	T İstatistiği	p Değeri
$m_{2,1}$	1898,0189017715	192,030344986032	9,73191583036699	2,30243725250527e-08
$m_{2,2}$	0,279975449933229	0,0485508617721633	5,76664223278018	2,27926390070367e-05

Gözlem Sayısı	: 19
Hata serbestlik dereceleri	: 17
Kare Ortalamaların Karekökü Hatası	: 10,4
R-Kare	: 0,989

Düzeltilmiş R-Kare	: 0,988
F-İstatistiğine karşı sıfır modeli	: 1,09e+04
p-değeri	: 3,67e-27

$F_{c2}$  kesme kuvvetinin hesaplanması için, doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile tahmin edilecek parametreler ile modelin matematiksel olarak ifadesi Eşitlik (5.29)'da verilmiştir.

$$F_{c2} = m_{2,1} \cdot b_2 \cdot h_2^{(1-m_{2,2})} \quad (5.29)$$

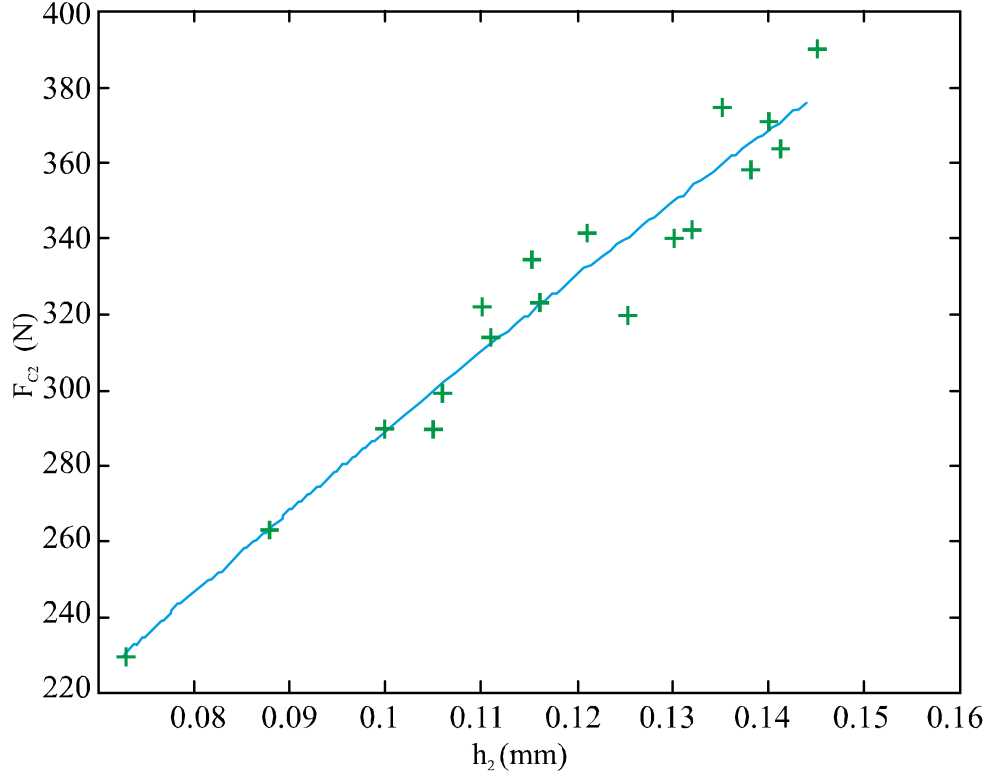
Tahmin edilen model parametreleri yerine konarak, birinci ilerleme değerine karşılık gelen kesme kuvveti Eşitlik (5.30)'da görülmektedir.

$$F_{c2} = 1898,0189017715 \cdot b_2 \cdot h_2^{(1-0,279975449933229)} \quad (5.30)$$

Eşitlik (5.30)'da gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra Eşitlik (5.31)'de verildiği gibi ifade edilir.

$$F_{c2} = 1898,0189017715 \cdot b_2 \cdot h_2^{0,720024550066771} \quad (5.31)$$

Deneyleerde kullanılan  $f$  çalışma aralığına karşılık  $h$  değerleri için  $F_{c2}$  kuvvetinin Eşitlik (5.31)'de elde edilen modelinin grafiği, Şekil 5.17'de sürekli olarak çizilmiştir. Noktalar deneyde ölçülen ikinci ilerlemeye ait değerlerdir.



**Şekil 5.17:** İkinci ilerleme değerlerine karşılık ölçülen kesme kuvveti ve kesme kuvvetinin modeli.

### 5.3.2.3 $F_{c3}$ Kuvvetinin Modellenmesi

Üçüncü ve nihai ilerleme değeri  $f_3$  'e karşılık ölçülen  $F_{c3}$  kesme kuvveti değerleri ile elde edilen model katsayıları,  $m_{3,1}$  ve  $m_{3,2}$  Tablo 5.21'de verilmiştir.

**Tablo 5.21:**  $F_{c3}$  kesme kuvvetinin modellenmesi için model katsayıları.

	Tahmin	Standart Hata	T İstatistiği	p Değeri
$m_{3,1}$	2246,03736129709	388,369307952399	5,78325144471093	2,20479548844841e-05
$m_{3,2}$	0,199813745776403	0,0884569885104329	2,25888026645669	0,0373199074004111

Gözlem Sayısı	: 19
Hata serbestlik dereceleri	: 17
Kare Ortalamaların Karekökü Hatası	: 14,9
R-Kare	: 0,983
Düzeltilmiş R-Kare	: 0,982
F-İstatistiğine karşı sıfır modeli	: 7,53e+03
p-değeri	: 8,81e-26

$F_{c3}$  kesme kuvvetinin hesaplanması için, doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile tahmin edilecek parametreler ile modelin matematiksel olarak ifadesi Eşitlik (5.32)'de verilmiştir.

$$F_{c3} = m_{3,1} \cdot b_3 \cdot h_3^{(1-m_{3,2})} \quad (5.32)$$

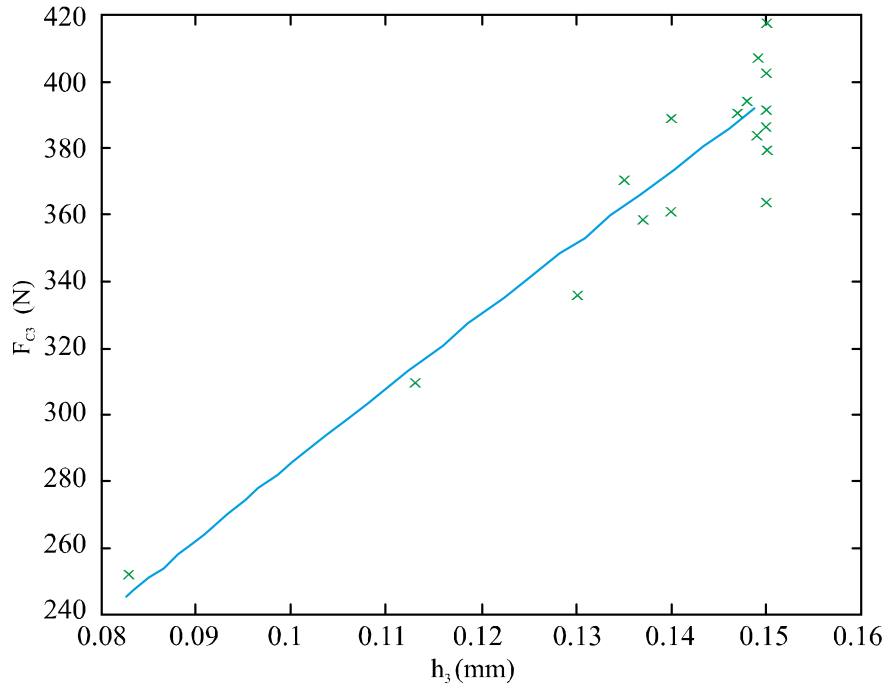
Tahmin edilen model parametreleri yerine konarak, birinci ilerleme değerine karşılık gelen kesme kuvveti Eşitlik (5.33)'de görülmektedir.

$$F_{c3} = 2246,03736129709 \cdot b_3 \cdot h_3^{(1-0,199813745776403)} \quad (5.33)$$

Eşitlik (5.33) gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra Eşitlik (5.34)'de verildiği gibi ifade edilir.

$$F_{c3} = 2246,03736129709 \cdot b_3 \cdot h_3^{0,800186254223597} \quad (5.34)$$

Deneysel olarak kullanılan  $f$  çalışma aralığına karşılık  $h$  değerleri için  $F_{c3}$  kuvvetinin Eşitlik (5.34)'de elde edilen modelinin grafiği, Şekil 5.18'de sürekli olarak çizilmiştir. Noktalar deneyde ölçülen üçüncü ilerlemeye ait değerlerdir.



**Şekil 5.18:** Üçüncü ilerleme değerine karşılık ölçülen kesme kuvveti ve kesme kuvvetinin modeli.

Eşitlik (5.22)'de ifade edilen toplam enerji  $E_T$  denklemi Eşitlik (5.35)'de bir daha yazılmıştır. Eşitlik (5.35)'de toplam enerji  $E_T$  yerine,  $f_1$  birinci,  $f_2$  ikinci ve  $f_3$  nihai ilerleme değerleri için modellenen ve Eşitli (5.28), Eşitlik (5.31) ve Eşitlik (5.34)'de ifade edilen kesme kuvveti bağıntılarını, ilerlemenin her bir kademesi için kesici şekillenmemiş talaş uzunlukları ( $S_i$ ) ile yani  $s_1$ ,  $s_2$  ve  $s_3$  ile çarpılarak yerine koyularak serbest yüzey aşınma (VB) modeli Eşitlik (5.36)'de verildiği şekilde ifade edilir.

$$E_T = F_{c1} \cdot s_1 + F_{c2} \cdot s_2 + F_{c3} \cdot s_3 = 3578877,39582158 \cdot VB^{1,69356670237445} \quad (5.35)$$

$$\begin{aligned} 3578877,39582158 \cdot VB^{1,69356670237445} &= 1848,91823225697 \cdot b_1 \cdot h_1^{0,707504650542808} \cdot s_1 \\ &+ 1898,0189017715 \cdot b_2 \cdot h_2^{0,720024550066771} \cdot s_2 \\ &+ 2246,03736129709 \cdot b_3 \cdot h_3^{0,800186254223597} \cdot s_3 \end{aligned} \quad (5.36)$$

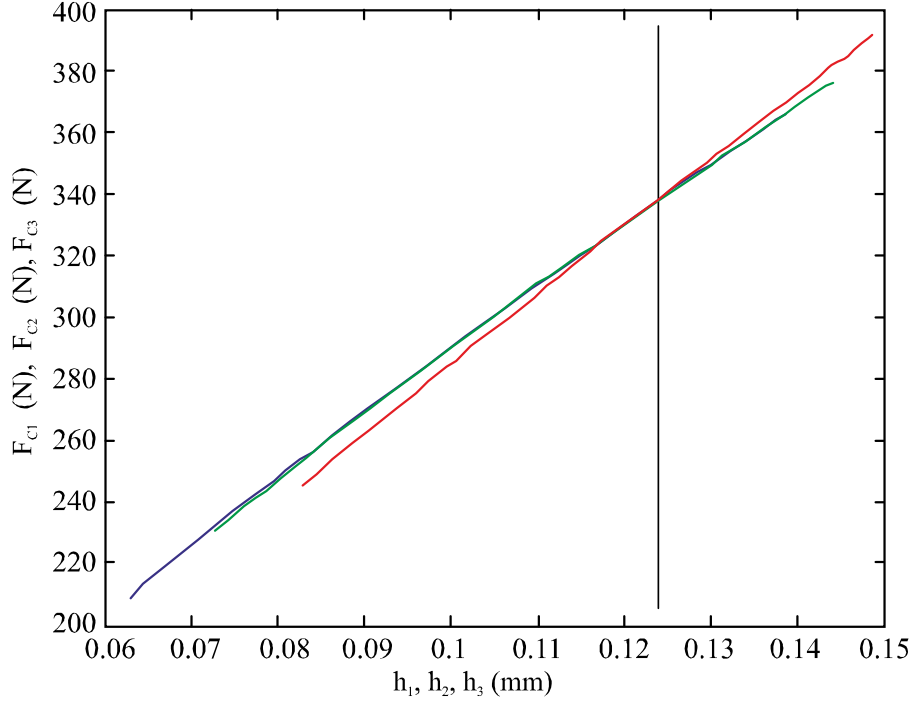
Talaş kalınlığı  $h$  ile ilerleme  $f$  arasında Eşitlik (5.37)'de verilen bağıntı ve talaş genişliği  $b$  ile kesme derinliği  $a_p$  arasında Eşitlik (5.38)'de verilen bağıntı göz önüne alınırsa serbest yüzey aşınması modelinin ilerleme değeri ile ilişkisi görülmektedir. İlerleme değeri ile kesme kuvveti arasında bir bağıntı vardır ve ilerlemenin serbest yüzey aşınması üzerindeki etkisini belirlemek mümkün olabilir.

$$h_i = f_i \cdot \sin \alpha_i \quad (5.37)$$

$$b_i = \frac{a_p(i)}{\sin \alpha_i} \quad (5.38)$$

Her bir ilerlemenin aşınmaya etkisini ayrı ayrı incelemek ve karşılaştırmak için;  $f_1$  birinci,  $f_2$  ikinci ve  $f_3$  nihai ilerlemeler de kullanılan ilerlemenin sayısal değerleri kullanılarak, birim tornalama yolu  $S_i = 1$  için, kesme kuvvetleri aynı grafik üzerine Şekil 5.19 çizilmiştir.

Şekil 5.19'da ilerlemeye göre modellenen kesme kuvvetlerinin grafiği görülmektedir. Mavi çizgi birinci  $f_1$  ilerlemeden doğan kesme kuvveti  $F_{c1}$ , yeşil çizgi ikinci  $f_2$  ilerlemeden doğan kesme kuvveti  $F_{c2}$  ve kırmızı çizgi nihai  $f_3$  ilerlemeden doğan kesme kuvvetini ifade etmektedir. Çalışma alanı  $f_1$  birinci ilerleme için  $h_1$  değeri 0,0629 – 0,139 mm,  $f_2$  ikinci ilerleme için  $h_2$  değeri 0,072 - 0,144 mm,  $f_3$  nihai ilerleme için  $h_3$  değeri 0,0828 – 0,149 mm aralığıdır.



**Şekil 5.19:** Her bir ilerlemenin çalışma aralığında, h talaş kalınlığına göre kuvvetin grafiği.

Düşey çizginin solunda, aynı talaş kalınlığı ( $h_1 = h_2 = h_3$ ) için birinci ilerlemeden doğan kesme kuvveti en fazla, ikinci ilerlemeden doğan kesme kuvveti ufak farkla daha az ve üçüncü ilerlemeden kaynaklanan kesme kuvvetinin en az olduğu görülmektedir ( $F_{c1} > F_{c2} > F_{c3}$ ). Eşitlik 5.36'ya göre ilerlemelerin serbest yüzey aşınmasına etkisi de bu sırada olacaktır.

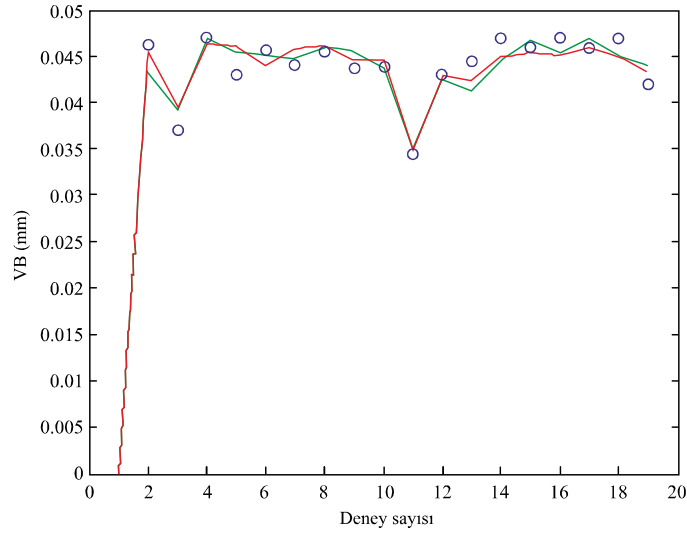
Talaş kalınlığı  $h = 0,1249$  mm olduğunda  $f_1$  birinci,  $f_2$  ikinci ve  $f_3$  nihai ilerleme değerlerinden doğan kesme kuvvetleri eşit olmaktadır ( $F_{c1} = F_{c2} = F_{c3}$ ). Eşitlik 5.36'ya göre serbest yüzey aşınmasına etkileri de aynı olacaktır.

Düşey çizginin sağında, talaş kalınlığı  $h = 0,1249$  mm değerinin üzerine çıktığında, aynı talaş kalınlığı için  $f_1$  birinci ve  $f_2$  ikinci ilerlemeden doğan kuvvetlerin arasındaki fark azalırken,  $f_3$  nihai ilerlemeden doğan kesme kuvveti,  $f_1$  birinci ve  $f_2$  ikinci ilerlemeden doğan kesme kuvvetinden büyük olmaktadır ( $F_{c1} < F_{c2} < F_{c3}$ ,  $F_{c1} \approx F_{c2}$ ).

Şekil 5.19'da talaş kalınlığı  $h = 0,1249$  mm ( $f = 0,1251$  mm/dev) değeri ve bu değer sol tarafı  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulu için TNGA 160404T01020 takımlar ile DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin işlenmesinde çalışma bölgesi olarak önerilmiştir.

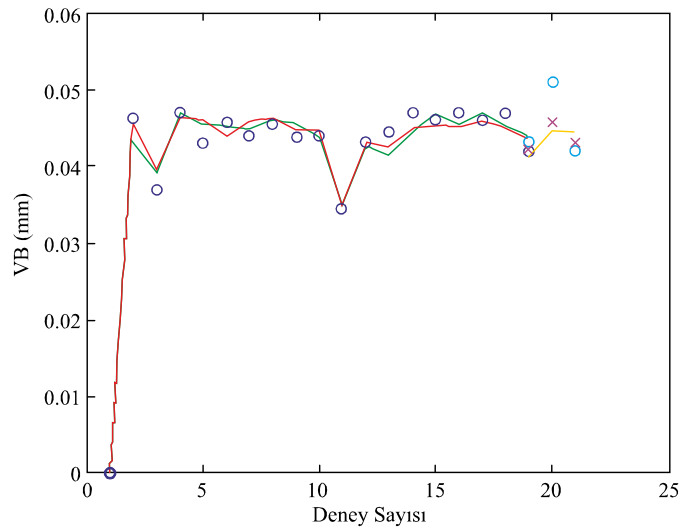


Şekil 5.20’de 18 adet değişken ilerleme deneylerinde ölçülen aşınma değerleri, turkuaz daireler ile gösterilmiştir. Geliştirilen modellerden hesaplanan aşınma değerleri sürekli çizgi ile çizilmiştir. Ölçülen kuvvetten belirlenen aşınma modelinden elde edilen aşınma değerleri yeşil doğrular ile gösterilmiştir. İlerlemeye bağlı olarak belirlenen aşınma modelinden elde edilen aşınma değerleri kırmızı doğrular ile gösterilmiştir. Yatay eksende deney numaraları verilmiştir, deneylere ait  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  değerleri Tablo 5.12’de verilmiştir.



**Şekil 5.20:** Ölçülen, kuvvet ve ilerlemeye bağlı aşınma değeri.

Şekil 5.21’de yapılan 18 deneye ilaveten yapılan 3 adet doğrulama deneyi için deney den ölçülen aşınma değeri ve modellerden tahmin edilen aşınma değerleri de yer almaktadır. Doğrulama deneylerinde, ölçülen VB değerleri turkuaz daireler, ölçülen kuvvetten hesaplanan aşınma x ve ilerlemeden hesaplanan aşınma sarı çizgi ile gösterilmiştir.



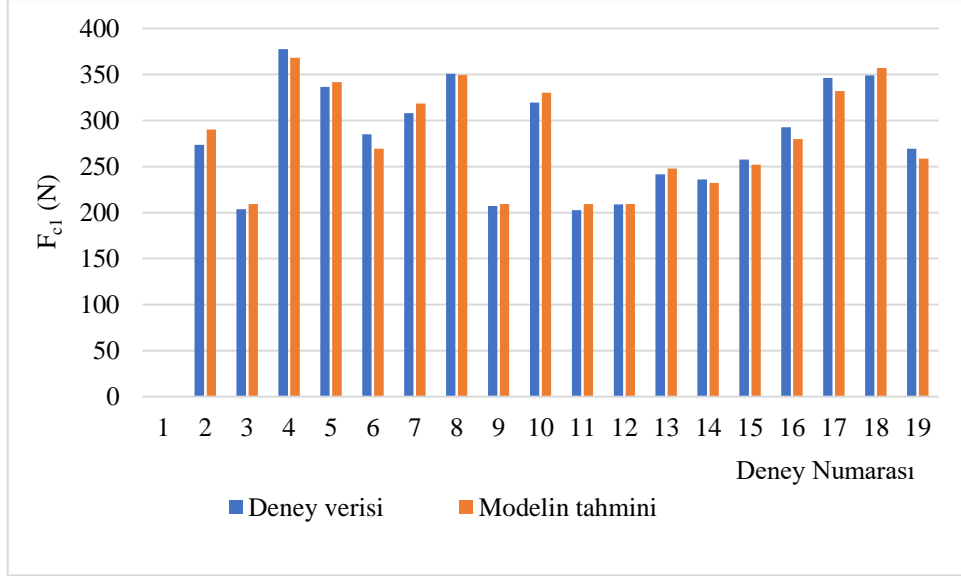
**Şekil 5.21:** 3 doğrulama deneyi için ölçülen, kuvvet ve ilerlemeye bağlı aşınma değeri.

Tablo 5.12’de verilen değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde ölçülen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c3}$  değerleri ile Eşitlik (5.28), Eşitlik (5.31) ve Eşitlik (5.34)’de verilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c3}$  değerleri ve hata oranları Tablo 5.22’de verilmiştir.

**Tablo 5.22:** Deney verileri, model tahmini  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c3}$  ve hata oranı.

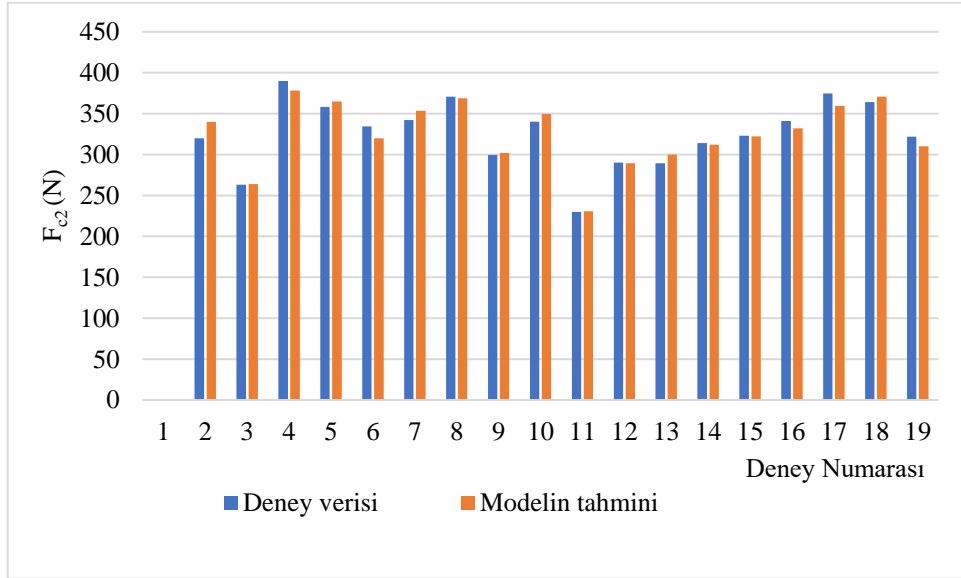
Deney Numarası	Deney verileri			Model tahmini			Hata (%) $F_{c1}$	Hata (%) $F_{c2}$	Hata (%) $F_{c3}$
	$F_{c1}$ (N)	$F_{c2}$ (N)	$F_{c3}$ (N)	$F_{c1}$ (N)	$F_{c2}$ (N)	$F_{c3}$ (N)			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	273,73	319,95	363,17	290,19	339,87	393,86	6,01	6,23	8,45
3	203,81	263,28	309,39	209,27	263,97	313,99	2,68	0,26	1,49
4	377,53	390,07	402,39	368,18	378,20	393,86	2,48	3,04	2,12
5	336,48	358,25	385,83	341,74	364,96	393,86	1,56	1,87	2,08
6	285,15	334,25	388,89	269,34	320,06	372,71	5,54	4,24	4,16
7	307,87	342,19	378,98	318,37	353,47	393,86	3,41	3,30	3,93
8	350,79	370,71	391,15	349,38	368,76	393,86	0,40	0,52	0,69
9	207,17	299,41	406,95	209,27	301,82	391,76	1,01	0,81	3,73
10	319,36	340,06	360,90	330,14	349,60	372,71	3,38	2,81	3,27
11	202,52	229,98	251,71	209,27	230,74	245,29	3,33	0,33	2,55
12	208,96	289,98	358,12	209,27	289,42	366,30	0,15	0,19	2,29
13	241,54	289,49	335,38	247,81	299,77	351,25	2,59	3,55	4,73
14	235,97	313,98	383,42	232,26	312,01	391,76	1,57	0,63	2,18
15	257,68	322,91	417,35	252,17	322,07	393,86	2,14	0,26	5,63
16	292,61	341,13	390,28	279,84	332,00	387,55	4,36	2,68	0,70
17	346,39	374,65	406,43	332,08	359,23	391,76	4,13	4,12	3,61
18	348,88	364,07	394,03	356,95	370,66	389,66	2,31	1,81	1,11
19	269,37	321,68	370,45	258,67	309,98	362,02	3,97	3,64	2,28

Deney verileri ile  $F_{c1}$  kesme kuvveti modelin tahmini arasında, en yüksek % 6,01 hata oranı görülmektedir. Karşılaştırmalar modelin tahminin deney verilerinin uyumlu olduğunu göstermiştir. Şekil 5.22’de deney verileri ile modelden tahmin edilen  $F_{c1}$  değerlerinin karşılaştırılmalı grafiği verilmiştir.



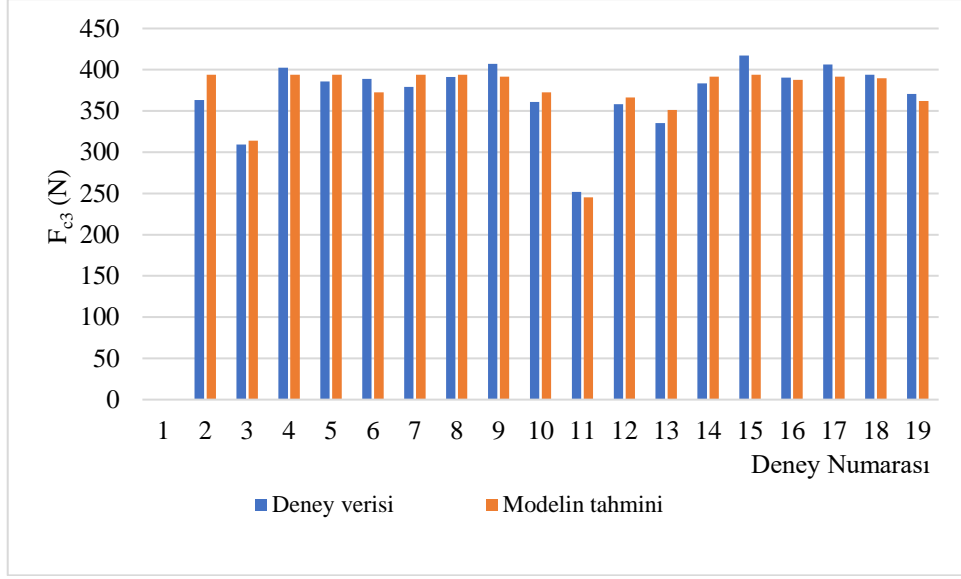
**Şekil 5.22:** Deney verileri, modelden tahmin edilen  $F_{c1}$ .

Deney verileri ile  $F_{c2}$  kesme kuvveti modelin tahmini arasında, en yüksek % 6,23 hata oranı görülmektedir. Karşılaştırmalar modelin tahminin deney verilerinin uyumlu olduğunu göstermiştir. Şekil 5.23’de deney verileri ile modelden tahmin edilen  $F_{c2}$  değerlerinin karşılaştırılmalı grafiği verilmiştir.



**Şekil 5.23:** Deney verileri, modelden tahmin edilen  $F_{c2}$ .

Deney verileri ile  $F_{c3}$  kesme kuvveti modelin tahmini arasında, en yüksek % 8,45 hata oranı görülmektedir. Karşılaştırmalar modelin tahminin deney verilerinin uyumlu olduğunu göstermiştir. Şekil 5.24’de deney verileri ile modelden tahmin edilen  $F_{c3}$  değerlerinin karşılaştırılmalı grafiği verilmiştir.



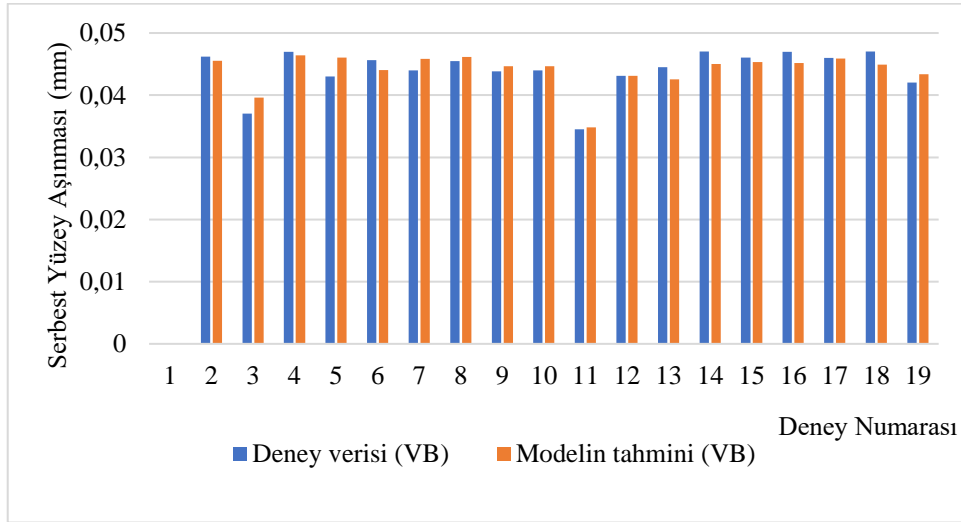
**Şekil 5.24:** Deney verileri, modelden tahmin edilen  $F_{c3}$ .

Tablo 5.12’de verilen değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde ölçülen serbest yüzey aşınma değeri ile kuvvete yani ilerlemeye bağlı Eşitlik (5.36)’da verilen serbest yüzey aşınma modelinden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değerleri ve hata oranları Tablo 5.23’de verilmiştir.

**Tablo 5.23:** Deney verileri, modelin tahmini VB ve hata oranı.

Deney Numarası	Deney verileri VB (mm)	Model tahmini VB (mm)	Hata (%)
1	0	0	0
2	0,046222	0,045525	1,51
3	0,037014	0,039610	7,01
4	0,047000	0,046396	1,29
5	0,043000	0,046054	7,10
6	0,045655	0,044018	3,59
7	0,044011	0,045847	4,17
8	0,045487	0,046157	1,47
9	0,043818	0,044640	1,88
10	0,044000	0,044678	1,54
11	0,034500	0,034841	0,99
12	0,043105	0,043104	0,00
13	0,044516	0,042526	4,47
14	0,047011	0,045026	4,22
15	0,046043	0,045337	1,53
16	0,047000	0,045154	3,93
17	0,046000	0,045909	0,20
18	0,047011	0,044937	4,41
19	0,042048	0,043353	3,10

Deney verileri ile  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$  ve  $F_{c3}$  kesme kuvvetlerine bağlı serbest yüzey aşınma modelin tahmini arasında, en yüksek % 7,10 hata oranı görülmektedir. Karşılaştırmalar modelin tahminin deney verilerinin uyumlu olduğunu göstermiştir. Şekil 5.25’de deney verileri ile modelden tahmin edilen VB değerlerinin karşılaştırılmalı grafiği verilmiştir.



**Şekil 5.25:** Deney verileri, modelden tahmin edilen serbest yüzey aşınma değeri.

Tablo 5.13’de deney verileri verilen üç adet değişken ilerlemeli doğrulama deneyleri için  $F_{c1}$  kesme kuvveti için, Eşitlik (5.28)’deki,  $F_{c2}$  kesme kuvveti için Eşitlik (5.31)’de ve  $F_{c3}$  kesme kuvveti için Eşitlik (5.34)’de verilen matematiksel ifadelerin doğrulaması yapılmıştır.

Doğrulama deneylerinde her bir deney için hesaplanarak kayıt altına alınan şekillenmemiş talaş uzunluğu ve milimetre olarak ve  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  değerleri Tablo 5.24’de verilmiştir.  $b$  değeri Eşitlik (5.38)’den hesaplanarak üç deneyde de her üç ilerleme için 0,801097877 değerindedir.

**Tablo 5.24:** Model parametreleri.

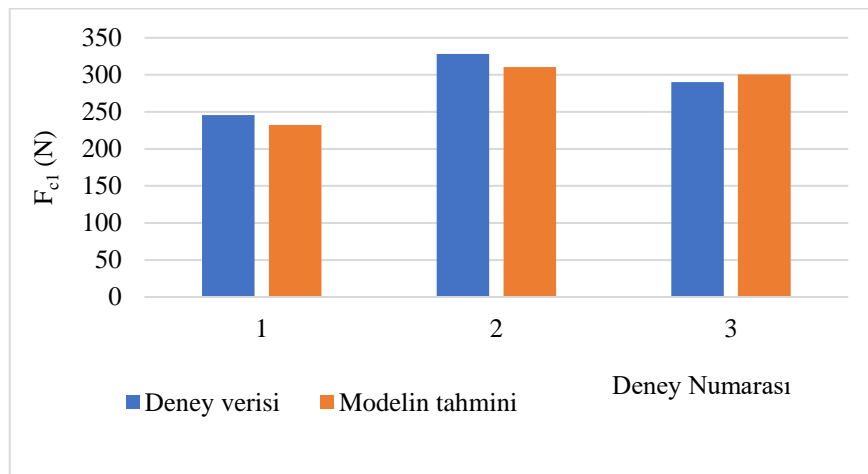
Deney Numarası	$s_1$ (m)	$s_2$ (m)	$s_3$ (m)	$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)	$h_3$ (mm)
1	4,78779	4,78779	40,94920	0,07290	0,09787	0,12283
2	4,66212	4,66212	41,22649	0,10985	0,12483	0,13981
3	4,53018	4,53018	41,49965	0,10486	0,12083	0,13981

Tablo 5.25’de doğrulama deneylerinde ölçülen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$  ve  $F_{c3}$  ve Eşitlik (5.28), (5.31) ve (5.34)’de verilen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c3}$  için matematiksel denklemden tahmin edilen değerler ve hata oranları verilmiştir.

**Tablo 5.25:** Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c3}$  ve hata oranı.

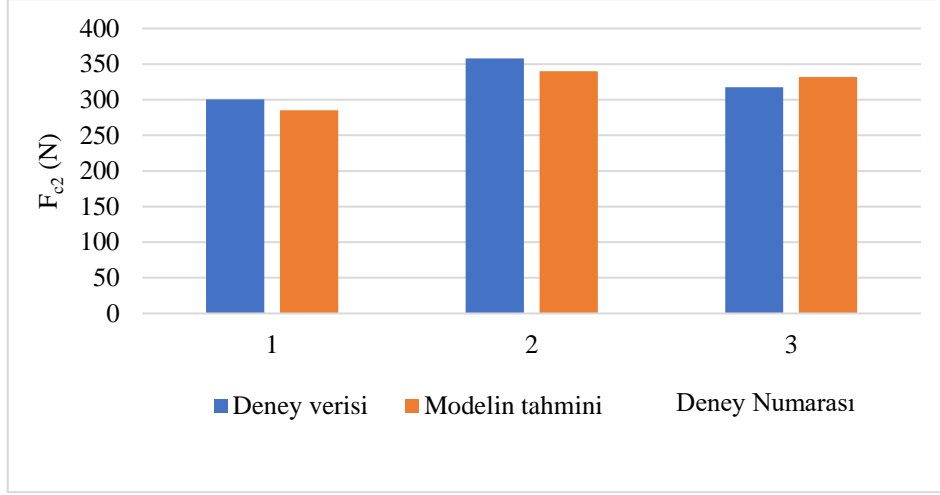
Deney Numarası	Deney verileri			Model tahmini			Hata (%) $F_{c1}$	Hata (%) $F_{c2}$	Hata (%) $F_{c3}$
	$F_{c1}$ (N)	$F_{c2}$ (N)	$F_{c3}$ (N)	$F_{c1}$ (N)	$F_{c2}$ (N)	$F_{c3}$ (N)			
1	245,77	300,32	345,27	232,26	285,24	336,06	5,50	5,02	2,68
2	328,12	358,00	387,89	310,43	339,87	372,71	5,39	5,06	3,91
3	290,29	317,34	353,97	300,38	332,00	372,71	3,48	4,62	5,03

Doğrulama deneylerinde ölçülen  $F_{c1}$ , ile modelden tahmin edilen  $F_{c1}$  değerlerin karşılaştırılma grafiği Şekil 5.26’da verilmiştir.  $F_{c1}$  için hata oranı, en yüksek % 5,50 olarak bulunmuştur.



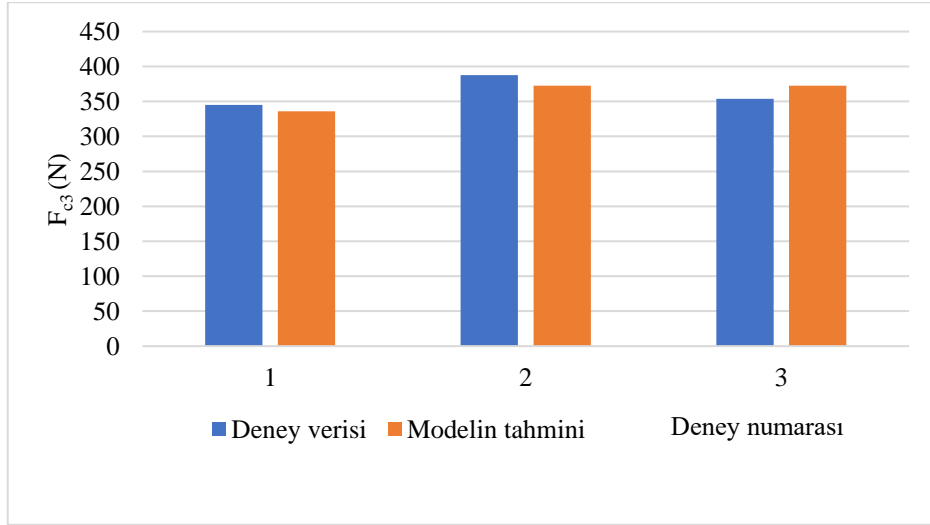
**Şekil 5.26:** Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen  $F_{c1}$ .

Doğrulama deneylerinde ölçülen  $F_{c2}$ , ile modelden tahmin edilen  $F_{c2}$  değerlerin karşılaştırılma grafiği Şekil 5.27’de verilmiştir.  $F_{c2}$  için hata oranı, en yüksek % 5,06 olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.27:** Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen  $F_{c2}$ .

Doğrulama deneylerinde ölçülen  $F_{c3}$ , ile modelden tahmin edilen  $F_{c3}$  değerlerin karşılaştırılma grafiği Şekil 5.28’de verilmiştir.  $F_{c3}$  için hata oranı, en yüksek % 5,03, olarak bulunmuştur.



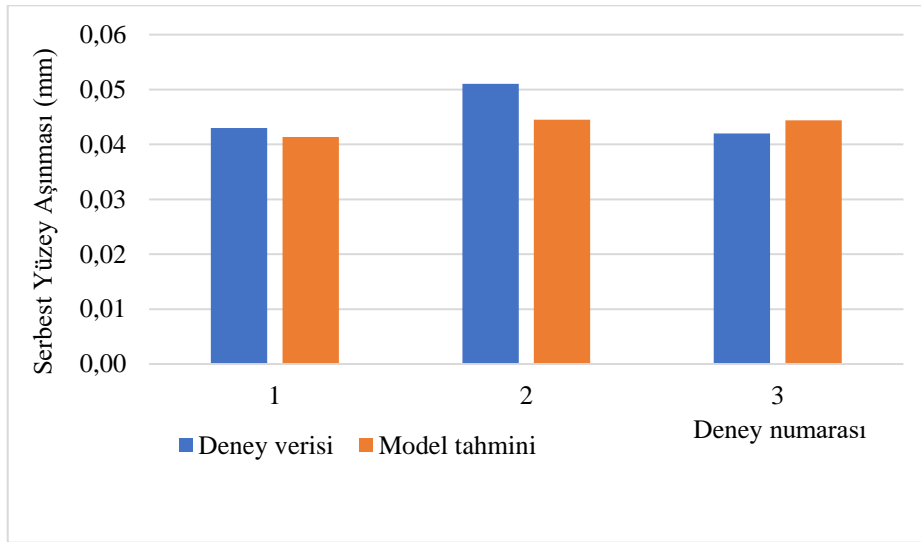
**Şekil 5.28:** Doğrulama deney verileri, modelden tahmin edilen  $F_{c3}$ .

Tablo 5.26’da doğrulama deneylerinde ölçülen serbest yüzey aşınma (VB) deney verileri ile  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$  ve  $F_{c3}$  kesme kuvvetlerine yani ilerlemeye bağlı Eşitlik (5.36)’da verilen serbest yüzey aşınma (VB) değerleri ve hata oranları verilmiştir.

**Tablo 5.26:** Doğrulama deney verileri, modelden tahmini (VB) ve hata oranı.

Deney Numarası	Deney verileri VB (mm)	Model tahmini VB (mm)	Hata (%)
1	0,043012	0,041343	3,88
2	0,051024	0,044506	12,77
3	0,042012	0,044413	5,71

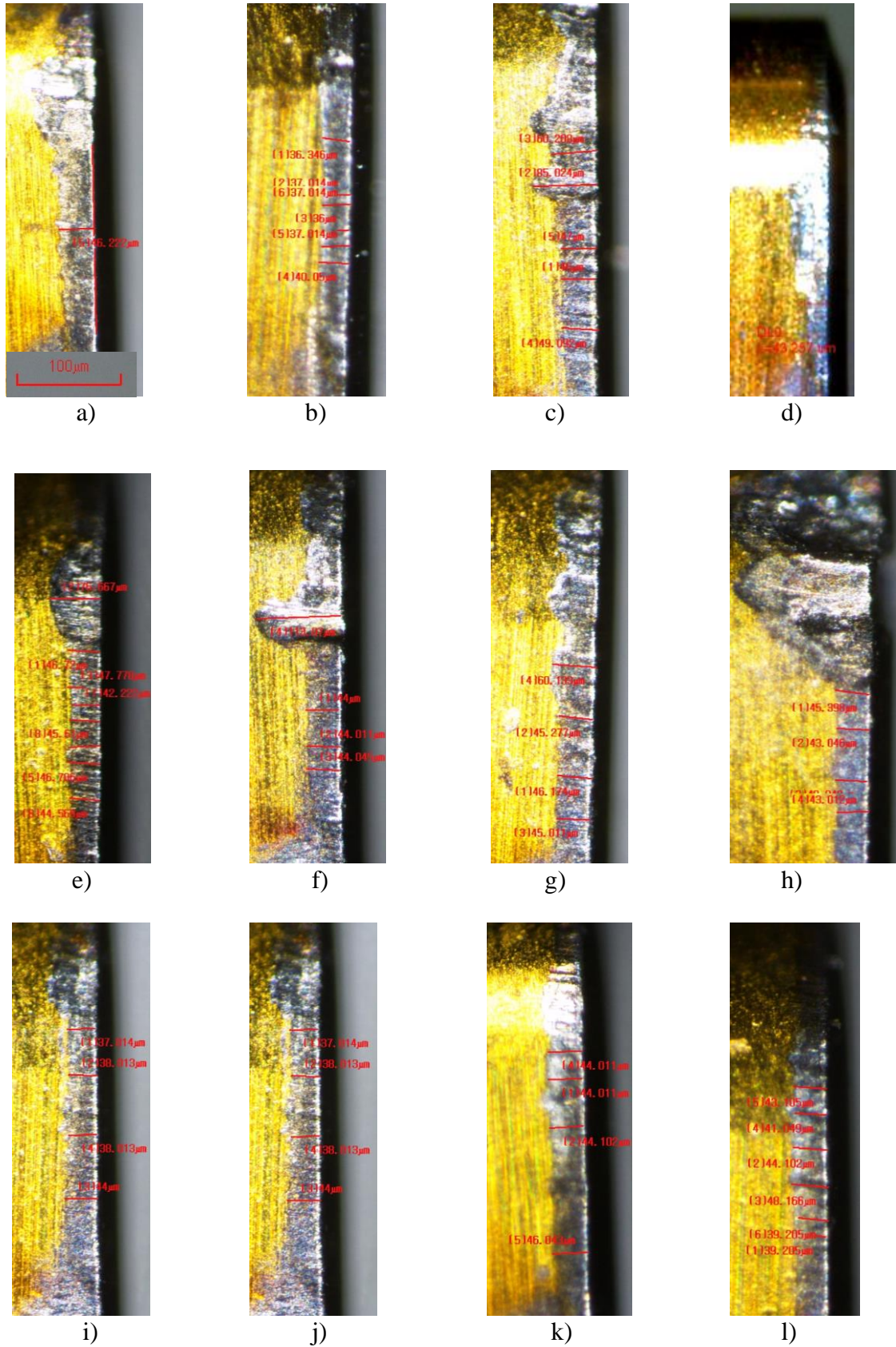
Deney verileri ile modelin tahmini arasında, en yüksek % 12,77 hata oranı görülmektedir. Bu oran kabul edilebilir bir seviyededir. Doğrulama deneylerinde ölçülen serbest yüzey aşınma (VB) değeri ile modelden elde edilen serbest yüzey aşınma (VB) değerlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 5.29’da verilmiştir.



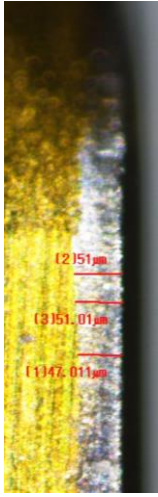
**Şekil 5.29:** Deneylerden ölçülen VB, modelden tahmin edilen VB.

Tablo 5.12’de verilen kuru işleme şartlarında gerçekleştirilen, 18 adet değişken ilerleme tornalama deneyi için kesici takımında gözlenen serbest yüzey aşınma görüntüleri Şekil 5.30’da kesme kuvvetinin zaman göre değişimi grafikleri Şekil 5.31’de verilmiştir. Kuvvet zaman grafiklerinde x eksenini saniye cinsinden tornalama süresini, y eksenini Newton cinsinden kesme kuvvetini göstermektedir.

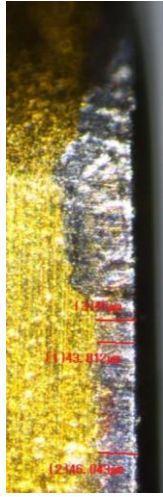




Şekil 5.30: Değişken ilerlemeli tornalama deneyleri aşınma görüntüleri.



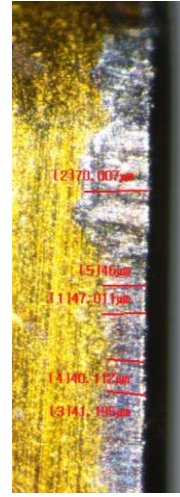
m)



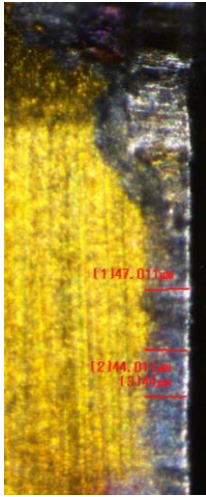
n)



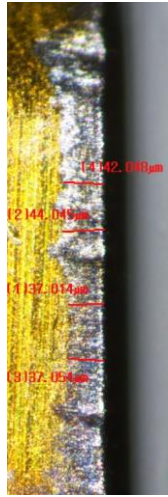
o)



ö)

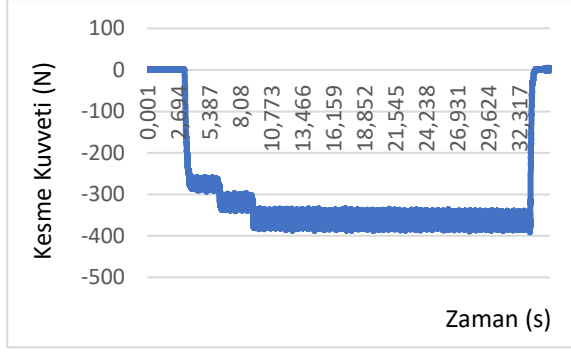


p)

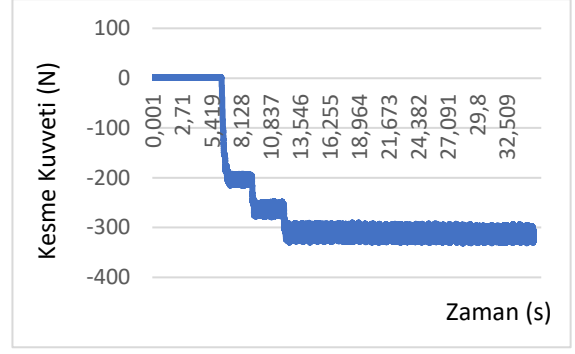


r)

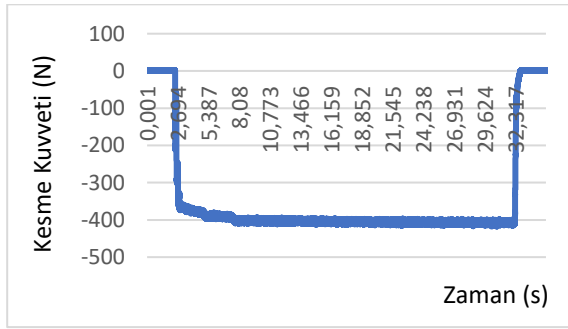
Şekil 5.30: (devam).



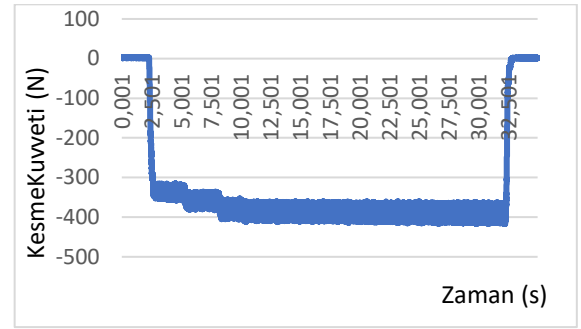
a)



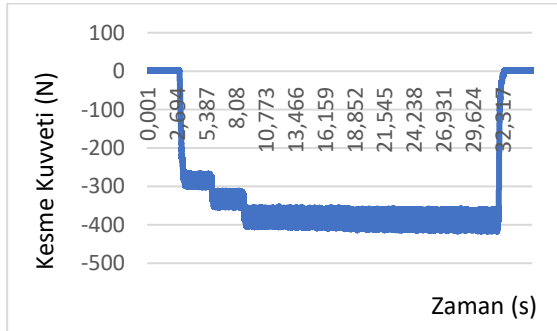
b)



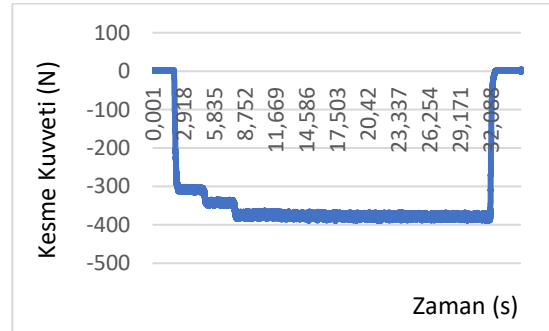
c)



d)

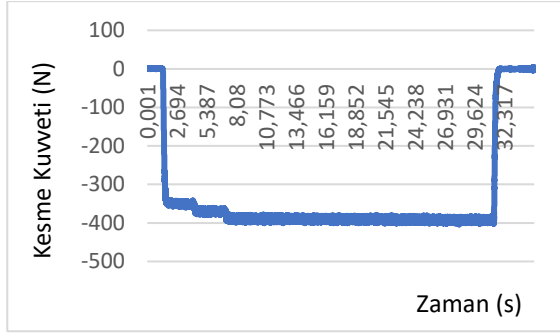


e)

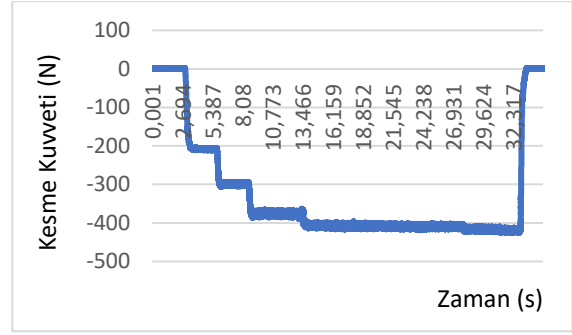


f)

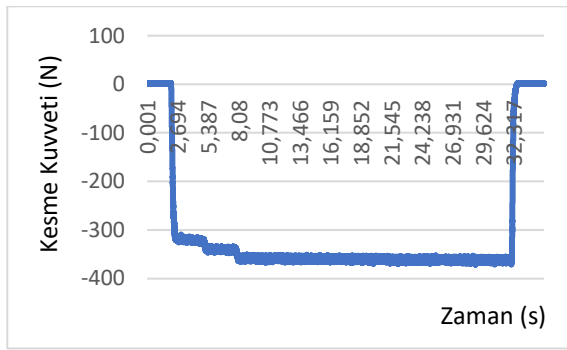
Şekil 5.31: Değişken ilerlemeli tornalama deneyleri, kuvvet-zaman grafikleri.



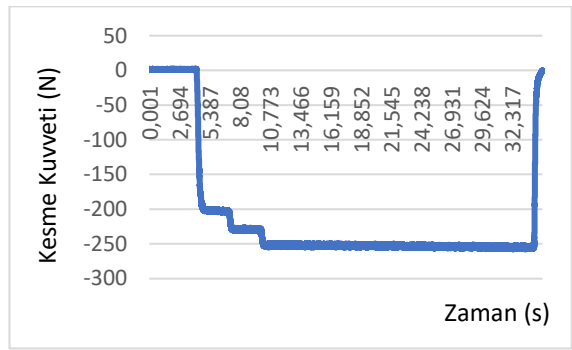
g)



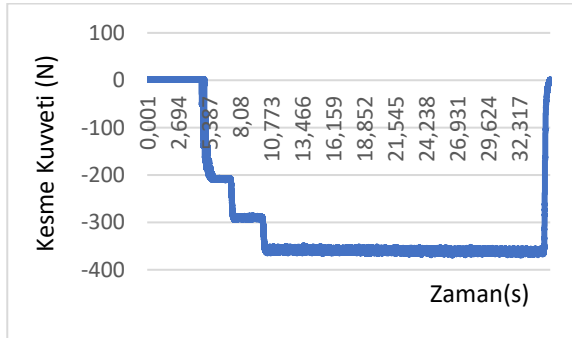
h)



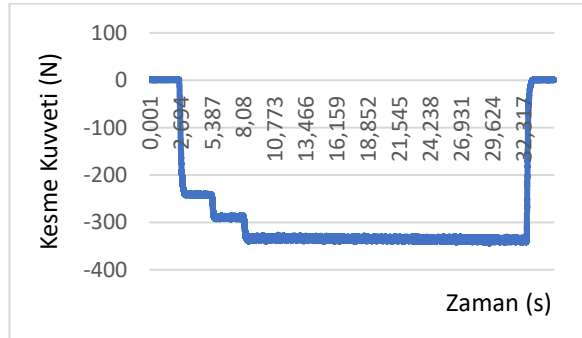
i)



j)

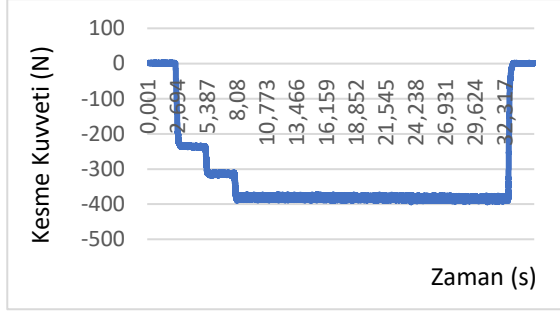


k)

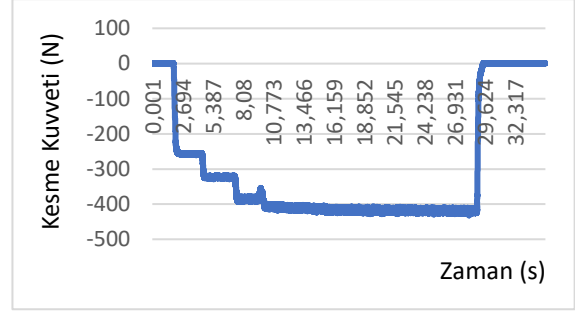


l)

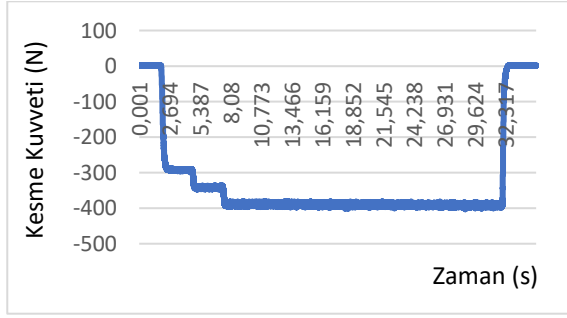
Şekil 5.31: (devam).



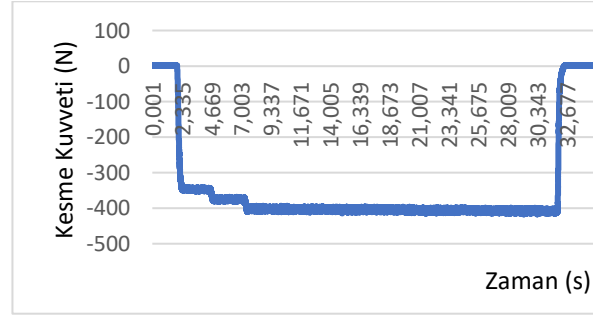
m)



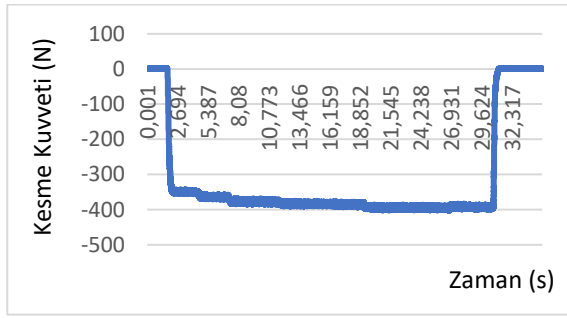
n)



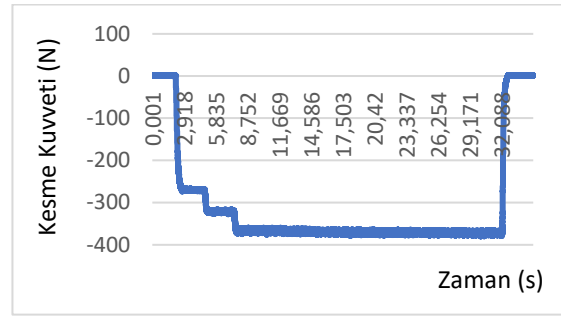
o)



ö)



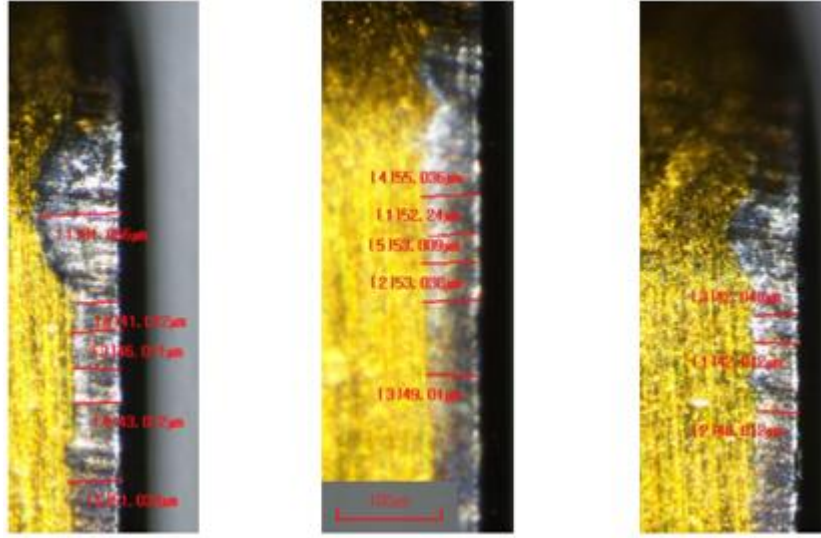
p)



r)

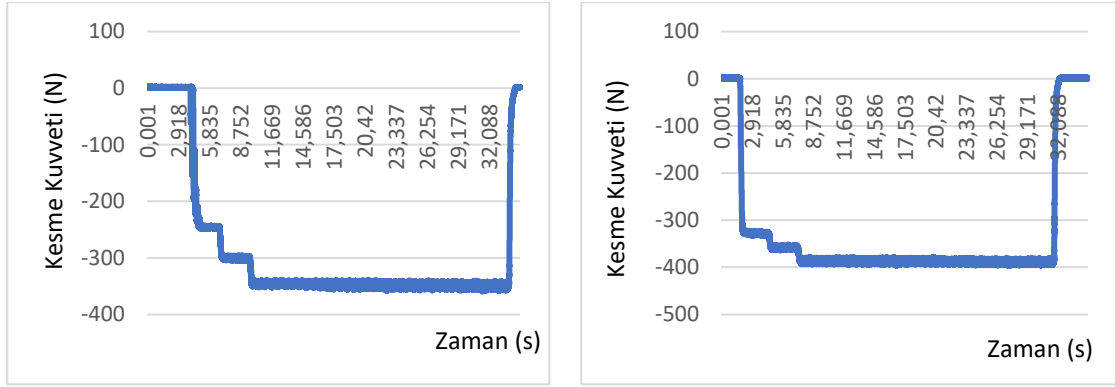
Şekil 5.31: (devam).

Tablo 5.13’de verile kuru işleme şartlarında gerçekleştirilen, doğrulama deneyleri için kesici takımında gözlenen serbest yüzey aşınma (VB) görüntüleri Şekil 5.32’de, kesme kuvvetinin zamana göre değişimi grafikleri Şekil 5.33’de verilmiştir.

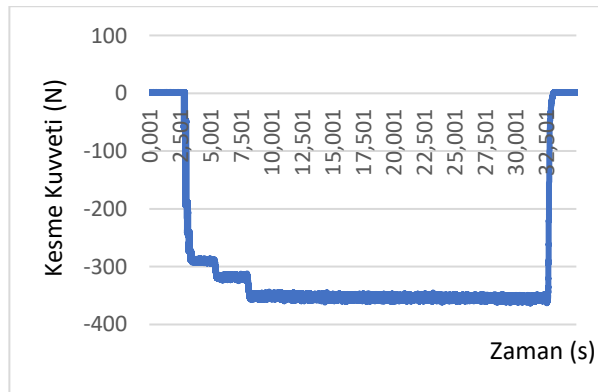


a) b) c)

Şekil 5.32: Doğrulama deneyleri aşınma görüntüleri.



a) b)



c)

Şekil 5.33: Doğrulama deneyleri kuvvet – zaman grafiği.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında, DIN 1.2379 çeliğinin TNGA 160404T01020 kesici takım ile değişken ilerlemeli ve sabit ilerlemeli tornalama deneyleri yapılmıştır. Değişken ilerlemeli tornalama işleminin kuru işleme ve kesme sıvılı işleme şartlarında serbest yüzey aşınmasına etkisi araştırılmıştır. Kesme sıvısı kullanımının değişken ilerlemeli tornalama işlemi ve sabit ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınması üzerine etkisi incelenmiştir.

Kuru işleme şartlarında serbest yüzey aşınmasının en küçük değerini sağlayacak değişken ilerleme kademeleri optimize edilmiş, bu ilerleme kademelerinin serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Değişken ilerlemeli tornalama işlemi gerçekleştirildiğinde, sabit ilerlemeli tornalamaya göre kuru işleme şartlarında serbest yüzey aşınma değerinde en küçük %3,60 en yüksek %9,73, kesme sıvısı kullanılan şartlarda en küçük %2,48, en yüksek %31,57 azalma görülmüştür.

Sabit ilerlemeli tornalamada; kesme sıvılı şartlarda yapılan deneylerde, kuru işleme şartlarında yapılan deneylere göre en küçük %29,20 en yüksek %71,64 arasında takım serbest yüzey aşınma değerini azalttığı gözlenmiştir. Değişken ilerlemeli tornalamada; kesme sıvılı şartlarda yapılan deneylerde, kuru işleme şartlarında yapılan deneylere göre en küçük % 35,90 en yüksek %74,40 arasında takım serbest yüzey aşınma değerini azalttığı gözlenmiştir. Sabit ve değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde kesme sıvısı kullanımının serbest yüzey aşınması üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Deney verileri kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasında, en küçük serbest yüzey aşınma değeri için, değişken ilerleme seviyeleri birinci, ikinci ve nihai ilerleme değerleri sırası ile 0,08 mm/dev, 0,105 mm/dev ve 0,130 mm/dev bulunmuştur. Bu değişken ilerleme seviyeleri yapılan deney planında yer alan deney numarası 11 olan deney ile aynı seviyede çıkmıştır.

Kesme hızı ve kesme derinliği aynı kullanılarak, optimum değişken ilerleme seviyeleri birinci, ikinci ve nihai ilerleme değerleri sırası ile 0,08 mm/dev, 0,105 mm/dev ve 0,130 mm/dev olarak belirlenen değişken ilerlemeli tornama deneyinin, ilerleme  $f = 0,130$  mm/dev

olarak yapılan sabit ilerlemeli tornalama deneyine göre %18,4 serbest yüzey aşınması üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınması üzerinde,  $f_1$  birinci ilerleme ve  $f_2$  ikinci ilerlemenin eşit,  $f_3$  nihai ilerlemenin daha az etkiye sahip değişkenler olduğu belirlenmiştir. Başlangıç aşınması bölgesinde görülen aşırı aşınmanın, aşırı kesme kuvveti şiddetinden kaynaklandığı görülmüştür. Başlangıç aşınmasını azaltmak için tornalama işlemine düşük ilerleme ile başlanıp kademeli olarak artırılmalıdır.

Seramik takımlar ile yapılan deneylerde, serbest yüzey aşınması ve çentik aşınması görülmüştür. Kesici takımlarda görülen çentik aşınması ve serbest yüzey aşınmasının yüzey kalitesinin bozulmasına, tolerans sınırları dışında parça üretilmesine, kesici takımın zayıflamasına hatta takım kırılmasına neden olabileceği düşünülürse, optimum değişken ilerleme kademelerinin tespit edilmesi çok önemlidir.

Değişken ilerlemeli tornalama deneylerinden elde edilen ölçümler ve deney parametrelerine göre, kesme için harcanan toplam enerjinin bir fonksiyonu olarak serbest yüzey aşınması modellenmiş ve serbest yüzey aşınma değerinin kuvvete bağlı matematiksel denklemi elde edilmiştir.  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  ilerlemelerine karşılık gelen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c3}$  kesme kuvvetleri ilerlemenin fonksiyonu olarak modellenmiş ve matematiksel denklemleri elde edilmiştir. Serbest yüzey aşınma modeli ile kuvvet modeli birleştirilerek, değişken ilerleme  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ilerlemeye bağlı serbest yüzey aşınması denklemi elde edilmiştir.

Değişken ilerlemeli tornalama işleminde serbest yüzey aşınma değeri tahmini için kesme kuvvetinin, şekillenmemiş talaş uzunluğu ile çarpımıyla hesaplanan toplam kesme enerjisine bağlı takım serbest yüzey aşınması doğrusal olmayan regresyon kullanılarak modellenmiştir. Program tarafından oluşturulan Matlab kodunun matematiksel olarak ifadesi oluşturulmuştur.  $R^2$  değeri 0,979 dir. Serbest yüzey aşınma değeri oldukça düşük  $R^2$  hatası ile tahmin edilmiştir.

Program verilerinde kare ortalamaların karekökü hatası 0,00188 dir. Elde edilen model kabul edilebilir bir hata ile serbest yüzey aşınma değerini tahmin edebilmektedir. Deney verileri ile serbest yüzey aşınma modelinin tahmini arasında, en yüksek % 6,91 hata oranı görülmektedir. Karşılaştırmalar, modelin tahmini ile deney verilerinin uyumlu olduğunu



göstermiştir. Doğrulama deneyleri için deney verileri ile modelin tahmini arasında, en yüksek % 10,57 hata oranı görülmektedir. Talaş kaldırma deneylerinde bu değer kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.

Kesme kuvveti modellerinde;  $R^2$  değeri,  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$  ve  $F_{c3}$  kuvvetleri için sırası ile 0,989, 0,989, 0,983 dür. Doğrulama deneylerinde ölçülen  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$  ve  $F_{c3}$  ile kuvvet modelleri arasında hata oranı sırası ile en yüksek % 5,50 % 5,06, % 5,03 olarak bulunmuştur. Bu oran kabul edilebilir bir seviyededir.

Serbest yüzey aşınma modeli ile kuvvet modeli birleştirilerek, değişken ilerleme  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  parametrelerinin bir fonksiyonu olarak serbest yüzey aşınması modeli tahmini ile deney verileri arasında, en yüksek % 7,10 hata oranı görülmüştür. Karşılaştırmalar modelin tahminin deney verilerinin uyumlu olduğunu göstermiştir. Doğrulama deneyleri ile modelin tahmini arasında, en yüksek % 12,77 hata oranı görülmektedir.

Şekil 5.19'da talaş kalınlığı  $h = 0,1249$  mm ( $f = 0,1251$  mm/dev) değeri ve bu değer sol tarafı  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulu için TNGA 160404T01020 takımlar ile DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin işlenmesinde çalışma bölgesi olarak önerilmiştir.

Bölüm 5.2'de yapılan optimizasyon çalışmasında, değişken ilerlemeli tornalama için optimum değişken ilerleme seviyeleri  $f_1 = 0,08$  mm/dev,  $f_2 = 0,105$  mm/dev,  $f_3 = 0,130$  mm/dev olarak önerilmiştir. İlerlemenin nihai değer olan  $f_3 = 0,130$  mm/dev değeri ile önerilen çalışma bölgesinde  $f = 0,1251$  mm/dev ilerleme değerinin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Bölüm 5.3'de yapılan değişken ilerleme  $f_1 < f_2 < f_3$  koşulunu sağlayacak şekilde değişken ilerlemedeki kademeli artışla beraber takıma etki eden kesme kuvvetlerinde artış görülmüştür. Değişken ilerleme seviyeleri  $f_1 = 0,100$  mm/dev,  $f_2 = 0,125$  mm/dev,  $f_3 = 0,150$  mm/dev olarak belirlenen deneyde ölçülen teğetsel kuvvetin, kuvvet - zaman grafiği incelendiğinde, ilerleme değerindeki kademeli artışla beraber teğetsel kuvvetin 273,73 N değerinden 319,95 N ve son olarak 363,17 N değerine artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Doktora çalışmasında, ilerlemedeki kademeli artışla beraber, kesme kuvvetlerinin kademeli artması sonucu takım aşınmasının azaldığı, aşınmaya bağlı olarak takım ömrünün arttığı sonucuna varılmıştır.

Literatürde A. Oral vd. yaptıkları çalışmada; değişken ilerlemeli tornalama işlemi uygulayarak AISI 1050 çeliğinin değişken ilerleme kullanılarak tornalama işlemine, düşük ilerlemeyle başladığında ilk anda kesici takıma etkiyen kesme kuvvetlerinin düşük olduğu ve kademeli şekilde artış gösterdiği bu nedenle başlangıç aşınmasının azaldığını ifade etmişlerdir [22]. Doktora çalışmasında gözlenen kuvvetlerdeki kademeli artış ile, A. Oral ve vd.'nin AISI 1050 çeliğinin değişken ilerlemeli tornalama işlemi çalışmasında elde ettiği sonuçlarla uyum göstermektedir. Oral A. vd., çalışmasında teorik olarak ulaştığı bu sonuç çalışmamızda deneysel ve istatistiksel olarak doğrulanmıştır.

O. Çalışkan çalışmasında, ilerlemenin birinci bölgede en etkili parametre olduğu, takım aşınmasının ilerlemenin artmasıyla arttığı ve kesme derinliğinin takım aşınması üzerine etkisinin az olduğu belirtilmiştir [29]. Belirtilen çalışmanın sonucu ile çalışmamızın sonucu uyum göstermektedir.

Serbest yüzey aşınması modelleme çalışmasında, kullanılan kesme kuvvetleri değerleri yapılan değişken ilerlemeli tornalama deneylerinde dinamometre aracılığı ile ölçülen kuvvet değerleridir. Gerekli kuvvet değerlerini deneyler aracılığı ile belirlemek maliyetli ve zaman alıcıdır. Çalışmanın devamına yönelik olarak, kesme kuvvetinin değerini bir analiz programı aracılığıyla deney yapmadan belirleyerek kullanmak, yarı deneysel bir çalışma ile serbest yüzey aşınmasının belirlenmesi önerilmektedir.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] M. Akkurt, Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi CNC Takım Tezgahları ve Üretim Otomasyonu. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2012.
- [2] M. C. Çakır, Modern Talaşlı İmalatın Esasları. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 2006.
- [3] A. Oral, M. C. Çakır, M. Göktepe, T. Türkmen, “Tornalama işlemlerinde yeni bir işleme stratejisi-değişken ilerlemeli tornalama”, 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Kuşadası, Türkiye, Kas. 2013, s. 479-486
- [4] Y. Altıntaş, Üretim Otomasyonu. İstanbul: Koç Üniversitesi Yayınları, 2017.
- [5] M. C. Çakır, Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri. Bursa: Dora, 2010.
- [6] Anonim, ISO 3685: 1993 (E), Tool-life testing with single point tools, 1993.
- [7] K. Özdemir, “İlk aşınma bölgesinde takım aşınmasını etkileyen parametrelerin deneysel analizi”, Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniv., Bursa, 2008.
- [8] D. A. Stephenson and J. S Agapiou, Metal Cutting Theory and Practice Third Edition, CRC Press, 2016.
- [9] A. Oral, M. C. Çakır, T. Türkmen, “Tornalama İşlemlerinde Değişken İlerlemenin Başlangıç Aşınmasının Azaltılmasına Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara, Türkiye, Eki. 2012, s. 463-743.
- [10] F. Taylan, Sert Malzemelerin Frezelenmesinde Takım Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi, Süleyman Demirel Üniv., Doktora Tezi, Isparta, 2009.
- [11] Y. Şahin, Talaş Kaldırma Prensipleri 2. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 2001.
- [12] <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>, [Online], Erişim tarihi: 3.11.2022.
- [13] H. Richárd. “A New Model for Fine Turning Forces.” Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 12, pp.109-128, 2015.
- [14] M. Radovanović, P. Dašić, P. Janković, “Experimental Determination of Cutting Force By Longitudinal Turning Of C60E Steel”, Romanian Technical Sciences Academy, Mocom 12, vol. 2 , Jun. 2006.
- [15] E. M. Trend and P. K. Wright, Metal Cutting. Woburn MA: Butterworth – Heinemann, 2000.
- [16] M. Balazinski ve Ch. Mpako, “Improvement of Tool Life Through the Use of Discrete Feed Rates During Machining of 4140 Steel” Machining Science and Technology, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, 1999.

- [17] M. Balazinski, V. Songmene, ve L. Kops,. "Improvement of tool life through variable feed milling of Inconel 600", *Annals of the CIRP*, vol. 44, no.1, pp. 55-58 ,1995
- [18] Z. Klim, E. Ennajimi, M. Balazinski ve C. Fortin, "Cutting tool reliability analysis for variable feed milling of 17-4PH stainless steel," *Wear*, vol. 195, pp. 206-213, 1996.
- [19] M. Memarianpour, S. A. Niknam, S. Turenne, and M. Balazinski, "Study of the Effects of Initial Cutting Conditions and Transition Period on Ultimate Tool Life when Machining Inconel 718," *Materials*, vol. 14, no. 3, p. 592, Jan. 2021.
- [20] O. M. İşleyen, "1.2738 Çeliğinin Frezelenmesinde Değişken Kesme Hızı ve Değişken İlerleme Yönteminin Takım Ömrü Üzerine Etkisi", Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniv., İstanbul, 2019
- [21] M. Balazinski ve E. Ennajimi, "Influence of Feed Variation on Tool Wear When Milling Stainless Steel 17-4Ph," *Journal of Engineering for Industry*, Vol 116, pp. 516-520, Nov. 1994.
- [22] A. Oral, M.C. Çakır, Budak E., Ensarioğlu C., "Tornalama işlemlerinde başlangıç aşınmasının azaltılması", 2. Ulusal talaşlı İmalat Sempozyumu, Konya, Türkiye, Eki. 2010.
- [23] A. Oral, M. C. Çakır, D. Gönen, A. D. Karaoğlan, "Experimental investigation of a novel machining strategy for rough turning using variable feed rate." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 1(87), pp. 779-787, Feb. 2016.
- [24] A. Oral, B. İmrek, Değişken İlerlemeli Tornalamanın Sert Malzemelerin İşlenmesinde Başlangıç Aşınmasına ve Takım Ömrüne Etkilerinin İncelenmesi. 9<sup>th</sup> Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, Antalya, Türkiye, Kas. 2018, s. 99-105.
- [25] U. Emiroğlu, Y. Özsoy ve E. Altan, "Tornalamada Değişken İlerleme ile Talaş Kırılması", 8th International Symposium On Machining, Nov. 2017, s. 85-100.
- [26] T. R. Lin and R. F. Shyu, "Improvement of tool life and exit burr using variable feeds when drilling stainless steel with coated drills." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 16(5), pp. 308-313, 2000.
- [27] T. R. Lin, "Cutting behaviour using variable feed and variable speed when drilling stainless steel with TiN-coated carbide drills." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 19(9), pp. 629-636, 2002.
- [28] N. Yasar ve M. Günay, "Elmas kaplamalı WC matkap ile CFRP plakaların delinmesinde delik kalitesinin analizi", 8th International Symposium on Machining, Antalya, Türkiye, Nov. 2017.

- [29] O. Çalışkan, “Tornalamada talaş kaldırma parametrelerinin takım ömrüne etkilerinin taguchi yaklaşımıyla incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniv., İstanbul, 2014.
- [30] Ö. Şahan, “Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanması ve kesme kuvvetlerinin mekanistik modellenmesi”, Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniv. Afyonkarahisar, 2019.
- [31] K. Jemielniak, M. Szafarczyk ve J. Zawistowski, “Difficulties in Tool Life Predicting When Turning with Variable Cutting Parameters,” *Annals of the CIRP*, vol. 34, no. 1, pp. 113-116, 1985.
- [32] G. Zhang and C. Guo, Modeling Flank Wear Progression Based on Cutting Force and Energy Prediction in Turning Process, *Procedia Manufacturing*, vol. 5, pp. 536–545, 2016
- [33] M. Akgün, and H. Demir, “Optimization and finite element modelling of tool wear in milling of Inconel 625 superalloy”, *Politeknik Dergisi*, vol. 24(2), s. 391-400, 2021.
- [34] A. Attanasioa, E. Cerettia, C. Giardinib, “Analytical Models for Tool Wear Prediction during AISI 1045 Turning Operations”, 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), 2013, pp.218-223.
- [35] X Luo, K. Cheng, R. Holt R and X. Liu, “Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting”, 15th International Conference on Wear, Jul.-Aug. 2005, pp. 1235-1240.
- [36] Y-V. Yen, J. Söhner, J., B. Lilly, T. Altan, “Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 146, s. 82-91, 2004.
- [37] T. Özel, Y. Karpat, L. Figueira, J. P. Davim, “Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts.” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 189, pp. 192–198, Jon. 2007.
- [38] S.K. Choudhury, P. Srinivas, “Tool wear prediction in turning, *Journal of Materials Processing Technology*.” vol. 153-154, pp. 276-280, Nov. 2004.
- [39] Y. Huang, and S. Y. Liang, (March 18, 2004). "Modeling of CBN Tool Flank Wear Progression in Finish Hard Turning." *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 126(1), pp. 98–106, Feb. 2004.
- [40] E. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut, Ş. Şirin, AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Farklı Geometriye Sahip Kesici Takımlarla Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınmasına Etkisinin Araştırılması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, s. 660-668, Şub. 2018.

- [41] O. Özbek, “Tornalamada Kriyojenik Soğutma ve Minimum Miktarda Yağlamanın Kesici Takım Aşınması ve Titreşimine Etkilerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Düzce Üniv., Düzce, 2020.
- [42] O. İynen, “Modeling Of Power Consumption, Cutting Force, Sound, Current, And Surface Roughness During Turning Of AISI 4340 Steel With Different Hardness”, Çukurova Üniv., Doktora Tezi, Adana, 2022.
- [43] J. Lorentzon, N. Jarvstrat, “Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718”, Int. J. Machine Tools and Manuf., vol.48, pp. 1072-1080, Aug. 2008.
- [44] <https://www.kennametal.com/tr/tr/products/p.kenloc-negatif-kesici-uclar-tnga.557804.html>, [Online], Erişim tarihi: 02.11.2022.
- [45] <https://www.kennametal.com/tr/tr/products/p.mtjn-93.1192352.html>, [Online], Erişim tarihi: 02.11.2022.
- [46] <https://www.birlesikmetal.com.tr/Malzemeler/12379>, [Online], Erişim tarihi: 25.10.2022.
- [47] D. Murat, C. Ensarioğlu, N. Gürsakal, A. Oral, M.C. Çakır, “Evaluation of tool wear for hard turning operations through response surface methodology”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, cilt 33, no 4, s. 1299–1308, 2018, doi: 10.17341/gazimmfd.416427.
- [48] <https://www.tezmaksan.com.tr/goodway-gs-200-8-yatay-cnc-torna-tezgahi-urundetay-28>, [Online], Erişim tarihi: 05.11.2022.
- [49] <http://www.rivotech.cz/images/nl-data-EN.pdf>, [Online], Erişim tarihi: 05.11.2022.
- [50] [https://www.nikon.com/news/2010/0913\\_shuttlepix\\_01.htm](https://www.nikon.com/news/2010/0913_shuttlepix_01.htm), [Online], Erişim tarihi: 09.11.2022.
- [51] <https://www.kistler.com/en/product/type-9129aa/>, [Online], Erişim tarihi: 09.11.2022.
- [52] H. Gökçe, “Al 1050-H14 Alaşımının Delinmesi Sürecinde Yüzey Pürüzlülüğü, Çapak Oluşumu, Takım Aşınması, Çaptan ve Silindiriklikten Sapmanın Modellenmesi ve Tahmini”, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, cilt: 2, no: 1, s. 23-40, 2021.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Berna İMREK  
Doğum tarihi ve yeri : 12.10.1976 Sındırgı  
e-posta : bernaimrek@balikesir.edu.tr

### Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	1999-2002
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	1994-1999
Lise	Balıkesir Lisesi	1990-1993

### Yayın Listesi

B. İmrek, A. Oral, DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin değişken ilerlemeli tornalanmasında serbest yüzey aşınmasının deneysel olarak incelenmesi, değişken ilerleme seviyelerinin optimizasyonu. Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Dergisi, Cilt 38, Sayı 1, s. 409-420, 21.06.2022, doi: 10.17341/gazimmfd.872540. **[Tezden türetilmiştir]**

A. Oral, B. İmrek, Değişken İlerlemeli Tornalamanın Sert Malzemelerin İşlenmesinde Başlangıç Aşınmasına ve Takım Ömrüne Etkilerinin İncelenmesi. 9<sup>th</sup> Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu. s. 99-105, 2018. **[Tezden türetilmiştir]**

B. İmrek, A. Oral, Değişken İlerlemeli Tornalamanın Takım Ömrüne Etkisi, İlerlemenin Optimizasyonu. 11<sup>th</sup> Uluslararası talaşlı imalat sempozyumu. s. 58-65, 2021. **[Tezden türetilmiştir]**