



**KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN KRİYOJENİK
İŞLEMİN INCONEL 625 NİKEL ESASLI
SÜPERALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİNE
ETKİSİNİN DENEYSEL NÜMERİK VE
İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI**

Mahir AKGÜN

**2021
DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Halil DEMİR**

**KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN KRİYOJENİK İŞLEMİN INCONEL
625 NİKEL ESASLI SÜPERALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL NÜMERİK VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI**

Mahir AKGÜN

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

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Halil DEMİR**

**KARABÜK
Şubat 2021**

Mahir AKGÜN tarafından hazırlanan “KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN KRIYOJENİK İŞLEMİN INCONEL 625 NİKEL ESASLI SÜPERALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİNE ETKİSİNİN DENEYSEL NÜMERİK VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

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

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 19/02/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)
Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Hasan Basri ULAŞ (GÜ)
Üye : Doç. Dr. Ali KALYON (YÜ)

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Mahir AKGÜN

ÖZET

Doktora Tezi

KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN KRIYOJENİK İŞLEMİN INCONEL 625 NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİNE ETKİSİNİN DENEYSEL NÜMERİK VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI

Mahir AKGÜN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Şubat 2021, 121 sayfa

Bu çalışmada, Inconel 625 süper alaşımın farklı bekleme sürelerinde sıg ve derin kriyojenik işlem uygulanmış takımlar ile işlenebilirliği araştırılmıştır. Kesici takım olarak kaplamasız, AlTiN ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür takımlar kullanılmıştır. İlk aşamada kesici takımlara 12, 24 ve 36 saat olmak üzere üç farklı sürede sıg (-80°C) ve derin (-196°C) kriyojenik işlemler uygulanmıştır. Kriyojenik işlemin kesici takımlara etkisini belirlemek için mikroyapı incelemeleri, mikrosertlik ölçümleri, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada, işlenebilirlik deneyleri CNC torna tezgahında kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Tornalama deneylerinin tasarımında Taguchi metodu kullanılmıştır.

Tornalama deneyleri L18 ($6^1 \times 3^3$) dizinine göre kesici takımın altı farklı seviyesinde, kesme hızının, ilerleme miktarının ve talaş derinliğinin üç farklı seviyesinde, yapılmıştır. Kesme parametrelerinin optimum seviyelerini ve çıktı parametreleri üzerindeki etki oranlarını belirlemek için sırasıyla, S/N oranı ve varyans analizleri kullanılmıştır. Sonrasında, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebilmek için doğrusal ve ikinci derece regresyon analizleri uygulanmıştır. Buna ek olarak, geliştirilen bu matematiksel denklemlerin doğrulukları test edilmiştir. Son aşamada, sonlu elemanlar metodu tabanlı Deform 3D yazılımında tornalama simülasyonları yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, kriyojenik işlem sonrası kesici takımların sertliğinin arttığı ve bu sertlik artışına bağlı olarak tornalama deneylerinde esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre esas kesme kuvveti için kesme parametrelerinin optimum seviyeleri 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana takım, 180 m/dak kesme hızı, 0,12 mm/dev ilerleme miktarı ve 0,5 mm talaş derinliği olarak belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak yapılan tornalama deneylerinde esas kesme kuvveti 82 N olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ise kesme parametrelerinin optimum seviyeleri 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana takım, 120 m/dak kesme hızı, 0,12 mm/dev ilerleme miktarı ve 1,5 mm talaş derinliği olarak belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak yapılan tornalama deneylerinde yüzey pürüzlülüğü 0,21 mm olarak elde edilmiştir. Varyans (ANOVA) analiz sonuçlarına göre esas kesme kuvveti üzerinde en fazla etkiye sahip parametre ise %90,03 katkı oranı ile talaş derinliği iken yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkiye sahip parametre ise %63,55 katkı oranı ile kesici takımdır. Regresyon analizi sonuçları, ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen tahmini Fc ve Ra değerlerinin lineer regresyon modeline göre daha etkili olduğunu göstermektedir. İstatistiksel sonuçlar, Taguchi yönteminin Inconel 625 alaşımının işlenmesinde optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde başarılı olduğunu göstermektedir. Deneysel olarak ölçülen kesme kuvveti ile simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet değerleri arasında ortalama %12'lik bir fark olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Inconel 625, işlenebilirlik, kriyojenik soğutma, optimizasyon, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EXPERIMENTAL NUMERICAL AND STATISTICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CRYOGENIC TREATMENT APPLIED ON CUTTING TOOLS ON MACHINABILITY OF INCONEL 625 NICKEL BASED SUPERALLOY

Mahir AKGÜN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Halil DEMİR

February 2021, 121 pages

In this study, was investigated the machinability of Inconel 625 superalloys by cutting tools applied with the shallow and deep cryogenic treatment at different soaking times. The uncoated cutting tool, AlTiN and TiCN-Al₂O₃ coated tungsten carbide tools were used as cutting tools. In the first step, the shallow (at -80°C) and deep cryogenic (at -196°C) processes were applied to cutting tools in three different soaking times, 12, 24 and 36 hours. Then, the analysis of the microstructure, EDS, XRD and measurements of microhardness, were performed to determine the effect of the cryogenic process on cutting tools. In the second step, machinability experiments were performed on CNC lathe with dry cutting conditions. Machinability was evaluated according to cutting forces and surface roughness values. Taguchi method was used in the design of turning experiments. Turning experiments were performed according to L18 (6¹ x 3³) index at

six different levels of the cutting tool, three different levels of cutting speed, feed and depth of cut. The S/N ratio and variance analyzes were used to determine the optimum levels of cutting parameters and their effect rates on output parameters. Then, linear and quadratic regression analyses have been applied to predict the cutting force and surface roughness. In addition, these developed mathematical equations have been tested with the accuracy test. At the last stage, turning simulations are performed in the finite element method based Deform 3D software and compared with the experimental results. Consequently, it was found that the hardness of the cutting tools increased after cryogenic processing, and due to this increase in hardness, the values of the main cutting force and surface roughness decreased in turning experiments. Statistical results revealed that it was concluded that the A5B3C1D1 (cutting tool= 24h -196° cryogenic treated, cutting speed = 180 m/min, feed rate = 0.1 mm/rev, depth of cut = 0,5 mm) parameters were the optimal cutting parameters for cutting forces. The cutting forces was obtained as 82 N in the turning test performed using these parameters. On the other hand, it was concluded that was concluded that the A3B3C1D1 (cutting tool= 24h -196° cryogenic treated, cutting speed = 120 m/min, feed rate = 0.12 mm/rev, depth of cut = 1,5 mm) parameters were the optimal cutting parameters for the surface roughness. The surface roughness was obtained as 0.21 mm in the turning test performed using these parameters. The analysis of variance results indicates that the depth of cut is the most significant parameter affecting F_c with a 90.03% contribution rate while the cutting tool is the most significant parameter affecting R_a with a 63,55% contribution rate. Regression analysis results show that estimated F_c and R_a values obtained by quadratic regression model are more effective than linear regression model. The statistical results show that the Taguchi method is successful in determining the optimum cutting parameters for machining Inconel 625 alloy. It was determined that there is an average of 12% difference between the experimentally measured cutting force and the cutting force values obtained as a result of the simulation.

Key Word : Inconel 625, machinability, cryogenic cooling, optimization, cutting force, surface roughness.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve birikimi ile beni yönlendiren kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Halil DEMİR'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmamın ilerlemesine önemli katkılar sağlayan değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Mustafa BOZ'a ve Doç. Dr. Hasan Basri ULAŞ'a ve ayrıca, değerli bilgilerinden faydalandığım KBÜ İmalat Mühendisliği Bölümünün değerleri hocaları Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ, Prof. Dr. Ramazan KAÇAR ve Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a, çalışmalarım da emeği geçen Doç. Dr. Fuat KARA'ya ve mesai arkadaşım Öğr. Gör. Barış ÖZLÜ'ye teşekkür ederim. Çalışmalarımın her safhasında yardımını esirgemeyen kardeşim Doç. Dr. Fatih YILMAZ' teşekkürü bir borç bilirim.

1002-Hızlı Destek Programı kapsamında 119M785 numaralı projeye sağladığı mali destek için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemi sağlayan sevgili Aileme ve doktora çalışmalarım süresince gösterdiği sabır ve anlayış için Eşime tüm kalbimle şükranlarımı sunarım. Biricik oğlum Ali Mete'ye sevgilerimle...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. NİKEL BAZLI SÜPER ALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	4
2.2. KRİYOJENİK SOĞUTMA İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	7
2.3. NİKEL BAZLI SÜPER ALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	10
BÖLÜM 3	16
KURAMSAL TEMELLER	16
3.1. SÜPER ALAŞIMLAR	16
3.1.1. Demir Esaslı Süper Alaşımlar	17
3.1.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar.....	17
3.1.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar.....	18
3.2. TALAŞLI İMALAT	20
3.2.1. Talaş Kaldırma Mekanığı ve Talaş Oluşumu	20
3.2.2. Kesme Kuvvetleri	21
3.2.3. Isı ve Sıcaklık	23
3.2.4. Talaşlı İmalatta Yüzey Kalitesi	23

	<u>Sayfa</u>
3.3. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ.....	24
3.3.1. Ağ Yapıları	25
3.3.2. Malzeme Yapısal Denklemleri	25
3.3.2.1. Johnson-Cook Modeli	26
BÖLÜM 4	27
MATERYAL VE YÖNTEM	27
4.1. DENEY MALZEMESİ	27
4.2. DENEY MALZEMESİNİN İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİ	27
4.2.1. Takım Tezgâhı	27
4.2.2. Deneylerde Kullanılan Kesici Takımlar ve Kesme Parametreleri.....	28
4.2.3. Deneylerde Kullanılan Kesme Parametreleri	28
4.2.4. Kesme Kuvveti Ölçümü	28
4.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	29
4.3. KRİYOJENİK İŞLEMİN UYGULANMASI	29
4.4. DENEY TASARIMI	31
4.5. KESME SİMÜLASYONLARI.....	31
4.5.1. İş Parçası Malzemesinin Tanımlanması	32
4.5.2. Kesici Takımların Tanımlanması	33
4.5.3. İş parçası ve Kesici Takım Ağ Yapısı Tanımlaması	34
4.6. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	34
4.7. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	34
BÖLÜM 5	37
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	37
5.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	37
5.2. XRD SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	42
5.3. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	43
5.4. İSTATİKSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	45
5.4.1. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan Kaplamasız Tungsten Karbür Takımların İstatistiksel Değerlendirilmesi	46
5.4.1.1. S/N Oranlarının Analizi	46
5.4.1.2. Varyans Analizi (ANOVA)	49
5.4.1.3. Regresyon Analizi.....	49

5.4.1.4. Doğrulama Deneyleri.....	53
5.4.2. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan AlTiN Kaplamalı Tungsten Karbür Takımların İstatistiksel Değerlendirilmesi	56
5.4.2.1. S/N Oranlarının Analizi	56
5.4.2.2. Varyans Analizi (ANOVA)	59
5.4.2.3. Regresyon Analizi.....	59
5.4.2.4. Doğrulama Deneyleri.....	62
5.4.3. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan TiCN-Al ₂ O ₃ Kaplamalı Tungsten Karbür Takımların İstatistiksel Değerlendirilmesi	64
5.4.3.1. S/N Oranlarının Analizi	64
5.4.3.2. Varyans Analizi (ANOVA)	66
5.4.3.3. Regresyon Analizi.....	67
5.4.3.4. Doğrulama Deneyleri.....	70
5.5. KESME KUVVETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	72
5.5.1. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan Kaplamasız Tungsten Karbür Takımlar için Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	72
5.5.2. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan AlTiN Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlar için Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	78
5.5.3. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan TiCN-Al ₂ O ₃ Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlar için Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	83
5.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	88
5.6.1. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan Kaplamasız Tungsten Karbür Takımlara Bağlı Ra Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	89
5.6.2. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan AlTiN Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlara Bağlı Ra Değerlerinin Değerlendirilmesi	93
5.6.3. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan TiCN-Al ₂ O ₃ Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlara Bağlı Ra Değerlerinin Değerlendirilmesi..	97
5.7. NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	101
BÖLÜM 6	108
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	108
6.1. SONUÇLAR	108
6.2. ÖNERİLER	112

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	121

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Trent Aero motorunda kullanılan malzemeler	18
Şekil 3.2. Nikel esaslı süper alaşımların mikroyapısında oluşabilen fazlar	19
Şekil 3.3. Dik kesme modeli	20
Şekil 3.4. Talaş Oluşumu	21
Şekil 3.5. Tornalama işleminde kesme kuvvetleri	22
Şekil 3.6. Çeşitli mesh tipleri	25
Şekil 4.1. CNC torna tezgâhı ve test düzeneği	29
Şekil 4.2. Kriyojenik soğutma sisteminin şematik görüntüsü	30
Şekil 4.3. Kriyojenik işlem ve temperleme işlemine ait işlem prosesi.....	31
Şekil 4.4. Kesici takım şekli	33
Şekil 4.5. Ağ yapısı	34
Şekil 4.6. Metalografik inceleme aşamaları	36
Şekil 5.1. Tungsten karbür takımların mikro yapıları: a) işlemsiz, b) 12 saat derin kriyojenik işlem görmüş, c) 24 saat derin kriyojenik işlem görmüş, d) 36 saat derin kriyojenik işlem görmüş	38
Şekil 5.2. İşlemsiz takım için EDS sonuçları	39
Şekil 5.3. 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana takım için EDS sonuçları	40
Şekil 5.4. İşlemsiz ve farklı bekleme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanan tungsten karbür kesici takımlar için XRD profili.....	42
Şekil 5.5. Farklı bekleme sürelerinde uygulana kriyojenik işlemin tungsten karbür takımın sertliğine etkisi.	44
Şekil 5.6. Kaplamasız takımlar için kontrol faktörlerinin S/N oranları etki seviyeleri a) Fc, b) Ra	48
Şekil 5.7. Kaplamasız takımlar için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra	51
Şekil 5.8. Kaplamasız takımlar için ikinci dereceden regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra	53
Şekil 5.9. AlTiN kaplamalı takımlar için kontrol faktörlerinin S/N oranları etki seviyeleri a) Fc, b) Ra	58
Şekil 5.10. AlTiN kaplamalı takımlar için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra	60
Şekil 5.11. AlTiN kaplamalı takımlar için ikinci dereceden regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra	62

Şekil 5.12. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlar için kontrol faktörlerinin S/N oranları etki seviyeleri a) Fc, b) Ra	66
Şekil 5.13. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlar için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra.....	68
Şekil 5.14. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlar için ikinci dereceden regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra.....	70
Şekil 5.15. Kaplamasız takımlarda kesme hızına bağlı Fc değişimi	73
Şekil 5.16. Kaplamasız takımlarda ilerleme miktarına bağlı Fc değişimi.....	74
Şekil 5.17. Kaplamasız takımlarda talaş derinliğine bağlı olarak Fc değişimi	75
Şekil 5.18. Kaplamasız kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri	77
Şekil 5.19. AlTiN kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Fc değişimi.....	79
Şekil 5.20. AlTiN kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Fc değişimi.	80
Şekil 5.21. AlTiN kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Fc değişimi.	81
Şekil 5.22. AlTiN kaplamalı kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri	83
Şekil 5.23. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Fc değişimi.	84
Şekil 5.24. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Fc değişimi	85
Şekil 5.25. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Fc değişimi. ..	86
Şekil 5.26. TiCN-Al ₂ O ₃ kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri.	88
Şekil 5.27. Kaplamasız takımlarda kesme hızına bağlı Ra değişimi.....	89
Şekil 5.28. Kaplamasız takımlarda ilerleme miktarına bağlı Ra değişimi.	91
Şekil 5.29. Kaplamasız takımlarda talaş derinliğine bağlı Ra değişimi.	92
Şekil 5.30. Kuvvet grafiği.	93
Şekil 5.31. AlTiN kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Ra değişimi.	94
Şekil 5.32. AlTiN kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Ra değişimi.....	95
Şekil 5.33. AlTiN kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Ra değişimi.....	96
Şekil 5.34. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Ra değişimi.....	97
Şekil 5.35. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Ra değişimi	99
Şekil 5.36. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Ra değişimi.	100
Şekil 5.37. Talaş görüntüleri a) 0,5, b) 1, c) 1,5 mm.....	101
Şekil 5.38. Kesme hızına göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	102
Şekil 5.39. Kesme hızına bağlı talaş oluşumu a) 60, b) 90, c) 120, d) 150, e) 180 m/dak.....	103
Şekil 5.40. Talaş kalınlığı ölçümü.....	104

	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.41. İlerleme miktarına göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	104
Şekil 5.42. İlerleme miktarının bağlı talaş oluşumu a) 0,12, b) 0,18, c) 0,24 mm/dev.....	105
Şekil 5.43. Talaş derinliğine göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması	106
Şekil 5.44. Talaş derinliğine bağlı talaş oluşumu a) 0,12, b) 0,18, c) 0,24 mm/dev.....	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Inconel 625 alaşımının % kimyasal bileşimi	27
Çizelge 4.2. Deneyselerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri	28
Çizelge 4.3. Inconel 625 alaşımı için Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri	32
Çizelge 4.4. İş parçası malzeme özellikleri.....	33
Çizelge 5.1. Kaplamasız takımların SEM görüntüleri	40
Çizelge 5.2. AlTiN kaplamalı takımların SEM görüntüleri.....	41
Çizelge 5.3. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımların SEM görüntüleri	41
Çizelge 5.4. İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan takımların tane boyutu ve dislokasyon yoğunluğu değerleri	43
Çizelge 5.5. Kaplamasız takımlar için Fc ve Ra değerleri ve S/N oranları	47
Çizelge 5.6. Kaplamasız takımlarda Fc ve Ra için S/N yanıt tablosu.....	47
Çizelge 5.7. Kaplamasız takımlarda Fc ve Ra için varyans sonuçları	49
Çizelge 5.8. Çeşitli doğrulama parametreleri.....	54
Çizelge 5.9. Kaplamasız takımlarda Fc ve Ra için doğrulama testi sonuçları.....	55
Çizelge 5.10. AlTiN kaplamalı takımlar için Fc ve Ra değerleri ve S/N oranları	56
Çizelge 5.11. AlTiN kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için S/N yanıt tablosu	57
Çizelge 5.12. AlTiN kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için varyans sonuçları.....	59
Çizelge 5.13. Çeşitli doğrulama parametreleri.....	63
Çizelge 5.14. AlTiN kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için doğrulama testi sonuçları.....	63
Çizelge 5.15. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlar için Fc, Ra değerleri ve S/N oranları.....	64
Çizelge 5.16. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için S/N yanıt tablosu....	65
Çizelge 5.17. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için varyans analizi sonuçları.....	67
Çizelge 5.18. Çeşitli doğrulama parametreleri.....	71
Çizelge 5.19. TiCN-Al ₂ O ₃ kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için doğrulama testi sonuçları.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

F_c	: esas kesme kuvveti
F_f	: ilerleme kuvveti
F_r	: radyal kuvvet
F_R	: bileşke kuvvet
R_a	: ortalama yüzey pürüzlülüğü
V	: kesme hızı
f	: ilerleme miktarı
a	: talaş derinliği
Al	: alüminyum
Cr	: krom
Ni	: nikel
Mn	: mangan
Si	: silisyum
Co	: kobalt
Ti	: titanyum
CI	: güven aralığı
α	: anlamlılık düzeyi
fe	: hata serbestlik derecesi
n_{eff}	: etkili yineleme sayısı
Ve	: hata varyansı

KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
TS	: Türk Standardı
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu elemanlar analizi)
PVD	: Physical Vapour Deposition (Fiziksel buhar çökeltme)
CVD	: Chemical Vapour Deposition (Kimyasal buhar çökeltme)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama elektron mikroskobu)
DER	: Derin Kriyojenik İşlem
SIG	: Sığ Kriyojenik İşlem
ANOVA	: Kesici takım
WC	: Tungsten Karbür
BUE	: Built Up Edge (Yığıntı Talaş)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde enerji, ulaştırma, savunma, medikal, havacılık ve otomotiv sektörleri dünya ekonomileri için itici güç olup ülkelerin sosyal, bilimsel ve teknolojik düzeyinin gelişmesinde önemli rol oynamaktadırlar. Bu alanlara ülkeler tarafından devlet bütçelerinden ayrılan kaynağın en üst düzeylerde olduğu bilinmektedir. Yatırım maliyetlerinin yüksek olduğu bu alanlarda, kullanılan ekipmanlar da hem mali açıdan hem de malzeme güvenilirliği açısından önem kazanmaktadır [1]. Özellikle, havacılık ve uzay endüstrilerinde mukavemetli ve hafif malzemelere olan ihtiyaçlar giderek artmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlar sahip oldukları, düşük yoğunluk, yüksek dayanım, ısı ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı, bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır. İşlenmesi zor malzemeler grubuna giren nikel esaslı süper alaşımların üretim maliyeti oldukça yüksek olduğu için, işlenmesi esnasındaki hatalar ciddi maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu malzemelerin işlenmesinde uygun işleme şartlarının araştırılması önem arz etmektedir.

Buhar motorunun icadı, takım tezgâhları ve kesici takım endüstrisinin günümüz gelişiminde başlangıç noktası ve itici bir güç olarak kabul edilmektedir [2]. Geçmişten günümüze farklı özelliklere sahip yeni bir malzeme ve alaşımın geliştirilmesi ve düşük işleme maliyetlerine duyulan ihtiyaçtan dolayı, araştırmacıların ilgisini “işlenebilirlik sorunu” çekmiştir ve hala üzerine çalışılan önemli bir araştırma alanıdır [3].

Teknoloji ve malzeme bilimindeki ilerlemelere bağlı olarak son yıllarda imalat sektöründe büyük gelişmeler yaşanmaktadır. Özellikle, kritik uygulamalar için geliştirilen malzemelerin işlenmesi için yeni üretim metotları, takım tezgâhları ve kesici takım malzemeleri ve kaplamaları geliştirilmektedir. Diğer yandan, bu sektörlerde rekabeti sürdürebilmek için bir ürünün en kısa sürede, kalitesinden ödün

vermeden ekonomik ve verimli bir şekilde üretilmesi arzulanmaktadır. İmalat endüstrisi, birçok mekanik parçasının son şeklinin talaşlı imalat yöntemleriyle oluşturulduğu göz önüne alındığında günümüz üretim endüstrileri için son derece önem arz etmektedir.

Metal işleme endüstrisinde kesici takımlar hat safhada kullanılmakta ve ülkemizde yüksek miktarda döviz kaybı oluşmaktadır. Bir malzemenin işlenebilirlik özelliği hakkında önemli bilgiler veren yüzey kalitesi, kesme kuvvetleri ve takım ömrü gibi çıktılarda elde edilecek olan iyileşmeler ile takımlama maliyetleri azaltılarak ürün kalitesi artmaktadır. Bu bağlamla, son yıllarda birçok araştırmacı kesme sürecinin modellenmesine ve optimizasyonuna yoğunlaşmıştır. Özellikle, literatürde optimizasyon teknikleri kullanılarak kesme parametrelerinin ideal seviyelerini belirlemek ve tahmin denklemlerini oluşturması üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir.

Sonlu elemanlar analizi, çoğunlukla mühendislik problemlerine çözüm elde etmek için kullanılan bir sayısal yöntem olarak bilinmektedir. Son yıllarda dövme, haddeleme, derin çekme ve talaşlı imalat gibi plastik deformasyon süreçlerinin modellenmesinde kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Özellikle, talaşlı imalat yöntemlerinde kesme mekaniğinin anlaşılmasına, takım geometrilerinin tasarlanmasına ve kesme koşullarının iyileştirilmesine büyük katkılar sunmaktadır. Deneysel çalışmalar ile belirlenmesi zor ve maliyetli olan kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri, oluşan gerilmelerin ve takım aşınmaları gibi önemli kesme işlemi faktörlerinin tahminine olanak sağlamaktadır. Genellikle işleme (tornalama, frezeleme, delme gibi) deneylerinde ölçülen kesme kuvvetleri ile nümerik analizler ile elde edilen kesme kuvvetleri kıyaslanmaktadır. Nümerik analizin uygulanabilirliği kıyaslama sonucunda elde edilen fark oranına göre değerlendirilmektedir. Yani, nümerik analizlerde, deneysel olarak ölçülen kesme kuvvetinden yola çıkılarak talaş oluşumuna konu olan diğer hususlar belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada, enerji ve havacılık sanayinde oldukça yaygın kullanılan Inconel 625 süper alaşımının işlenmesinde farklı bekleme sürelerinde sıg ve derin kriyojenik işlem uygulanmış takımların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin

belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak kesici takımlara kriyojenik işlem uygulanmıştır. Sonrasında takımların mikroyapı ve sertlik değişimleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, işlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanmış takımlar ile Inconel 625 süper alaşımı üzerinde tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneylerinde ölçümler ile kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir. Tornalama deneyleri Taguchi metoduna göre tasarlanmıştır ve işleme parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için doğrusal ve ikinci dereceden tahmin denklemleri geliştirilmiştir. Ayrıca, bu denklemlerin doğrulukları test edilmiştir. Son olarak, sonlu elemanlar metodu tabanlı Deform 3D yazılımında tornalama simülasyonları yapılarak elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar kıyaslanarak, kesme modelinin uygulanabilirliği test edilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. NİKEL BAZLI SÜPER ALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Parida ve Maity, nikel esaslı (Inconel 718, Inconel 625 ve Monel 400) süper alaşımların sıcak tornalanmasında işlenebilirliklerini kıyaslamışlardır. İşlenebilirlik kıyaslamalarında, çıktı parametresi olarak kesme kuvveti, takım ömrü, talaş oluşumu ve yüzey bütünlüğünü değerlendirmişlerdir. Tornalama deneylerini, 30°C, 300°C ve 600°C sıcaklık koşullarında, 100 m/dak kesme hızında, 0,13 mm/dev ilerleme miktarında ve 0,5 mm talaş derinliğinde gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar göre, üç alaşımın oda sıcaklığında işlenmesine kıyasla sıcak işlenmesinde kesme kuvvetinin, takım aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede azaldığını ve takım ömrünün arttığını tespit etmişlerdir [4].

Kosaraju ve arkadaşları, Inconel 625 süper alaşımının tornalanmasında işleme parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İşleme parametreleri olarak kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliğini kullanır iken işlenebilirlik göstergesi olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetini seçmişlerdir. Taguchi'nin gri analiz metodunu, en düşük kesme kuvveti ve en iyi yüzey kalitesini elde etmek için kesme parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemede kullanmışlardır. İstatiksel sonuçlara göre kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğunu belirtmişlerdir [5].

Korkmaz ve Günay, havacılık uygulamalarında kullanılan yeni bir süper alaşım olan Nimomic 80A alaşımının işlenebilirliğini istatiksel ve deneysel olarak incelemişlerdir. Tornalama deneylerini, üç farklı kesme hızında, ilerleme miktarında ve talaş derinliğinde kaplamalı karbür kesici takımlar kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Deneysel kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerini ölçmüşlerdir. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebilmek için regresyon analizi ve kesme parametrelerinin etki düzeylerini belirlemek için varyans analizi (Anova) yapmışlardır. Varyans analiz sonuçlarına göre talaş derinliği esas kesme kuvveti ve ilerleme kuvvetini etkileyen en önemli parametre iken ilerleme miktarında radyal kuvvet ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli kesme parametresi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesi için geliştirilen matematiksel modelin yüksek doğrulukta çalıştığını belirtmişlerdir [6].

Sunulapasic ve arkadaşları, Nimonic 80A alaşımının tornalanmasında kesme şartlarının ve kimyasal bileşimin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün tahmin denklemlerini geliştirmek için Matlab programında regresyon analizini kullanmışlardır. İlerleme miktarının bileşke kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, kimyasal bileşiminde Al ve Ti oranı yüksek olan alaşımın tornalanmasında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir [7].

Sørby ve Vagnorius, Inconel 625 alaşımının seramik takımlarla tornalanmasında normal (0,7 Mpa) ve yüksek basınçlı (5, 10 ve 15 Mpa) soğutma şartlarının takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlara göre yüksek basınçlı soğutmanın mükemmel talaş kırma sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, seramik kesici takımların takım ömrünün, artan kesme sıvısı basıncıyla iyileşmediğini vurgulamışlardır [8].

Hemakumar ve Kuppan, kuru kesme şartlarında Inconel 625 alaşımının işlenebilirliğini yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme kuvveti ve spesifik kesme basıncı açısından deneysel olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün artan ilerleme miktarı ile arttığını ancak artan kesme hızı ile azaldığını tespit etmişlerdir. Optimum yüzey kalitesini, 90 m/dak kesme hızında ve 0,125 mm/dev ilerleme miktarında ulaşıldığını vurgulamışlardır. Ayrıca yanak aşınmasında yüksek kesme hızının ve ilerleme miktarının önemli derecede etkilendiğini ve esas kesme kuvvetinin

düşük kesme hızlarında yığıntı talaş (BUE) oluşumuna bağlı olarak daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [9].

Thakur ve Gangopadhyay, işleme sürecinin sürdürülebilirliğini arttırabilmek için geleneksel soğutma sıvılarının yerine minimum miktar yağlama (MQL) ve kuru kesme şartlarında çok katmanlı (TiN/TiAlN) kaplanmış kesici takımların kullanılabilirliğini araştırmışlardır. İşlenebilirlik deneylerini, tornalama yöntemi ile nikel esaslı bir süper alaşım olan Incoloy 825 üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Kesme şartları ve işlenebilirlik göstergeleri arasındaki ilişkileri belirlemek için kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini ölçmüşlerdir. Geleneksel soğutma sıvıları, minimum miktar yağlama (MQL) ve kuru kesme şartlarında çok katmanlı (TiN/TiAlN) kaplanmış kesici takımların performansları kıyaslandığında, finiş işlemede kuru kesme şartlarında, kaplamalı kesici takımların kullanımının sürdürülebilir bir kesme imkanı sağladığını vurgulamışlardır [10].

Saleem ve Mumtaz, silici uç geometrisine sahip kesici takımlar ile Inconel 625 alaşımının yüzey frezeleme yöntemiyle işlenmesinde, takım ömrü ve iş parçası yüzey bütünlüğünü değerlendirmişlerdir. İşleme deneylerini Taguchi'nin L8 dizinine göre iki farklı kesme hızında, ilerleme miktarında ve talaş derinliğinde kuru kesme şartların gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, %45,43 katkı oranı ile talaş derinliğinin takım ömrünü etkileyen en önemli parametre olduğunu ve %46,25 katkı oranı ile ilerleme miktarının ise yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre olduğunu tespit etmişlerdir [11].

Kartheek ve arkadaşları, kaplamalı sementit karbür kesici takımlar ile Inconel 718 alaşımının sert tornalanmasında kalıntı gerilmenin optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca kalıntı gerilmeye ek olarak yüzey kalitesi ve talaş kaldırma oranını da optimize etmişlerdir. İşleme sırasında oluşan artık gerilmelerin belirlenmesinde X-ray diffraction (XRD) tekniğini kullanmışlardır. Deney sonuçlarının optimizasyonunda en iyi süreç parametresinin belirlenmesi için Taguchi'nin gri analiz metodundan yararlanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, 52,87 m/dak kesme hızı, 0,2 mm/dev ilerleme miktarı ve 0,4 mm talaş derinliğinin en yüksek

gri ilişkisel dereceye sahip olduğunu ve bu parametrelerin tornalama performansı bakımından optimum değerler olduğunu vurgulamışlardır [12].

Bushlya ve arkadaşları, hız ve verimliliği arttırmayı hedefleyen çalışmalarında, kaplamalı ve kaplamasız PCBN kesici takımlar ile Inconel 718 alaşımının yüksek hızda tornalanmasında, alaşımın işlenebilirliğini takım ömrü, takım aşınması, yüzey bütünlüğü ve kesme kuvvetleri açısından deneysel olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre kesici takım kaplaması takım ömrünü %20 arttırırken kaplamanın koruyucu işlevinin düşük kesme hızı aralığı ile sınırlı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, EDX ve AFM analiz sonuçları kimyasal ve aşındırıcı aşınma mekanizmalarının bu sınırlılık üzerinde baskın rol oynadığını göstermiştir [13].

2.2. KRİYOJENİK SOĞUTMA İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Özbek ve arkadaşları, AISI 316 paslanmaz çeliğinin kaplamasız tungsten karbür uçlar ile tornalanmasında takım aşınmasına kriyojenik işlemin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Kesici takımları -145°C de 24 saat bekleterek kriyojenik soğutma işlemi uygulamışlar ve ayrıca bu takımların mikroyapı ve sertlik analizlerini yapmışlardır. Kriyojenik işlemin etkisini belirleyebilmek için kaplamasız ve kriyojenik işlem uygulanan takımların aşınma performanslarını kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçlar, kriyojenik işlem uygulanan uçlarda ince η -karbürlerin miktarının, işlenmemiş olanlara kıyasla %5,4 arttığını ve bunun sonucu olarak sertliğin ve aşınma direncini artırdığını tespit etmişlerdir. Mikrosertlik ölçümlerinde, kriyojenik işlem uygulanan uçların sertlik değerlerinin, kaplamasız uçlara kıyasla %6 arttığı görülmüştür. Tüm kesme koşullarında, kriyojenik işlem uygulanan kesici uçların, yan yüzey aşınması ve krater aşınması açısından kaplamasız uçlardan sırasıyla yaklaşık olarak % 34 ve % 53 kadar daha iyi bir performans gösterdiğini belirtmişlerdir [14].

Wang ve arkadaşları, tantaliumun işlenmesinde geleneksel tornalama ve kriyojenik tornalama performansını deneysel olarak kıyaslamışlardır. İşlenebilirliği değerlendirmek için takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Geleneksel tornalamaya göre kriyojenik tornalamasının kesici takım-iş parçası arayüzey sıcaklığını azaltarak yüzey

pürüzlülüğünün %200 ve kesme kuvvetlerinin de %60 azalttığı ve ayrıca takım ömrünü %300'e varan oranlarda artırdığını tespit etmişlerdir [15].

Höke ve arkadaşları, kriyojenik soğutma işleminin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deney numuneleri ıslah işlemi, kriyojenik işlem ve menevişleme işlemine tabi tutmuşlardır. Numuneler 2°C/dak sabit hızla oda sıcaklığından -140°C'ye soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ıslah işlemi, kriyojenik işlem ve menevişleme işlemi uygulanmış olan numunelerde tokluğun arttığını ve ayrıca kriyojenik işlemin, mikrosertlik üzerinde de pozitif bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [16].

Çiçek ve arkadaşları, seramik kesici takımlar ile sertleştirilmiş ve kriyojenik işlem uygulanmış AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin sert tornalanmasında işlenebilirliğini, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması bakımından incelemişlerdir. Deney numuneleri; geleneksel ısı işlem görmüş, derin kriyojenik işlem görmüş, derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi görmüş olarak üç gruba ayrılmıştır. Ayrıca, tornalama deneylerini Sandvik firması tarafından CC650 ve CC670 kalitesinde üretilen seramik kesici takımlar ile kuru ve ıslak kesme şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar göre, esas kesme kuvveti (Fc), yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve takım aşınması bakımından, kuru ve ıslak kesme koşullarında CC650 kalite seramik uçlar CC670 kalite seramik uçlara göre daha iyi bir performans göstermiştir. Ek olarak, kriyojenik işlem görmüş ve temperlenmiş numunede en düşük aşınma ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ölçüldüğünü ve soğutma sıvısının AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin işlenebilirliğini bir miktar iyileştirdiğini belirtmişlerdir [17].

Khanna ve arkadaşları, Inconel 718 süper alaşımın kriyojenik delinmesinde takım aşınması ve delik kalitesinin değerlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Delme performansı, itme kuvveti, tork, takım aşınması, talaş morfolojisi ve delik kalitesi (dairesellik, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğü) üzerinden değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, kuru delme ile karşılaştırıldığında kriyojenik delme işleminde takım aşınmasının önemli ölçüde azaldığını ve takım ömrünün %87,50'ye varan oranda arttığını göstermiştir. Buna ek olarak, kriyojenik

delmenin, dairesellik sapmalarında (%51'e kadar), silindiriklik sapmalarında (%77'ye kadar) ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinde (%48'e kadar) azalma sağladığını belirtmişlerdir [18].

Dhananchezian ve Rajkumar, Hastelloy C-22 süper alaşımının kriyojenik tornalanması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Tornalama deneylerini, kuru ve kriyojenik işleme şartlarında, 0,77, 1,27 ve 2,1 m/dak kesme hızında, 0,11 ve 0,13 mm/dev ilerleme ve 1 mm kesme derinliğinde yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, kuru kesme şartlarına göre kriyojenik işlemede yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yaklaşık olarak %54 azaldığını tespit etmişlerdir [19].

Wang ve Rajurkar, kesilmesi zor malzemelerin (Ti-6Al-4V, Inconel 718, Tantalum, RBSN, CBN 50 ve H13A) kriyojenik işlenebilirliğini değerlendirmişlerdir. Deneyleri, sıvı nitrojen soğutma sistemine, sıcaklık ölçüm sistemine ve kuvvet ölçüm sistemine sahip torna tezgâhında gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, LN₂ soğutma ile işlenen tüm malzemelerin yüzey pürüzlülüğünün, kuru kesme şartlarına göre işlenen malzemelerin yüzey pürüzlülüğünden çok daha iyi olduğunu göstermiştir [20].

Stampfer ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının kriyojenik dik tornalanması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Tornalama deneylerinde, LN₂ destekli kriyojenik soğutmayı kesici takım içerisinde yer alan 1,5 mm çapındaki kanal vasıtasıyla uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlarda, kuru kesme şartlarına göre kriyojenik işlemenin takım-talaş temas uzunluğunu, termal yükleme bölgesini ve yan yüzey aşınma genişliğini etkili bir şekilde azalttığını vurgulamışlardır [21].

Dhananchezian, Inconel 625 alaşımının tornalanmasında kriyojenik soğutmanın takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmıştır. Tornalama deneyleri, kuru ve kriyojenik soğutma şartlarında, kesme hızı (43, 71, 118 m/dak), ilerleme hızı (0,1 mm/dev) ve kesme derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. Kuru kesme şartlarına göre kriyojenik işlemede yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yaklaşık olarak %50,52 azaldığını ve ayrıca, takım aşınmasında da önemli bir azalma olduğunu belirtmiştir [22].

Leadebal Jr ve arkadaşları, AISI D6 çeliğinin sert tornalanmasında yüzey bütünlüğüne kriyojenik soğutmanın etkilerini incelemişlerdir. CBN kesici takımlar ile kuru ve kriyojenik tornalama deneylerini yapmışlardır. Yüzey bütünlüğünü; yüzey pürüzlülüğü ve topografya, mikro sertlik ve kalıntı gerilmeler üzerinden değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, kuru kesme şartlarıyla kıyaslandığında kriyojenik soğutmanın iş parçası yüzey bütünlüğünün değiştirilmesinde önemli bir rol oynadığını, düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri, daha yüksek yüzey mikro sertliği ve artık bası gerilmesi sağladığını göstermiştir [23].

2.3. NİKEL BAZLI SÜPER ALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Korkmaz ve arkadaşları, Nimonic 80A süper alaşımın tornalanmasında kesme kuvvetlerinin sayısal ve deneysel analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, Nimonic 80A süper alaşımı için hesapladıkları Johnson-Cook (JC) parametrelerinin doğruluğunu analiz etmek için hem tornalama deneylerinde hem de sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile belirlenen kesme kuvvetlerine göre Nimonic 80A süper alaşımının işlenebilirliğini değerlendirmişlerdir. Kaplamalı karbür takımlar ile kesme hızı (45, 60, 75 m/dak), ilerleme hızı (0,1 0,2 0,3 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5 1 ve 1,5 mm) gerçekleştirilen tornalama deneylerinde esas kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve radyal kuvvetleri ölçmüşlerdir. Kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etki düzeylerini varyans analizi (ANOVA) ile belirlemişlerdir. Nümerik analizleri, aynı kesme şartlarında ThirdWave Advantedge simülasyon programına JC malzeme modeli parametrelerini girerek gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, deneysel olarak ölçülen kesme kuvveti ile simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet değerleri arasında ortalama %6,45'lik bir fark olduğunu ve buna bağlı olarak Nimonic 80A süper alaşımı için hesapladıkları Johnson-Cook (JC) malzeme modeli parametrelerinin ve kesme simülasyonunun yüksek doğrulukla çalıştığını vurgulamışlardır [24].

Parida ve Maity, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanarak Inconel 718 alaşımının sıcak tornalanmasında kesici takım uç yarıçapının ve işleme parametrelerinin kesme

kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Simülasyonları üç farklı takım ucu radyüsünde (0,4, 0,8 ve 1,2 mm), 40 ve 100 m/dak kesme hızlarında, 0,13 mm/dev ilerleme hızında ve 0,8 mm kesme derinliğinde gerçekleştirmişlerdir. Hem oda hem de 600° C ısıtma şartlarında kesme kuvveti, itme kuvveti, gerilme ve kesme sıcaklığını, DEFORM simülasyon programını kullanarak belirlemişlerdir. Her iki işleme şartında, takım ucu radyüsünün artması ile kesme kuvveti ve itme kuvvetinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, sonlu elemanlar analiz sonuçlarını doğrulamak için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deneysel ve nümerik analiz sonuçları arasında yüksek oranda bir benzerlik olduğunu ifade etmişlerdir [25].

Uçak ve arkadaşları, Inconel 718 süper alaşımın delinmesinde kesme kuvveti, tork ve sıcaklığın nümerik analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. FEM simülasyonlarını, DEFORM 3D simülasyon programında kaplamasız karbür matkap ile 15 m/dak kesme hızında ve 0,02 mm/dev ilerlemede yapmışlardır. Ayrıca, elde edilen maksimum kesme sıcaklığı ve itme kuvveti sonuçlarını doğrulamak için, ANSYS yazılımı yardımıyla bir termal analiz ve Deform 2D kullanılarak bir 2D sonlu eleman modeli analizi gerçekleştirmişlerdir. Tahmin edilen kesme kuvvetleri, torklar ve kesme sıcaklıkları deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Elde edilen sonuçlar, tahmin edilen ve ölçülen kuvvet, tork ve sıcaklık değerleri arasında iyi bir uyum sağlandığını göstermiştir [26].

Özkaya ve arkadaşları, Inconel 718 süper alaşımının içten soğutmalı matkaplarla delinmesinde soğutma sıvısı basıncı ve kanal çapının delik kalitesine ve takım aşınmasına etkisini araştırmışlardır. Deneyleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları kullanarak desteklemişlerdir. Yüksek kesme sıvısı basınçlarının kesme kenarının yakınında daha yüksek akış hızları oluşturması, dolayısıyla daha büyük bir ısı aktarım hızı sağlamasına bağlı olarak takım ömrünün ve ayrıca delik kalitesinin önemli ölçüde artabileceğini ifade etmişlerdir. Deney sonuçları ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları arasında iyi bir uyum olduğunu belirtmişlerdir [27].

Careri ve arkadaşları, doğrudan enerji biriktirme işleminde üretilen Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımının tornalama işleminin sonlu eleman modelini geliştirmek için bir

çalışma gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, doğrudan enerji biriktirme işlemiyle üretilen malzemenin anizotropik davranış sergilemesi, işleme sürecinde malzeme davranışının tahmin edilmesine izin verdiğini değinmişlerdir. Ayrıca, geliştirilen modeli, deneysel olarak elde edilen kesme kuvvetleri ve sıcaklık değerleri ile karşılaştırarak doğrulamışlardır [28].

Biermann ve arkadaşları, Inconel 718 alaşımının delinmesinde kullanılan matkapların kesici kenar tasarımının optimizasyonu için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Takım gerilmelerini ANSYS programını kullanarak hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlarda, 14 mm delme uzunluğundan sonra, matkabin koruyucu kaplamasının kesme kenarında kısmen hasar gördüğünü ve talaşların yan yüzeye yapıştığını ve daha yüksek ilerlemelerde bu yapışmanın arttığını ve ayrıca, bu yapışmaya kesme hızının belirgin bir etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. Yapılan analizler, Inconel 718 alaşımının işlenmesinde kullanılan helisel matkapların kesme kenarlarını etkileyen mekanizmalar hakkında fikir vermektedir. Elde edilen bilgilerin, bir çalışmada, iyileştirilmiş bir kesme sıvısı beslemesi ve takım aşınmasının sınırlandırılması ile ilgili olarak kesici kenar tasarımlarının simülasyon optimizasyonu için kullanılacağını ifade etmişlerdir [29].

Dix ve arkadaşları, yüksek verimlilik için kriyojenik soğutma destekli delme modellemesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Modelleme çalışmalarını, DEFORM 3D simülasyon programında yapmışlardır. Geliştirilen süreç modeli, kriyojenik olarak soğutulmuş bir takımı modellemek için farklı yaklaşımların yeni bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Geliştirilen modeli deneysel olarak elde edilen kesme kuvvetleri ve sıcaklık değerleri ile karşılaştırarak doğrulamışlardır. Verimli bir kriyojenik delme için takım geometrisinde soğutma kanallarının konumlarının etkili olduğunu vurgulamışlardır [30].

Caruso ve arkadaşları, işlem sırasında meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin tahmini için Inconel 718 süper alaşımın işlenmesinde güvenilir bir FE modelini geliştirmek üzerine araştırma yapmışlardır. FE sayısal modelini, simüle edilmiş ve deneysel sonuçlar arasındaki karşılaştırmaya dayalı olarak yinelemeli bir prosedür kullanarak uygun bir şekilde kalibre etmişlerdir. Dahası, Fe sayısal modelinde, nikel

esaslı süper alaşımın ortogonal olarak kesilmesi sırasında dinamik yeniden kristalleşmeyi ve dolayısıyla tane inceltme ve sertlik değişimini simüle etmek için bir kullanıcı alt programı uygulamışlardır. Sırasıyla tane boyutunu ve mikro sertliği tahmin etmek için Zener-Hollomon ve Hall-Petch denklemleri kullanılmışlardır. Elde edilen sonuçlar, simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu ve önerilen modelin yeterliliğini göstermiştir [31].

Parida ve Maity, Inconel 625 süper alaşımının sıcak tornalanmasında kesme kuvvetlerini ve talaş oluşumunu incelemek için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanarak analizler ve deneysel bir araştırma yapmışlardır. Tornalama deneylerini, kaplamasız karbür kesici uç kullanılarak farklı kesme hızlarında ve ısıtma sıcaklıklarında gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, deneyler DEFORM 3D yazılımında kesme simülasyonları ile desteklemiştir. Elde edilen sonuçlarda, Oda sıcaklığına kıyasla ısıtma koşullarında kesme kuvvetinde ve takım aşınmasında önemli bir azalma olduğunu belirlemişlerdir. 600° C sıcaklıkta sürekli talaş oluşurken oda sıcaklığında testere dişi talaş oluştuğunu gözlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen kesme kuvvetleri ve talaş morfolojisi ile simülasyon sonucunda elde edilen veriler arasında önemli bir benzerlik olduğunu ifade etmişlerdir [32].

Tamang ve arkadaşları, Inconel 718 süper alaşımının yüksek hızda işlenmesinde kesme kuvvetinin nümerik analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kesme kuvvetlerinin nümerik analizini, DEFORM 3D simülasyon programında yapmışlardır. Sonuçlara göre, talaş derinliği ve ilerleme hızının artması ile kesme kuvvetinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, deneysel olarak ölçülen kesme kuvveti ile nümerik analizler sonucunda elde edilen kuvvet değerleri arasında iyi bir uyum olduğunu vurgulamışlardır [33].

2.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ ÖZETİ

Literatür araştırmaları incelendiğinde, nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 718 süper alaşımıyla ilgili işlenebilirlik, optimizasyon ve modelleme çalışmaları üzerine yoğunlaşıldığı gözlenmiştir. Ancak, Inconel 625 süper alaşımının işlenebilirliğinin

kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması bakımından detaylı incelenmesi üzerine çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür.

Talaşlı imalatta kesme parametrelerinin seçimi ile ilgili karar, işleme sürecinde olası sorunları tespit etmek ve kesme verimliliği için son derece önemli olduğu bilinmektedir. Endüstriyel uygulamalarda işleme şartları ile ilgili parametreler deneme yanılma yoluyla ya da operatörün deneyimine göre seçilmektedir. Deneme ve yanılma yöntemindeki yinelemeler, takımlama maliyetlerini ve işleme zamanını artırdığı için bu uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmemektedir. Bu olumsuzlukları gidermek için kesme işleminin nümerik olarak modellenmesi ve endüstriyel uygulamalar için optimizasyon teknikleri kullanılarak optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi, alternatif bir çözüm yöntemi olarak uygulanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemine (FEM) bağlı olarak kesme işleminin nümerik olarak modellenmesi, bilim insanları tarafından talaş kaldırma mekaniğinin daha iyi anlaşılmasına imkân sağlamaktadır. Deneysel yöntemler ile belirlenmesi özel ölçüm ekipmanları gerektiren, kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri ve gerilme gibi önemli parametreler yüksek doğrulukta daha kolay belirlenebilmektedir. Metal kesme işlemlerinde önemli kesme işlemi (kesme kuvvetleri, gerilme) faktörlerinin önceden tahminiyle, endüstriyel uygulamalar için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesine, özel mühendislik uygulamaları için takım tasarımına ve takımlama maliyetlerinin azaltılmasına önemli katkı sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada, literatür çalışmalarından farklı olarak işlenmesi zor olan Inconel 625 süper alaşımında işlenebilirlik deneyleri yapılacaktır. Tornalama deneylerinde elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri değerlendirilecek ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak bu alaşımın kesme mekaniğinin anlaşılmasına katkı sağlanacaktır. Öncelikle kesici takımlara kriyojenik soğutma işlemi uygulanacak ve takım yapısındaki değişimler incelenecektir. Daha sonra, Inconel 625 süper alaşımının tornalama deneylerinde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü bakımından kriyojenik soğutma işlemi uygulanan kesici takımların performansı değerlendirilecektir. Sonrasında, Deform 3D simülasyon programına Inconel 625 alaşımının Johnson-Cook malzeme model parametreleri girilerek aynı kesme

şartlarında tornalama simülasyonları gerçekleştirilecektir. Deneysel olarak ölçülen kesme kuvveti ve takım aşınması değerleri ile nümerik analizler sonucunda elde edilen kesme kuvveti ve takım aşınması değerleri kıyaslanacaktır. Son olarak, Minitab istatistiksel analiz programında Taguchi metodu kullanılarak optimum kesme parametreleri belirlenecek ve regresyon analizleri ile kesme kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü için tahmin denklemleri oluşturulacaktır. Özellikle, havacılık ve uzay sanayinde kullanılan bu malzemenin kesme sürecinin analizi ile literatüre inovatif veri sağlanması amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 3

KURAMSAL TEMELLER

3.1. SÜPER ALAŞIMLAR

Süper alaşımlar; özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışmak üzere tasarlanmış ana yapısı demir, nikel ya da kobalt olan metalik bir alaşım grubudur. Bu alaşımlar, çok yüksek sıcaklıklarda sıcak sertlik, yüksek mukavemet, iyi yorulma, sürünme ve korozif ortamlarda mükemmel oksidasyon direnci, üstün termal yorulma mukavemeti ve boyutsal kararlılığını koruyabilme gibi üstün özelliklere sahiptirler. Diğer havacılık malzemelerine kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kabiliyeti süper alaşımları çekici bir malzeme haline getirmektedir [34, 35].

Bu üstün özelliklerinden dolayı süper alaşımlar savunma, havacılık, denizaltı ve nükleer endüstrilerde; reaktör konsepti, denizaltı haberleşme kablolarının kılıflanması, gaz türbinleri ve roketlerdeki tahrik sistemleri gibi kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle hava araçlarının tahrik sistemlerinde; gaz üreticinin bileşenleri olan kompresör, yanma odası ve türbinlerde yer alan türbin kanatları, diskler, son yakıcılar ve itme ters çeviricileri gibi yapısal elemanların üretiminde kullanılmaktadır [36]. Türbin kanatları önemli bir elemandır ve çalışma esnasında yüksek basınç ve ani sıcaklık değişimlerinden dolayı en yüksek zorlanmaya maruz kalan türbin parçasıdır. Çalışma şartlarına uygunluk için türbin kanatlarının sıcak sertliğinin, termik yorulma dayanımının ve sünekliğinin yüksek olması gerekmektedir [37]. Ayrıca, yanmaya bağlı olarak meydana gelen çukurlaşma ve çatlak korozyonuna karşı kanat malzemesinin korozyon direnci de yüksek olmalıdır. Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise kolay şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilirliktir [38]. Ayrıca süper alaşımın en iyi kullanım sıcaklığı $0,8T_{ergime}$ olarak tanımlanmalıdır [39]. Süper alaşımlar demir esaslı, kobalt esaslı ve nikel esaslı olmak üzere üç ana başlık altında ele alınmaktadır.

3.1.1. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Demir bazlı süper alaşımlar, östenitik paslanmaz çeliklerden geliştirilmişlerdir. Temel olarak yapısında %15 ile %60 arasında demir %25 ile %45 arasında nikel ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncini arttırmak için %15 ile %28 arası krom ve çok az miktarda molibden ya da tungsten bulunmaktadır. Bu malzemede mukavemet artışı hem katı çözelti sertleşmesi hem de metallar arası çökeltilerle sağlanmaktadır. Demir esaslı süper alaşımlar, maksimum 550-650°C civarında kullanım alanına sahip olduğundan yüksek sıcaklıkta mukavemeti, nikel esaslı ve kobalt esaslı süper alaşımlara göre daha az olduğu bilinmektedir. [34,40].

Demir esaslı bir süper alaşım olan A-286, gaz türbin motorlarında, türbin disk ve mafsallarında, türbin yuvaları ve buhar türbinlerindeki parçaların bazılarında kullanılmaktadır [41].

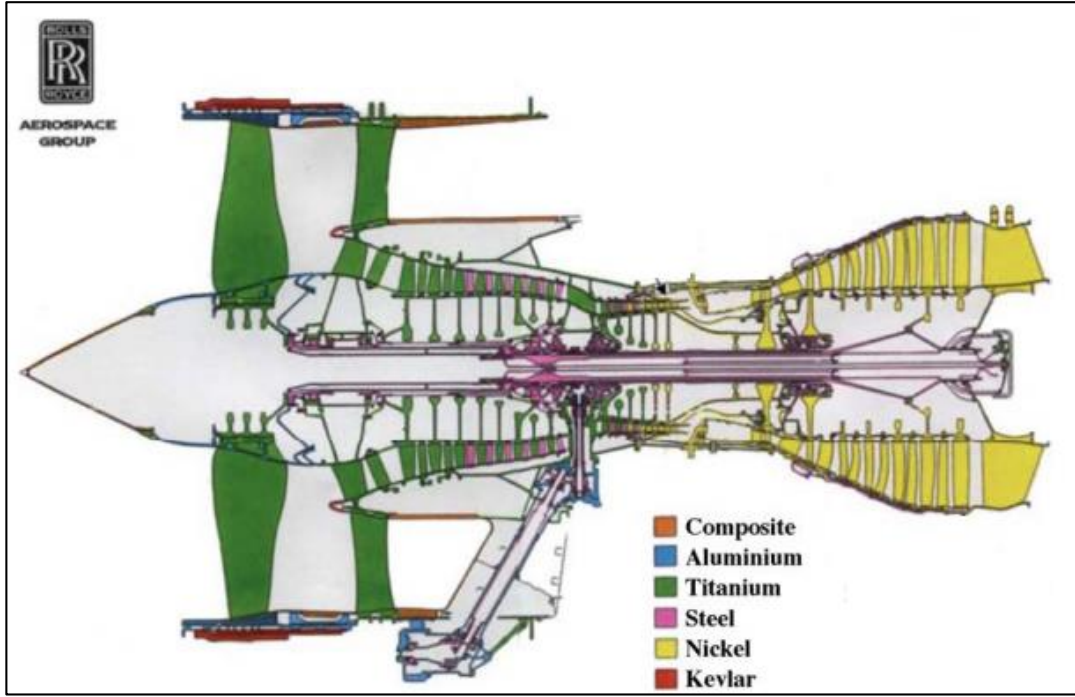
3.1.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Kobalt, Oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal (SPH) yapıya sahip olan ergime sıcaklığı 1495 °C ve yoğunluğu 8,90 g/cm³ olan bir elementtir. 370° C'de yüz merkezli kübik (FCC) kafes yapıya dönüşmektedir. Kobalt esaslı süper alaşımlar, temel bileşen olarak kobalt ve önemli miktarlarda krom, tungsten, nikel ve daha az miktarlarda molibden, niyobyum, tantal, titanyum ve duruma göre demir içeren alaşımlardır [42]. İlk kez ikinci dünya savaşı sırasında, yüksek gerilmeler altında çalışan gaz türbin bıçaklarında kullanılmıştır. Kobalt esaslı süper alaşımlar; nispeten düşük gerilmelerde ve yüksek sıcaklıklarda uzun ömürlü olması istenen statik parçalarda kullanım alanı bulmuşlardır [34,43].

Haynes 25, kobalt-nikel-krom bileşimiyle mükemmel bir yüksek sıcaklık dayanımı sağlamaktadır. Bu alaşım 950° C'ye kadar iyi bir oksidasyon direnci sergilemektedir. Katı çözelti sertleşmesi ile güçlendirilmiş bir süper alaşımdır ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımının iyi olduğu bilinmektedir. Özellikle 650 °C – 980 °C sıcaklıklarda uzun süreli uygulamalarda (türbin kanatları, yanma odaları, brülörden ve türbin halkaları gibi) özelliğini kaybetmeden oldukça etkili kullanılmaktadır [44].

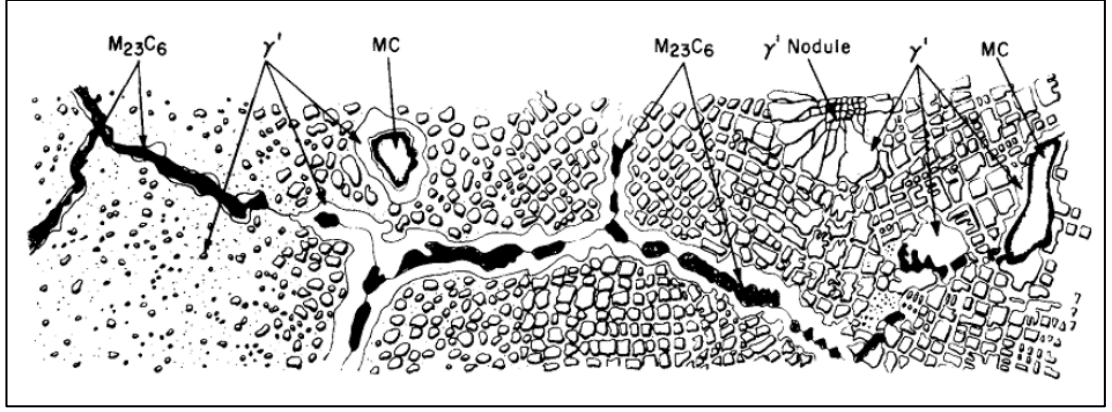
3.1.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Yüksek sıcaklık alaşımlarından birisi olan nikel esaslı süper alaşımlar, endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın kullanılmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlar; genellikle havacılık ve enerji türbinlerinin bileşenlerinde, petrokimya, gıda işleme, nükleer reaktör gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. İleri teknoloji hava taşıt motorlarının %50'sini nikel esaslı süper alaşımlar oluşturmaktadır. 800 ila 1000° C'de arasında uzun süre çalışabilme kabiliyetleri bu alaşımları gaz türbinlerinin en sıcak bölümleri için uygun kılmaktadır [34,45]. Şekil 3.1'de Trent 800 turbojet motorunda nikel esaslı alaşımların kullanımı görülmektedir.



Şekil 3.1. Trent aero motorunda kullanılan malzemeler [46].

Nikel esaslı süper alaşımların mikroyapısı; diğer tüm fazların bulunduğu ana faz olan ' γ ' ile gösterilen gama fazı ile yüz merkezli kübik (FCC) yapıya sahip östenitik matristen oluşmaktadır [34]. Nikel esaslı süper alaşımlar; yüzey merkezli kübik (FCC) matriste intermetalik bileşik oluşumuyla, katı çözelti sertleşmesi veya çökeltme sertleşmesi ile güçlendirilebilmektedir [47]. Şekil 3.2'de nikel esaslı süper alaşımların mikroyapısında bulunabilen fazların şematik görünüşü yer almaktadır.



Şekil 3.2. Nikel esaslı süper alaşımların mikroyapısında oluşabilen fazlar [34].

Nikel esaslı süper alaşımların yapısında %50-70 Ni bulunmaktadır. Cr, Al, Ti, Nb, Fe, Co, Mo, W, Ta, V, B, Zr ve C kullanılan temel alaşım elementleridir. Cr, ilavesi öncelikli olarak korozyon ve oksidasyon direncini artırır ve ayrıca çökeltme sertleşmesi sağlayan krom karbürleri de oluşmaktadır. Al, Ti ve Nb mukavemet artırıcı elementlerdir. Nb, yapıda Ni_3Nb formunda birincil gama (γ') fazı çöktürmektedir. Al, alaşım yüzeyinde dayanıklı bir oksit tabaka oluşturarak yüksek sıcaklık oksidasyon direncini geliştirmektedir [34,47].

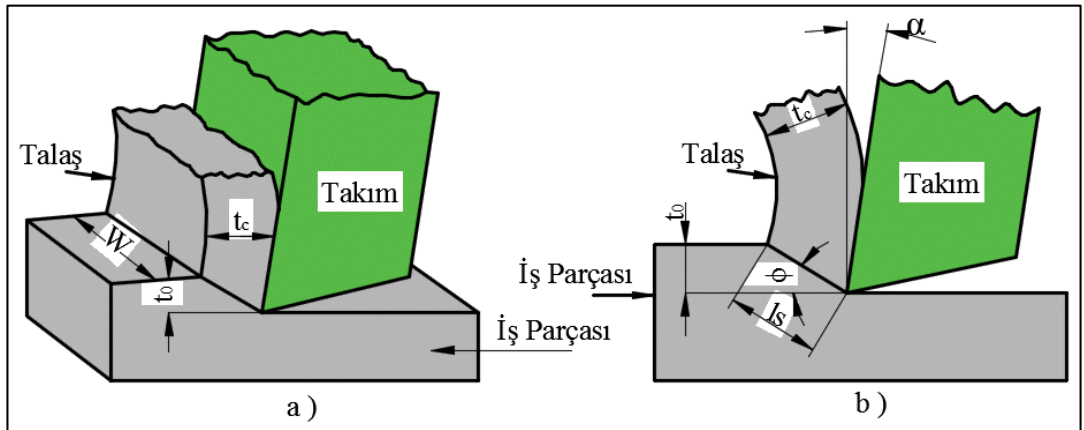
Inconel 625, nikel esaslı süper alaşımlar arasında en yaygın kullanılan malzemelerden birisi olarak bilinmektedir. Bir diğer ismi ise NiCr22Mo9Nb olarak gösterilmektedir. Inconel 625 alaşımı, hem çok yüksek $1000^\circ C$ gibi sıcaklıklarda hem de çok düşük sıcaklıklarda (kriyojenik sıcaklıklarda) süper mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Ayrıca, Inconel 625 süper alaşımı, nitrik asit, fosforik asit, hidroklorik asit gibi oldukça ekstrem asitlere karşı oldukça iyi bir dayanım göstermektedir [48].

Inconel 625 süper alaşımı genellikle yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin, çok yüksek gerilim uygulanan denizcilik araçlarında ve parçalarında, petrol ve gaz üretiminde offshore petrol platformlarında, kimyasallarla temas eden çeşitli yüzeylerde, havacılık ve uzay sanayinde ve nükleer reaktörlerde kullanılmaktadır [48].

3.2. TALAŞLI İMALAT

3.2.1. Talaş Kaldırma Mekanikliği ve Talaş Oluşumu

Talaşlı imalat işlemi gerçekte üç boyutlu ve oldukça karmaşık olduğu için talaşlı kaldırma mekaniğinin tanımlanmasında Şekil 3.3’de verilen iki boyutlu dik kesme (orthogonal) modeli kullanılmaktadır. Bu model talaşlı imalat işleminin analizinde önemli bir rol oynar ve talaş kaldırma mekaniğini yeterli doğrulukta tanımlamaktadır. Dik kesme modeline göre, talaş oluşumu, iş parçası malzemesinde daha sert kesici takımın iş parçasına nüfuz etmesi, iş parçası tarafında kesici takıma uygulanan kuvvetin yeterli olması ve kayma düzleminde iş parçasının kayma gerilmesinin aşılmasıyla gerçekleşmektedir [49,50].



Şekil 3.3. Dik kesme modeli [49].

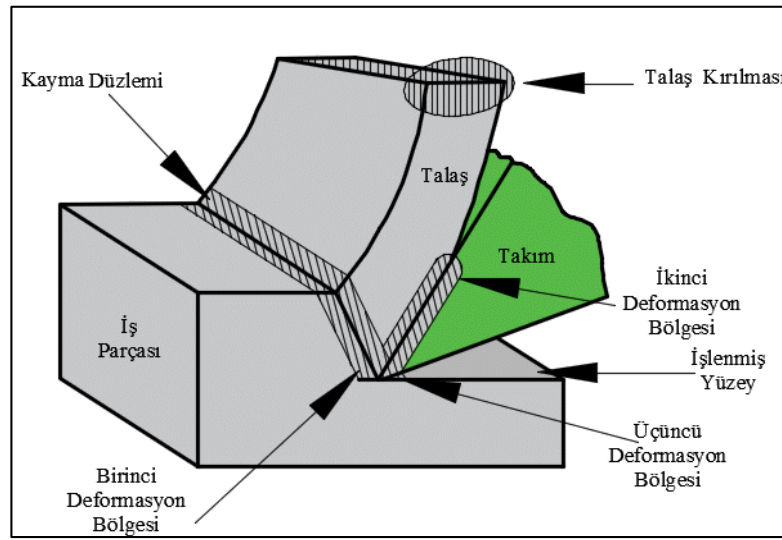
t_o : deforme olmamış talaş kalınlığı l_s : kayma düzlemi uzunluğu

t_c : deforme olmuş talaş kalınlığı ϕ : kayma düzlemi açısı

w : iş parçası genişliği α : kesici takım talaş açısı

Esas olarak, talaşlı imalat işlemlerinde talaş oluşumu, plastik deformasyonun önemli derecede rol oynadığı bir işlemdir. İş parçasının kesici takım önündeki bölgesel deformasyonu ile çok dar bir bölgede meydana gelen ve kayma düzleminde oluşan bölgeye birinci deformasyon bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Kesici takım ve iş parçası arasındaki nispi hareket sonucunda iş parçasında oluşan gerilme, iş parçasını

birinci deformasyon bölgesinde plastik deformasyona uğratarak talaş oluşumunu meydana getirmektedir. İş parçasından kaldırılan katman, takım talaş yüzeyi üzerinden geçerken kayma ve yapışma ile ikinci kez deformasyona uğrar ve bu bölge ikinci deformasyon bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Talaş kaldırılan yüzey ile kesici takımın yan yüzeyinin teması ile meydana gelen sürtünmenin etkisi ile oluşan bölge üçüncü deformasyon bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Üçüncü deformasyon bölgesi, iş parçasının yüzey kalitesinin etkilendiği bölge olarak tanımlanmaktadır [51,52]. Şekil 3.4’de talaş oluşumu görülmektedir.

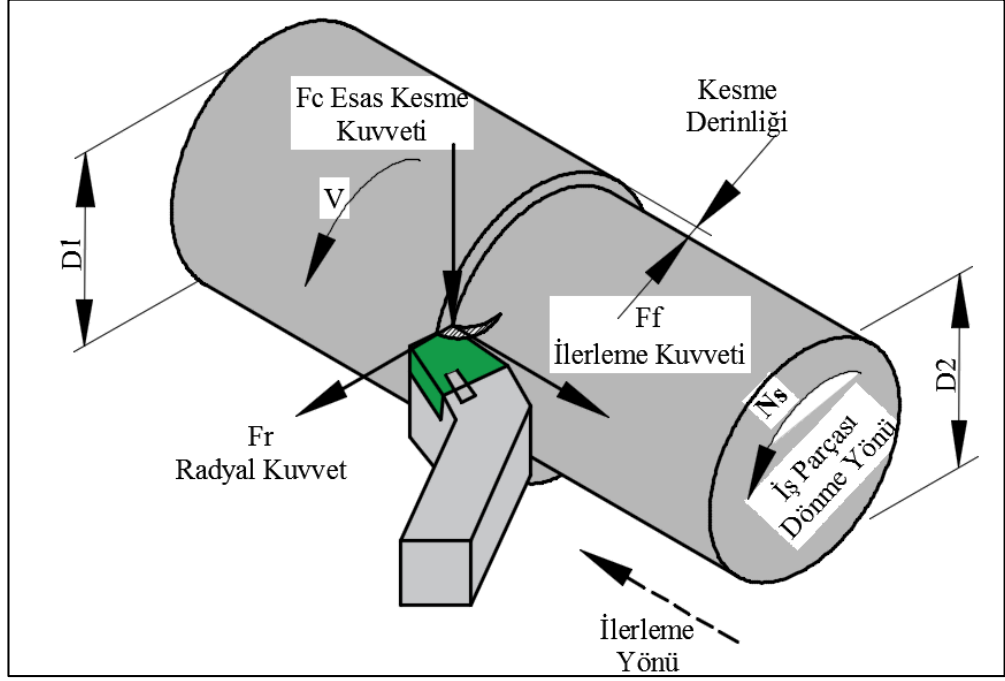


Şekil 3.4. Talaş oluşumu [53].

3.2.2. Kesme Kuvvetleri

Talaş kaldırma esnasında oluşan kesme kuvvetleri, kesme performansına, işlenen yüzeyin kalitesi ve birim parça maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Kesme kuvvetleri aynı zamanda takım tezgâhlarının tasarımında, titreşimsiz ve rijit tezgâhların üretilebilmesi için de dikkate alınmaktadır. Ayrıca, iş parçasından talaş kaldırılma esnasında takım tezgâhının harcadığı enerji belirlemek içinde kullanılmaktadır [2,53,54]. Tornalama işleminde meydana gelen kesme kuvvetleri Şekil 3.5’te şematik olarak gösterilmiştir. Kesici takım üzerine etki eden bu kuvvetler, talaş oluşumunun önemli bir aşamasını meydana getirmektedir. Esas kesme kuvveti olarak isimlendirilen (F_c): kesme hızı yönünde etki eden ve metal kesme işleminde güç ihtiyacını belirlemek için önemlidir. İlerleme kuvveti (F_f): kesici

takımın ilerlemesi yönünde etkiyen kuvvettir ve kesme kuvvetinin yaklaşık %50'si kadardır. Son bileşen, radyal (pasif) kuvvet (F_r): işlenen yüzeye dik etkiyen kuvvettir ve ilerleme kuvvetinin yaklaşık %50'si kadardır [55].



Şekil 3.5. Tornalama işleminde kesme kuvvetleri [55].

Bileşke kuvvet, bu üç kuvvetin vektörel olarak toplanması ile elde edilmektedir. Aşağıda yer alan Eşitlik 3.1 ile hesaplanır.

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_r^2} \quad (3.1)$$

İmalatın uzun ömürlü, kaliteli, emniyetli ve ekonomik olabilmesi için, etkiyen tüm kuvvetlerin düzgün bir şekilde ölçülmesi gerekir. Bu nedenle, kesme kuvvetlerini belirlemek için dinamometreden alınan ölçümler kullanılmakta ve ayrıca bu ölçümlere bağlı olarak matematiksel modeller geliştirilmektedir.

3.2.3. Isı ve Sıcaklık

Metallerin kesme işleminde kullanılan gücün hemen hemen tamamına yakın bir kısmı uç yakınında ısıya dönüşür. Bu nedenle kesme bölgesinde ısı oluşumu ve sıcaklık talaş kaldırma işlemindeki diğer bir önemli faktördür. Kesici takım performansı ve iş parçası kalitesi bakımından oluşan ısının analizi önem arz etmektedir [56].

Metal kesme işleminde oluşan ısı takım ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Oluşan ısının çoğu kesme bölgesinden ideal olarak talaşla uzaklaştırılmaktadır. Uzaklaştırılan ısının miktarı iş parçası malzemesi, işleme parametreleri, kesici takım malzemesi ve geometrisi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Oluşan ısının iş parçasına ya da kesici takıma yüksek miktarlarda nüfus etmesi kesme işleminin verimini düşürmektedir [56].

Kesme hızının, kesme işlemi esnasında oluşan ısıyı önemli derecede etkilediği bilinmektedir. Kesme hızının artmasıyla metal kesme işlemindeki deformasyon ve sürtünme için kullanılan birim zamandaki enerji artar ve bu da ısıyı ve dolayısıyla sıcaklığı artırmaktadır. Aşırı sıcaklık, takım ömrünü ve kesme hızını sınırlandıran ana etkenlerden biridir. Bu bağlamda, kesici takım imalatçıları malzeme sektöründeki gelişmelere bağlı olarak kesici takımların yüksek sıcaklıklarda sıcak sertlik özelliğini koruyabilme kabiliyetinin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır [56].

3.2.4. Talaşlı İmalatta Yüzey Kalitesi

Talaşlı imalat yöntemleriyle bir parçanın imal edilmesinde ölçü tamlığı ve yüzey kalitesi önemli hususlar olarak görülmektedir. İmal edilecek olan parçanın kalite bilgileri bu hususlar üzerinden toleranslar çerçevesinde tayin edilmektedir. Bu noktada imal resimlerinin oluşturulmasında kullanılan yüzey işleme işaretleri, boyut ve şekil toleransları ile parçanın işleme kalitesinin nasıl oluşturulacağı belirtilmektedir. Özellikle, yüzey kalitesi korozyon direncinin, yorulma dayanımının ve aşınma ömrünün arandığı uygulamalarda önem arz etmektedir. Dahası, yüzey kalitesi çalışma şartlarında bir parçanın sürtünmesine sebep olan temas, aşınma, ışık yansıtma, ısı iletimi, yağ filminin tutulması ve dağıtılması kabiliyeti, kaplama veya direnç ömrü gibi

parçaların çeşitli fonksiyonel özelliklerini de etkilemektedir [57]. Bu yüzden, bir parçanın imal aşamasında istenilen kaliteyi elde edebilmek için işleme esnasında yüzey pürüzlülüğü üzerinde doğrudan etkiye sahip olan kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve takım geometrisi gibi parametrelerin ideal seviyelerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

3.3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi, bir elemanın mekanik stres, titreşim, dinamik yükleme, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği gibi birçok fiziksel faktörden etkilenme davranışını öngörmeye yarayan ve bu mühendislik problemlerine çözüm elde etmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. Yöntem matematikle birlikte karmaşık sistemlerin ayrıklaştırılarak daha doğrusu elemanlarına ayrılması ile hesaplanması ilkesine dayanmaktadır.

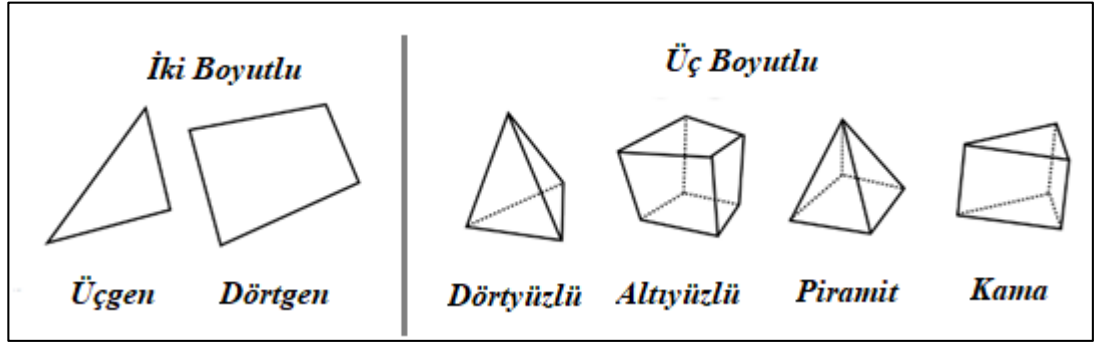
Mühendislik problemlerinin çözümünde temel düşünce karmaşık bir fiziksel problemin matematiksel modellerini ele alarak bir çözüm bulmaktır. Bu noktada fiziksel modellerin başlangıç ve sınır koşullarının tam olarak bilinmemesi, doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler oluşturduğundan çözülmesi imkansızdır ve gerçeği yansıtan matematiksel modelleri oluşturmak mümkün değildir. Bu nedenle mühendislik problemlerinin çözümünde sayısal yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas bir şekilde çözülmesinde etkin olarak kullanılan sayısal bir yöntemdir. Temel olarak analizi yapılacak elemanı birbirine düğüm noktaları ile bağlı olan küçük bölgelere bölerek bilinmeyenleri belli sayıda olan elemanlar topluluğu oluşturulur ve bilinen bir noktadan tanımlamalar yapılarak bilinmeyen diğer düğüm noktaları çözümlenmektedir. Burada her bir düğüm bir matrisi ifade eder ve böylelikle analiz türüne göre oluşturulmuş ana denklemin çözümü yaklaşık olarak tahmin edilmektedir [37,58].

Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler bu yöntemin mühendislik uygulamalarında kullanımını artırmıştır. Karmaşık ve deneysel yöntemler ile analiz edilmesi pahalı olan

makine elemanlarının kolay bir şekilde analiz edilmesine ve ayrıca, mekanik davranışlarının optimizasyonuna olanak sağlamaktadır [37].

3.3.1. Ağ Yapıları

İyi bir sonlu elemanlar analizi için mesh yapısı oldukça önemlidir ve bu noktada oluşacak eksiklikler hatalar meydana getirebilir. Çözülünecek probleme göre ağ yapısı farklı olabilmektedir. Şekil 3.6’da çeşitli mesh tipleri yer almaktadır. Örneğin bir ısı transferi analizi için kullanılan ağ elemanları ile bir mekanik stres analizi için kullanılan ağ elemanları birbirinden farklı olabilmektedir. Bu bağlamda Deform 3d programında talaş kaldırma işleminde, kayma mekanizmasının modellenmesinde üç boyutlu 10 düğümlü kuadratik dört yüzlü eleman kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Çeşitli mesh tipleri [59].

3.3.2. Malzeme Yapısal Denklemleri

Yapısal Denklemler, statik ve dinamik yükler altında malzemelerin yapısal davranışlarının ve plastik kararsızlık durumlarını ilişkilendirmek için geliştirilmiştir. Deneysel yöntemler ile farklı gerinim hızlarında ve sıcaklıklarda malzemelerin mekanik davranışlarını belirlemek pahalı ve zaman almaktadır. Mühendislik problemlerinin (gerilme, ısı geçişi ve akış analizi gibi) çözümünde sayısal yaklaşımlara ihtiyaç duyulur ve bu malzeme modelleri çözümlemede kullanılan temel araçlardır. Analizlerde yaygın olarak Von Mises, Oxley, Johnson-Cook (JC), Cowper-Symonds (CS) ve Zerilli-Armstrong (ZA) malzeme modelleri kullanılmaktadır.

3.3.2.1. Johnson-Cook Modeli

Bu kısımda kesme simülasyonlarında kullanılan Johnson-Cook (JC) malzeme yapısal denklemi incelenmiştir. Bu malzeme modeli, özellikle metallerin yüksek deformasyon hızının modellenmesi için uygundur. Johnson-Cook (JC) malzeme modelinde akma gerilmesinin Eş. 3.2'deki biçimde olduğu varsayılmaktadır.

$$\sigma^0 = (A + B(\varepsilon^p)^n) \left(1 + C \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\varepsilon_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^m\right) \quad (3.2)$$

A: akma gerilmesi B: gerinim sertleşmesi C: gerinim hızı sabiti
n: gerinim sertleşme sabiti m: ısıl yumuşama sabiti ε^p : eşdeğer plastik gerinim
 ε^p : plastik gerinme oranı ε_0 : referans gerinim oranı T_r : oda sıcaklığı
 T_m : erime sıcaklığı T: referans sıcaklığı

Eşitlik 3.2'deki ilk parantez, referans gerinim hızında gerinim fonksiyonu olarak izotermal gerilmeyi vermektedir. İkinci parantez, gerinim hızı etkisini, son parantez ise termal etkileri kapsamaktadır [60].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. DENEY MALZEMESİ

Bu çalışmada Inconel 625 süper alaşımı deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Nikel esaslı bir süper alaşım olarak bilenen Inconel 625 süper alaşımı, Birçelik Paslanmaz Çelik Tic. A.Ş'den 25.4 mm çapında çubuk şeklinde temin edilmiştir. Inconel 625 süper alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Inconel 625 süper alaşımının % kimyasal bileşimi.

Ni+Co	C	S	Mn	P	Si	Cr	Mo	Ti	Al	Diğerleri
58	0.1	0.015	0.46	0.002	<0.5	20-23	8-10	<0.4	<0.4	<0.5

4.2. DENEY MALZEMESİNİN İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİ

Inconel 625 süper alaşımının işlenebilirliği; kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü bakımından incelenmiştir. Tornalama deneylerinde esas kesme kuvveti (Fc), ilerleme kuvveti (Ff) ve radyal kuvvet (Fr) deneysel olarak ölçülmüştür. Her bir tornalama işlemi sonrası oluşan yüzeyler üzerinden yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır.

4.2.1. Takım Tezgâhı

İşlenebilirlik deneyleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan ALEX TECH ANL-75T, C eksenli CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Takım tezgâhı, 15 kW iş mili motor gücüne sahiptir.

4.2.2. DeneYlerde Kullanılan Kesici Takımlar ve Kesme Parametreleri

İşleme deneYlerinde, kesici takım olarak Kennametal firması tarafından K68 (Kaplamasız), KC5010 (PVD AlTiN kaplamalı) ve KCM15 (MTCVD-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı) kesici takım kalitesi olarak kodlanan ve CNMG080404B formunda temin edilen karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takımlar, PCLNR 2525M-12 kodlu takım tutucuya rijit bir şekilde mekanik olarak bağlanmıştır.

4.2.3. DeneYlerde Kullanılan Kesme Parametreleri

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etkisini belirleyebilmek için beş farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme miktarı ve talaş derinliğinde tornalama deneYleri yapılmıştır. Bu faktörlerin seviyeleri üretici takım firmasının önerileri ve literatürde nikel esaslı süper alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. DeneYlerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.2’de yer almaktadır.

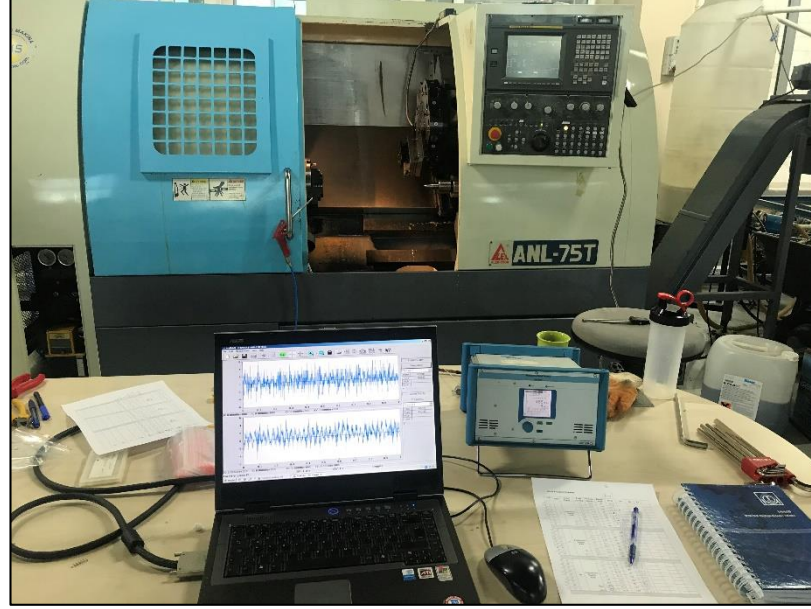
Çizelge 4.2. DeneYlerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Kesme Parametreleri	Seviye				
		I	II	III	IV	V
Vc	Kesme hızı (m/dak)	60	90	120	150	180
f	İlerleme miktarı (mm/dev)	0,12	0,18	0,24	-	-
a	Talaş derinliği (mm)	0,5	0,1	1,5	-	-

4.2.4. Kesme Kuvveti Ölçümü

DeneY malzemelerinin tornalama metoduyla işlenmesinde oluşan üç kuvvet bileşeni; esas kesme kuvveti (Fc), ilerleme kuvveti (Ff) ve radyal kuvvet (Fr), KISTLER 9257B tipi piezoelektrik dinamometre ile ölçülmüştür. Kuvvet ölçüm sistemi; dinamometre, Kistler 5070 yükseltici, veri toplama kartı ve kesme kuvveti sinyallerinin toplanması için CUTPRO® yazılımından oluşmaktadır. Ölçüm sisteminde öncelikle dinamometre Kistler 5070 yükselticiye bağlanır. Bu bağlantının ardından yükselticinin çıkışında yer alan kuvvet kanalları sinyal iyileştirme cihazının ilgili kanallarına bağlanır.

Sonrasında, Sinyal iyileştirme cihazı veri toplama kartına bağlanır ve bilgisayar aracılığıyla CUTPRO® yazılımının MALDAQ modülü ile kesme kuvveti sinyalleri analiz edilmektedir. Şekil 4.1’de CNC torna tezgâhı ve test düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.1. CNC torna tezgâhı ve test düzeneği.

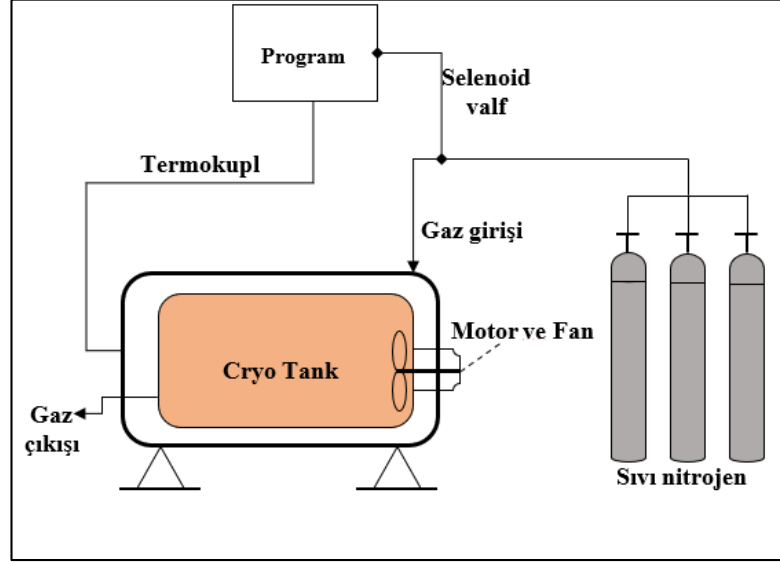
4.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Her bir tornalama deneyi sonrası oluşan işlenmiş yüzeyler üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri HOMMEL Tester T 500 cihazı ile yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümlerinde örnekleme uzunluğu (λ) 0,8 mm ve ölçme uzunluğu (L) 5,6 mm seçilmiştir. Ölçümler iş parçası eksenine paralel olacak şekilde ve işleme alanında iş parçası kendi ekseninde 120° döndürülerek üç farklı yüzeyden ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri hesaplanmıştır.

4.3. KRIYOJENİK İŞLEMİN UYGULANMASI

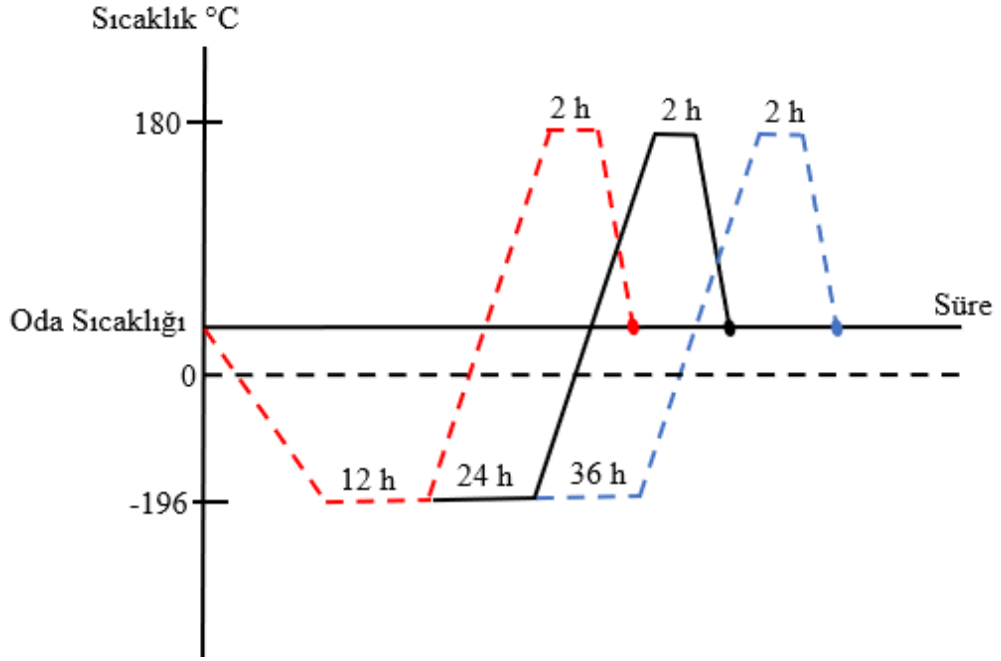
Kesici takımlara kriyojenik işlem sıg ve derin olmak üzere iki ana kategoride uygulanmıştır. Şekil 4.2’de kriyojenik işlemin uygulandığı fırının şematik görünümü yer almaktadır. Bu sistemde izole bir kutu (kriyo kutusu), sirkülasyon fanlı bir motor,

bir sıcaklık kontrolörü (PLC kontrollü) ve programlayıcıya bağlı kutunun içindeki kriyojenik sıcaklığı ölçmek için bir termokupl, bir sıvı nitrojen tankı ve gaz girişi kontrollü için bir solenoid valf'den oluşmaktadır.



Şekil 4.2. Kriyojenik soğutma sisteminin şematik görüntüsü.

Kesici takımlar oda sıcaklığından -80°C 'ye ve -196°C 'ye $2^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ soğutma hızı ile kademeli olarak soğutulmuştur. Bu aşamada 12 saat beklenmiş ve kesici takımların bir kısmı çıkarılmıştır. Bu işlem 36 saat ulaşana kadar her 12 saatte tekrarlanmıştır. Sonrasında kesici takımlar, $2^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızı ile kademeli olarak oda sıcaklığına getirilmiştir. Böylelikle kesici takımlara -80°C 'de 12 ve 24 saat süreyle bekletilerek sığ kriyojenik işlem uygulanılır iken -196°C 'de 12, 24 ve 36 saat süreyle bekletilerek de derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kriyojenik işlemin ardından 180°C 'de 2 saat bekletmek suretiyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işlemine ait işlem döngüsü Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Kriyojenik işlem ve temperleme işlemine ait işlem süreci.

4.4. DENEY TASARIMI

Son yıllarda, Taguchi metodu üretim ve test maliyetlerini düşürmesi sebebiyle mühendislik uygulamalarında optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyecek olan etkin kesme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla kesici takım malzemesi, kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği dikkate alınacak parametreler olarak belirlenmiştir. Minitab 17 paket programında deney tasarımı, varyans (ANOVA) ve regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, doğrulama testleriyle kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü için geliştirilen matematiksel tahmin modellerinin doğruluğu kontrol edilmiştir.

4.5. KESME SİMÜLASYONLARI

Bu bölümdeki amaç deneysel olarak ölçülen kesme kuvvetleri ile kesme simülasyonları sonucundan elde edilen kesme kuvvetlerini kıyaslamaktır. Bu bağlamda, sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak kesme simülasyonlarının yapılabildiği Deform 3D programı kullanılarak Inconel 625 süper alaşımının

tornalanmasında meydana gelen kesme kuvvetleri nümerik olarak analiz edilmiştir. Tornalama simülasyonları, işleme deneylerinde kullanılan kesme parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte yapılan işlemler aşağıda açıklanmıştır.

İdeal eleman boyutunun belirlenmesinde ön çözümlene denemeleri yapılmıştır. Bu noktada eleman boyutu 0,2 mm olarak belirlenmiştir. Uygun eleman boyutunun belirlenmesinde eleman boyutu artırılarak (0,1 0,2 0,3 ve 0,4 mm) deneysel olarak ölçülen kesme kuvvetine bağlı olarak kıyaslamalar yapılmıştır. Kıyaslamalarda kesme kuvvetindeki değişim ve simülasyon süresi dikkate alınmıştır. Sonuç olarak 0,1 mm eleman boyutu ve 0,2 mm eleman boyutu arasında kesme kuvvetinde kayda değer bir değişim olmadığı ve 0,2 mm eleman boyutunda simülasyon süresinin kısaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle ideal eleman boyutu 0,2 mm olarak seçilmiştir.

4.5.1. İş Parçası Malzemesinin Tanımlanması

Programın çözüm aşamasından önce iş parçası malzemesinin, kesici takım malzemesinin, ağ yapılarının ve işleme parametrelerinin tanımlanması yapılması gereken işlemlerdir. İlk olarak, iş parçası malzemesi tanımlanmıştır. Akma gerilmesinin tanımlanmasında yüksek gerinim hızı deformasyonlarının modellenmesinde kullanılan Johnson-Cook malzeme yapısal denklemi kullanılmıştır. Kullanılan malzeme modeli sabitleri literatür taraması sonucu belirlenmiştir. Belirlenen malzeme modeli sabitlerinin uygunluğu ön tornalama simülasyonu ile analiz edilmiştir. Çizelge 4.3’de Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri verilmiştir [61,62].

Çizelge 4.3. Inconel 625 süper alaşımı için Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri.

A	B	n	C	m	T _{ref} (°C)	T _m (°C)	ε ₀ (s ⁻¹)
558.8	2201.3	0.8	0.000209	1.146	23	1350	1670

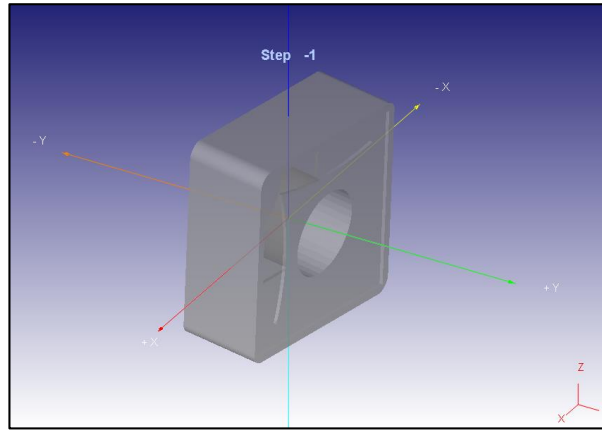
Inconel 625 süper alaşımının tanımlanmasında literatürde yapılan çeşitli çalışmalardan, üretici firma tarafından sunulan mekanik özelliklerden ve programın iş parçası kütüphanesinden yararlanılmıştır [65]. Çizelge 4.4’de simülasyonlarda kullanılan çeşitli malzeme özellikleri yer almaktadır [48,63,64].

Çizelge 4.4. İş parçası malzeme özellikleri.

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	8,44
Elastikiyet modülü (kN/mm ²)	205,8
Poisson oranı	0,278
Isıl genleşme (10 ⁻⁶)	13,3
Özgül ısı (Btu/lb x °F)	0,098
Isıl iletkenlik (W/m K)	9,8

4.5.2. Kesici Takımların Tanımlanması

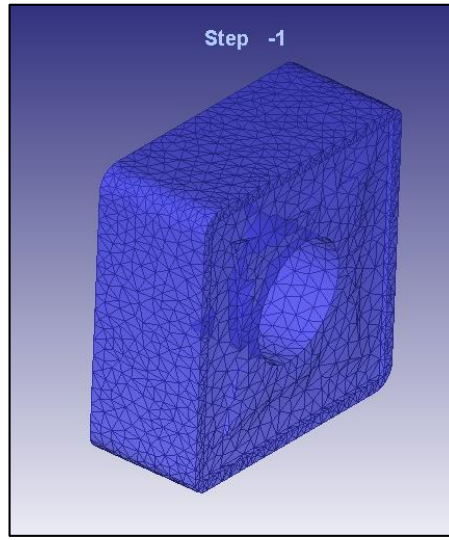
Tornalama deneylerinde kullanılan kesici takım geometrileri program kütüphanesinde yer almamaktadır. Bu nedenle kesici takım formunun oluşturulmasında kesici takım katalogundan (Dxf uzantısından) ve optik tarama cihazından yararlanılmıştır. Kesici takım geometrisi Siemens NX Unigraphics programı kullanılarak oluşturulmuştur. STL dosya uzantı içerisinde kesici takım formuna (talaş açısı, uç radyüsü, yanaşma açısı gibi) ait bütün bilgiler Deform 3D programına aktarılmıştır. (Şekil 4.4). Kesici takıma ait katı model oluşturulduktan sonra kesici takım malzeme kütüphanesinden yararlanılarak kesici takım malzemesi tungsten karbür (WC) belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Kesici takım şekli.

4.5.3. İş parçası ve Kesici Takım Ağ Yapısı Tanımlaması

Her bir tornalama simülasyonunda iş parçası ve kesici takımın üç boyutlu ağ yapısı (mesh) tanımlanmasında Lagrangian Incremental mesh modeli kullanılmıştır. Kesici takım-iş parçası ağ yapısı, minimum eleman boyutu 0,2 mm tanımlanarak kesici takımların uç kısmında daha yoğun 43532 elemandan ve diğer bölgelerinde daha seyrek olacak şekilde oluşmuştur (Şekil 4.5). İş parçası ise 21680 elemandan meydana gelmiştir.



Şekil 4.5. Ağ yapısı.

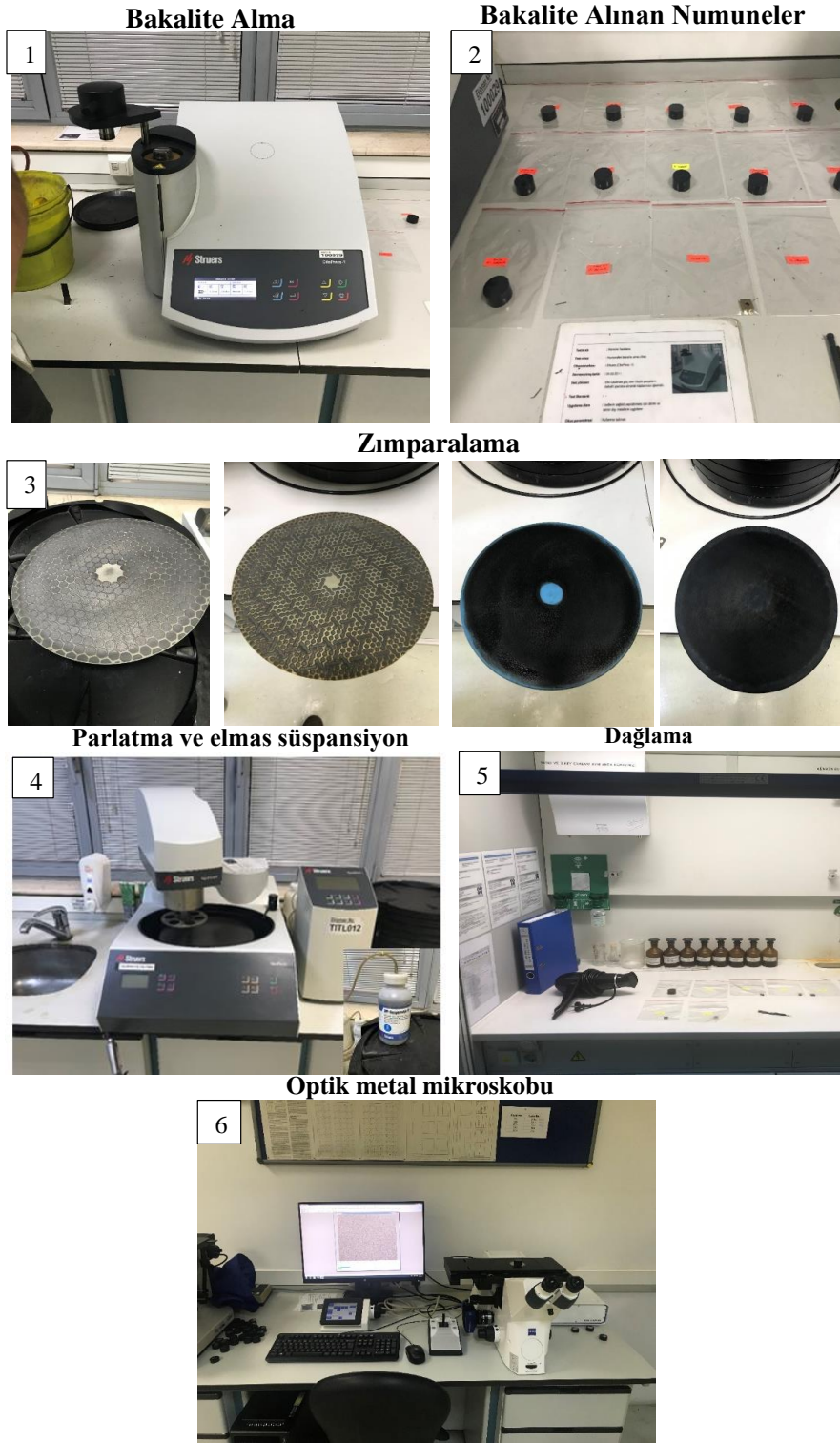
4.6. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

İşlemsiz ve farklı bekletme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımların mikro sertlik ölçümleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan TTS Matsuzawa HWMMT-X3 marka mikro sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Mikrosertlik değerleri, her bir numune üzerinden beşer ölçüm yapılarak ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

4.7. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Kriyojenik soğutma işleminin kesici takımların mikroyapısında meydana getirdiği değişimler optik metal mikroskobu ve SEM kullanılarak incelenmiştir. Metalografik

incelemeler Mercedes-Benz Türk Aksaray Kamyon Fabrikası Metal laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Suleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Metalografik inceleme; bakalite alma, numune hazırlama, zımparalama, parlatma ve elmas süspansiyon, dağlama ve mikroskop altında inceleme olmak üzere altı aşamadan oluşmaktadır. Şekil 4.6’da metalografik inceleme aşamaları görülmektedir.



Şekil 4.6. Metalografik inceleme aşamaları.

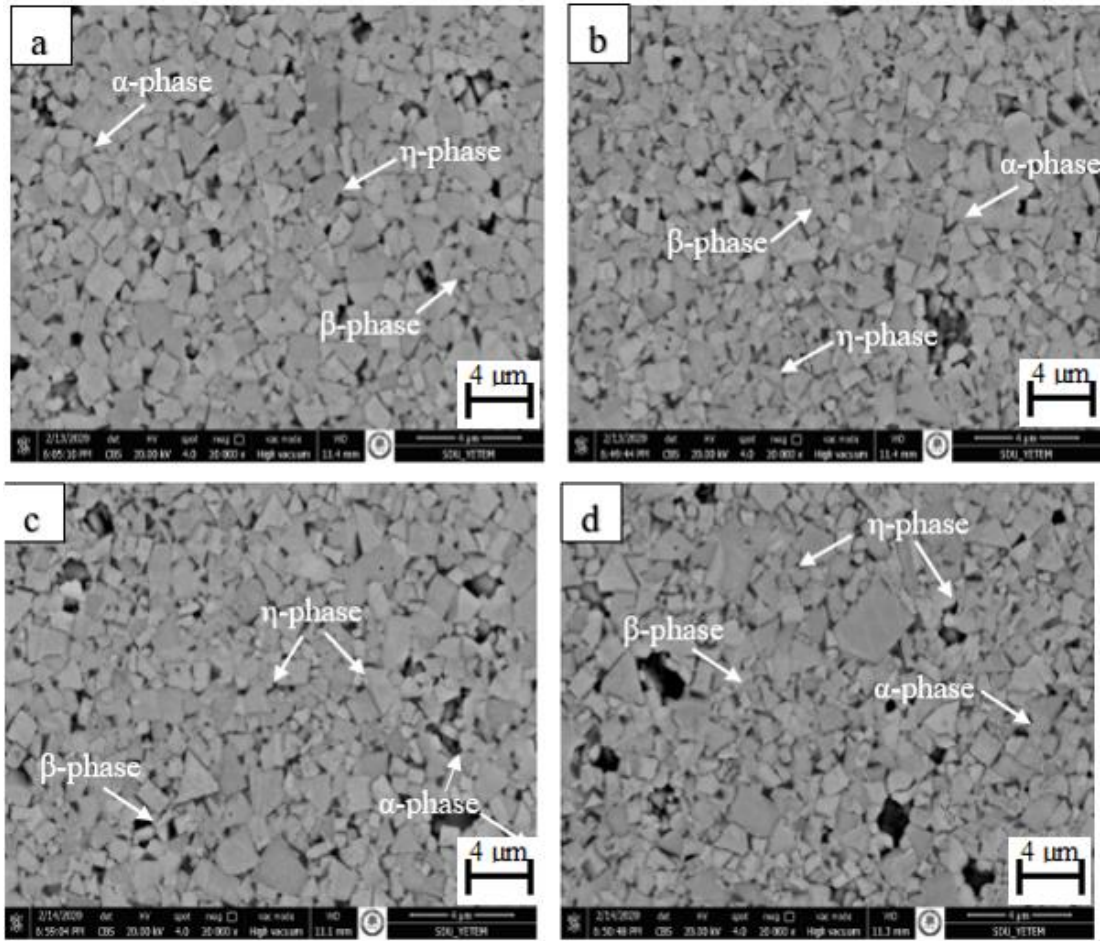
BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tungsten karbür kesici takımlara farklı bekletme sürelerinde uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlemin, işlemsiz kesici takımlara göre mikroyapıda meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla SEM cihazında mikroyapı görüntüleri oluşturulmuştur. Tungsten karbürlerin mikroyapısında, α -fazı (tungsten karbür), β -fazı (kobalt metal bağlayıcı), γ fazı (kubik kafes karbürü) ve η -fazı (tungsten ve bağlayıcılı çoklu karbürler) bulunmaktadır [66]. Tungsten karbürlerin sinterleme işlemi sırasında karbon içeriğinin kontrolü önem arz etmektedir. Karbon miktarının çok fazla olması grafit çökelmesine neden olur iken çok düşük olması da büyük dendritler şeklinde bir alt stokiometrik karbür fazı oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, ideal bileşimi elde etmek için karbon miktarı sınırlı olmalıdır. η -fazı, WC-Co sementit karbür sisteminde karbon içeriği çok düşük olduğundan, üçlü bir W-Co-C karbür fazı olarak tanımlanmaktadır. İki tip η -fazı olduğu bilinmektedir. Bunlardan birisi M_6C ; bu faz $Co_{3.2}W_{2.8}C$ ile Co_2W_4C aralığında bir bileşime sahiptir ve 1000 °C'nin altında stabildir, yani düşük sıcaklık η -fazıdır. Diğeri $M_{12}C$ fazı; Co_6W_6C sabit bileşimine sahiptir ve 1000 °C'nin üstünde stabildir, yani yüksek sıcaklık η -fazıdır [67]. M_6C tip η -fazı sinterleme işlemi süresince sıvı kobalttaki tungsten karbürün devamlı çözünmesine bağlı olarak çekirdeklenerek büyümektedir. Bu da bağlayıcının, kırılğan bir yapıya dönüşmesine neden olmaktadır. $M_{12}C$ tipi η -faz ise soğuma sırasında matrisin tamamında daha büyük tungsten karbür parçacıkları ile birlikte daha ince taneli eta (η -fazı) karbürler biçiminde oluşmaktadır. Bu duruma bağlı olarak literatürde yapılan çalışmalarda kriyojenik işlem sonrası kesici takımların sertlik ve aşınma direncinde önemli bir artış olduğu görülmektedir [68-70]. Şekil 5.1'de işlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlara ait mikroyapı (SEM) görüntüleri yer almaktadır.

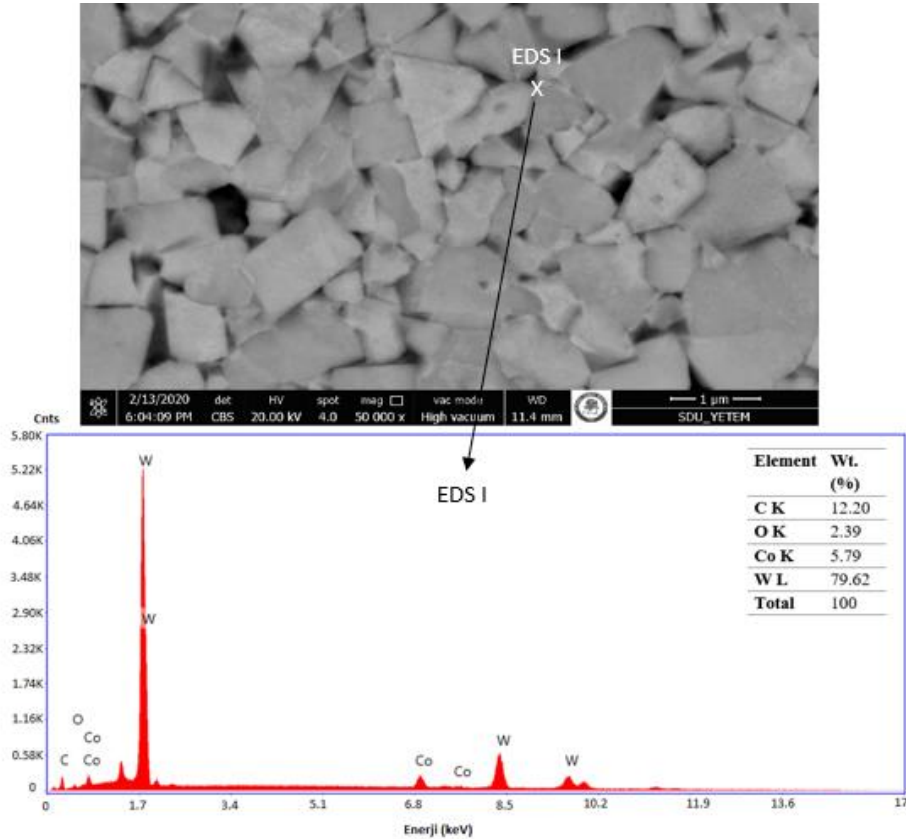
Şekil 5.1’de yer alan mikroyapı görüntülerinde α fazı, β fazı ve η fazı oklarla gösterilmiştir. α -fazı, gri renkli alanlar olup yapının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. β fazı, daha küçük miktarda olan ve α -fazı sınırlarını çevreleyen açık renkli beyaz bölgelerdir. Koyu gri noktalar η -fazı karbürlerini tanımlamaktadır. Kriyojenik işlem uygulanmış takımlarda η fazı karbürlerinin daha homojen bir dağılım içinde olduğu ve ayrıca, α faz dağılımı, işlemsiz (ham) takıma göre daha homojen ve küçük boyutta olduğu görülmektedir.



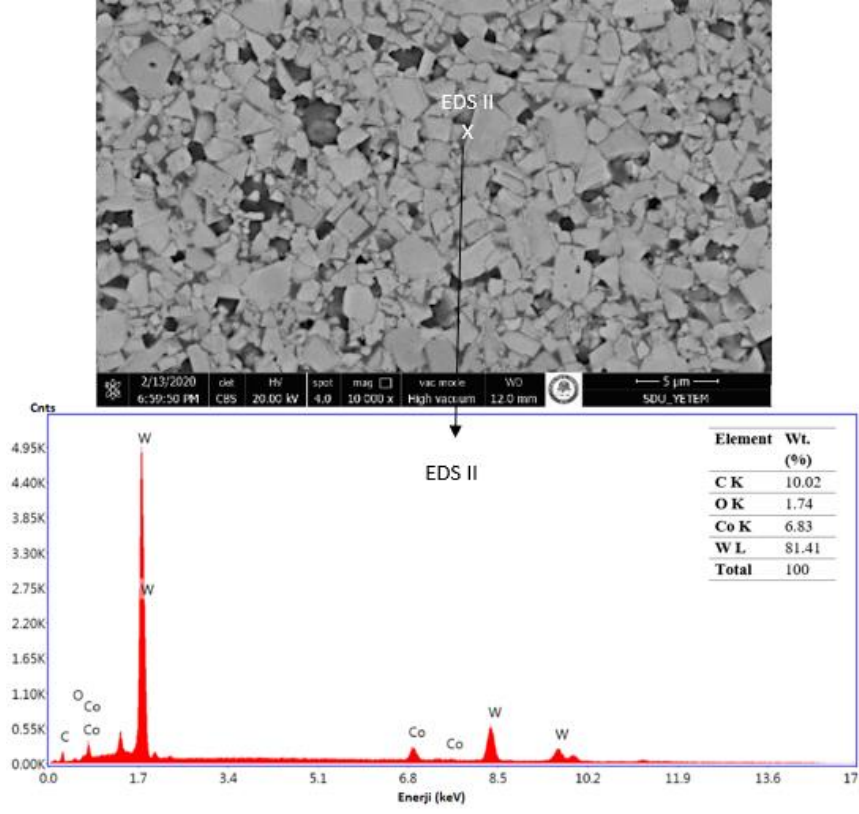
Şekil 5.1. Tungsten karbür takımların mikroyapıları: a) işlemsiz, b) 12 saat derin kriyojenik işlem görmüş, c) 24 saat derin kriyojenik işlem görmüş, d) 36 saat derin kriyojenik işlem görmüş.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de tungsten karbür takımların mikro yapısındaki α ve η fazlarını tespit etmek için uygulanan enerji dağılımlı bir X-ışını spektroskopisi (EDS) analiz sonuçları sırasıyla, işlemsiz ve DER24 takım için görülmektedir. Şekil 5.2’de işlemsiz takım için α -fazı, gri renkli alanların %79,62 W ve %12,1 C içerdiğini göstermektedir.

Dahası, α -fazı sınırlarını çevreleyen açık renkli beyaz bölgeler olarak adlandırılan β fazı ise %5,79 Co içermektedir. Kobaltla kaplanmış koyu gri noktalar bir karbür türü olan eta (η -fazı) karbürleri göstermektedir. Şekil 5.3’de DER24 takım için eta (η -fazı) karbür fazının %81,41 W, %10,02 C ve %6,83 Co içerdiğini göstermektedir. İşlemsiz takıma gör kriyojenik işlem sonrası Co (β -fazı) %1,04 artmıştır. Kobalt bağlı karbürler iki eta (η -fazı) karbür (M_6C ve $M_{12}C$) fazdan oluşmaktadırlar. Kriyojenik işlem sonrası kaba ve rastgele dağılmış η fazı partikülleri, en kararlı formlarında daha dar hale gelmektedirler. Daha büyük tungsten karbür parçacıklarıyla birlikte, bu daha ince parçacıklar daha yoğun, daha uyumlu ve çok daha dayanıklı bir matris biçimini almaktadırlar. Eta (η -fazı) karbürler, kriyojenik işlem uygulanmış takımlarda tokluğu etkilemeden sertlikte ve aşınma direncinde bir artış sağlamaktadır [71]. Kaplamasız, AlTiN Kaplamalı ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici takımlara ait mikroyapı (SEM) görüntüleri sırasıyla, Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’de yer almaktadır.



Şekil 5.2. İşlemsiz takım için EDS sonuçları.

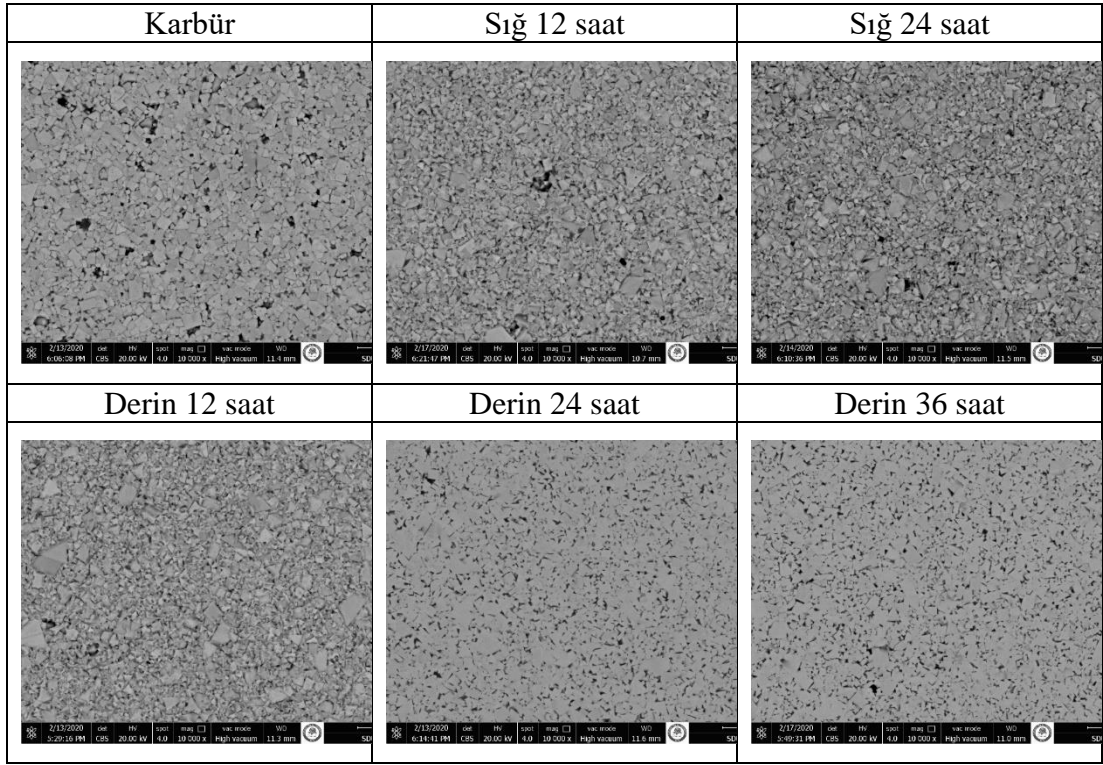


Şekil 5.3. 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana takım için EDS sonuçları.

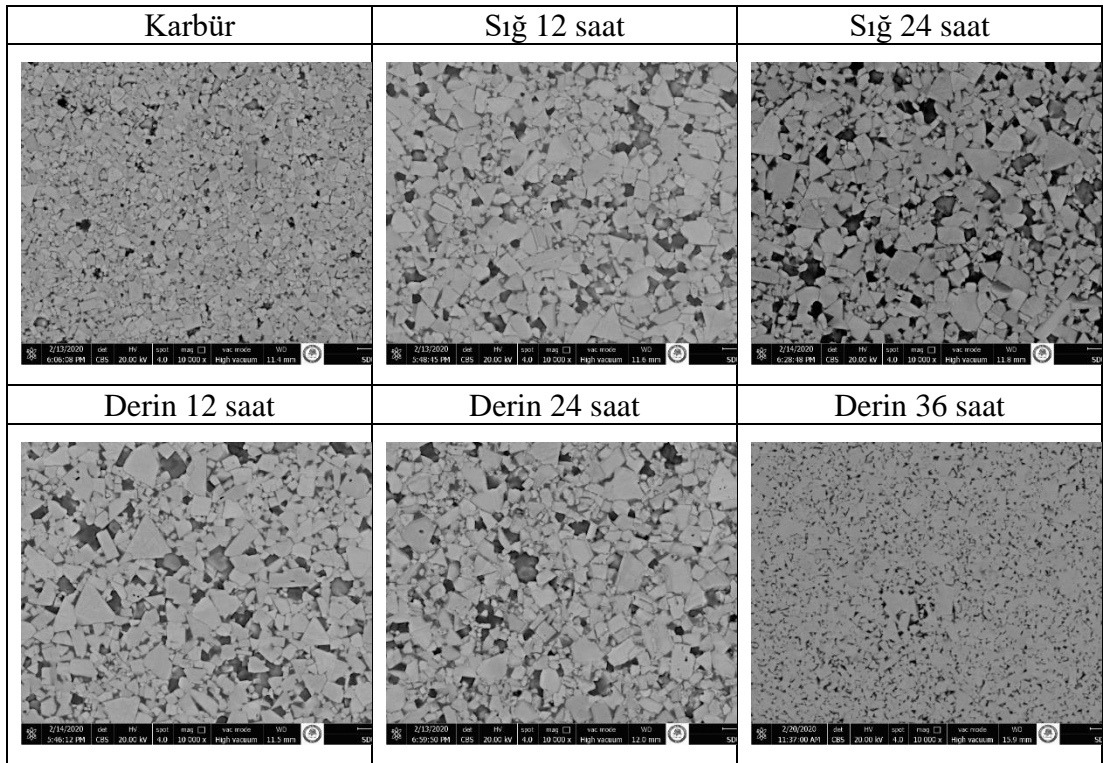
Çizelge 5.1. Kaplamasız takımların SEM görüntüleri.

Ham	Sığ 12 saat	Sığ 24 saat
Derin 12 saat	Derin 24 saat	Derin 36 saat

Çizelge 5.2. AlTiN kaplamalı takımların SEM görüntüleri.

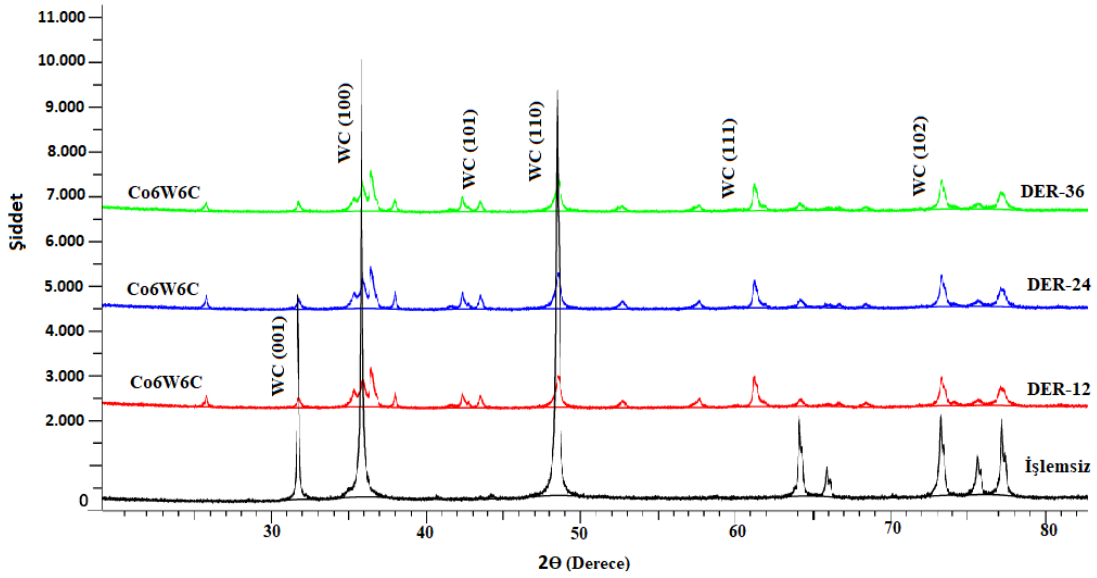


Çizelge 5.3. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımların SEM görüntüleri.



5.2. XRD SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tungsten karbür kesici takımların mikroyapı ve EDS analizleri sonucundan tespit edilen fazların yapı içerisindeki değişimlerini ve dağılımlarını net bir şekilde ifade edebilmek için XRD analizi yapılmıştır. XRD analizleri hem işlemsiz takıma hem de farklı bekleme sürelerinde derin kriyojenik işlem görmüş takımlara uygulanmıştır. Şekil 5.4’de işlemsiz ve farklı bekleme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanmış takımların XRD analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.4. İşlemsiz ve farklı bekleme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanan tungsten karbür kesici takımlar için XRD profili.

Şekil 5.4 incelendiğinde işlemsiz tungsten karbür takım ile kriyojenik işlem uygulanan tungsten karbür takımlar karşılaştırıldıklarında genel olarak benzer bir profil oluşturmaktadırlar. Ancak, İşlemsiz takıma göre kriyojenik işlem uygulanan takımlarda Co₆W₆C tipi eta (η-fazı) karbür fazının yaklaşık olarak 26 derece de olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem sonrası oluşan bu eta (η-fazı) karbürler takımın özelliklerinin gelişmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Kalsi ve arkadaşları tungsten karbür takımlarda kriyojenik işlem sonrası temperlemenin etkisini araştırdıkları bir çalışmalarında; kriyojenik işlem sonrası ince ve yoğun bir kobalt yapısında yeni oluşan ince eta (η-fazı) karbür bileşiklerinin en uygun formda ve homojen bir şekilde dağıldığını belirlemişlerdir. Sonuç olarak, bu yeni eta (η-fazı)

karbür bileşiklerinin malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesinde hayati bir rol oynadığına ve ayrıca kriyojenik işlem sonrası temperleme işleminin önemini de bildirmişlerdir [72]. Elde edilen bulguların literatür ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

XRD analizlerinde tane boyutu ve dislokasyon yoğunluğu da değerlendirilmiştir. Çizelge 5.4'de işlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan takımlar için belirlenen tane boyutu ve dislokasyon yoğunluğu değerleri verilmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun hesaplanmasında Eş. 5.1 kullanılmıştır [73,74]. Dislokasyon yoğunluğu yapıdaki kusurların miktarını göstermektedir [75].

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (5.1)$$

Çizelge 5.4. İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan takımların tane boyutu ve dislokasyon yoğunluğu değerleri.

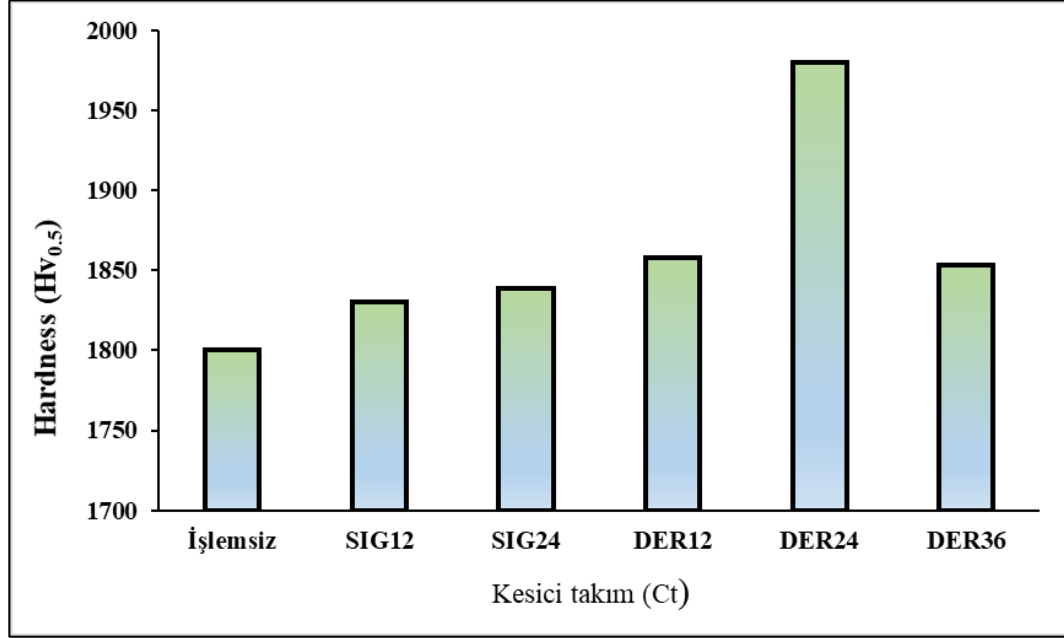
Kesici takım (Ct)	D (Å)	δ (Å ⁻²)
İşlemsiz	482	4,3 x 10 ⁻⁶
DER12	447,1	5 x 10 ⁻⁶
DER24	450,7	4,92 x 10 ⁻⁶
DER36	448,2	4,97 x 10 ⁻⁶

Çizelge 5.4 incelendiğinde kriyojenik işlem sonrası tungsten karbür takımların tane boyutunda bir miktar azalma görülmektedir. İşlemsiz takıma göre DER12, DER24 ve DER36 takımlarda sırasıyla %7,24, %6,49 ve %7 oranlarında azalmıştır. Ayrıca, kriyojenik işlem sonrası tungsten karbür takımların dislokasyon yoğunluğunda bir artış belirlenmiştir. Kriyojenik işlem sonrası tane boyutunun azalması ve dislokasyon yoğunluğundaki artışın takımlarda sertlik artışına neden olduğu düşünülmektedir.

5.3. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tungsten karbür kesici takımın sertliğine kriyojenik işlemin etkisini belirlemek için sertlik ölçümleri yapılmıştır. İşlemsiz ve farklı bekleme sürelerinde sıg ve derin

kriyojenik işlem uygulanan takımların Vickers (HV0.5) sertlik yöntemiyle ölçülen sertlik değerleri Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı bekleme sürelerinde uygulana kriyojenik işlemin tungsten karbür takımın sertliğine etkisi.

Şekil 5.5’de farklı bekleme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlemin kaplamasız tungsten karbür takımların sertliğine etkisi incelendiğinde farklı bekleme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlemlerin takımların sertliğini arttırdığı görülmektedir. Derin kriyojenik işlem uygulanmış takımların sertliği işlemsiz (ham) takıma göre belirgin bir şekilde %8,33 oranında arttığı görülmektedir. Bu duruma EDS analizlerinden de görüldüğü gibi kobalt bağlayıcının azalarak yerlerinde ince eta (η -fazı) karbürlerin oluşmasının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca mikroyapı görüntüleri incelendiğinde kobalt bağlayıcı (β fazının) bulunduğu yerlerde kriyojenik işlem sonrası koyu gri noktalar η -fazı karbürlerini arttığı görülmektedir. Gill ve arkadaşları kriyojenik işlem görmüş tungsten karbürün metalurjik ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında sertliğin arttığını bildirmişlerdir. Sertlik artışını ince eta (η) karbür parçacıklarının kriyojenik işlem sırasında çökmesi ve kriyojenik işlem öncesi kobalt bağlayıcının yer aldığı alanı doldurması ile açıklamışlardır [66].

Literatürde birçok çalışmada kriyojenik işlem uygulanan kesici takımların sertliğinin arttığı bildirilmiştir [76,77]. Kriyojenik işlem sonrası tungsten karbür kesici takımlarda meydana gelen sertlik artışı literatürdeki çalışmalar ile örtüşmektedir.

5.4. İSTATİKSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Düşük maliyetli ve yüksek kalitede ürünlerin elde edilebilmesi için uygun işleme şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. İşlenmiş yüzeyin kalitesini ve kesme esnasında oluşan kuvvetleri doğrudan etkileyen kesme parametrelerinin optimum seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, tornalama deneylerinin tasarlanmasında Taguchi metodu kullanılmıştır. Tornalama deneyler Taguchi L18 ($6^1 \times 3^3$) dizinine göre tasarlanmıştır. Kontrol faktörü olarak kesici takım, kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği seçilmiştir. İşlenebilirlik göstergesi olarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Test verilerinin irdelenmesinde; sinyal-gürültü oranı (S/N oranı) analizi, varyans (ANOVA) analizi ve ayrıca, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin tanımlanması ve modellenmesi için regresyon analizleri kullanılmıştır. Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için lineer ve ikinci dereceden (kuadratik) regresyon modeli ile tahmin denklemleri geliştirilmiştir.

İlk olarak, kesme parametrelerinin ideal seviyelerinin belirlenmesi için S/N sinyal-gürültü oranı analizi kullanılmıştır. Eş. 5.2'deki "en küçük en iyi eşitliği" yaklaşımı kullanılarak S/N oranları belirlenmiştir. Analizler %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Ardından çıktı parametreleri üzerinde kesme parametrelerinin etki düzeylerini belirlemek için varyans (Anova) analizi yapılmıştır. Anova tablolarında kesme parametrelerinin çıktı parametreleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlılığı iki parametre dikkate alınarak değerlendirilir. Bunlardan birisi (P) önem seviyesi diğeri (F) katkı oranıdır. (P) önem seviyesi değeri 0,05'ten küçük olduğunda parametrenin çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ve (F) katkı değeri en büyük olan parametrenin de sonuca en fazla etki eden faktör olarak kabul edilmektedir. Son olarak esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için doğrusal ve ikinci derece (kuadratik) regresyon analizleri ile tahmin denklemleri geliştirildi ve bu denklemlerin doğruluğu, doğrulama testleri ile kontrol edilmiştir.

$$n = \frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.2)$$

Bu bölümde, esas kesme kuvveti (Fc) ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine (Ra) göre kesme şartlarının optimizasyonu kesici takım kalitesine göre ayrı ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir. Bütün kaliteler için K-1, kesici takımın ham halini, S-12, 12 saat sığ kriyojenik, S-24, 24 saat sığ kriyojenik, D-12 12 saat derin kriyojenik, D-24, 24 saat derin kriyojenik ve D-36, 36 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımları temsil etmektedir. Kesme parametreleri ise kesme hızı (V), ilerleme miktarı (f) ve talaş derinliğinin (a) şeklinde ifade edilmiştir.

5.4.1. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan Kaplamasız Tungsten Karbür Takımların İstatistiksel Değerlendirilmesi

Esas kesme kuvveti (Fc) ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine (Ra) göre kaplamasız tungsten karbür kesici takımların ham ve farklı bekleme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmış hallerinin işleme performansları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, esas kesme kuvveti (Fc) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde kesme parametrelerinin etkileri analiz edilerek, optimum kesme şartları belirlenmiştir.

5.4.1.1. S/N Oranlarının Analizi

İşleme şartlarının ideal seviyelerinin belirlenmesinde S/N oranlarından yararlanılmıştır. Çizelge 5.5'de işleme esnasında ölçülen esas kesme kuvveti ve işlenmiş yüzey üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ve bunlara karşılık gelen S/N oranları yer almaktadır.

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu Çizelge 5.6'da verilmiştir. Taguchi methoduyla oluşturulan bu tablo optimum esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin ideal seviyelerini göstermektedir. Esas kesme kuvveti (Fc) için kesme parametrelerinin ideal seviyeleri A kesici takım D-24 (seviye 5), B kesme hızı 180 m/dak (seviye 2), C ilerleme miktarı 0,12 mm/dev (seviye

1), ve D talaş derinliği 0,5 mm (seviye 3) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan tornalama deneyinde esas kesme kuvveti 82 N ölçülmüştür.

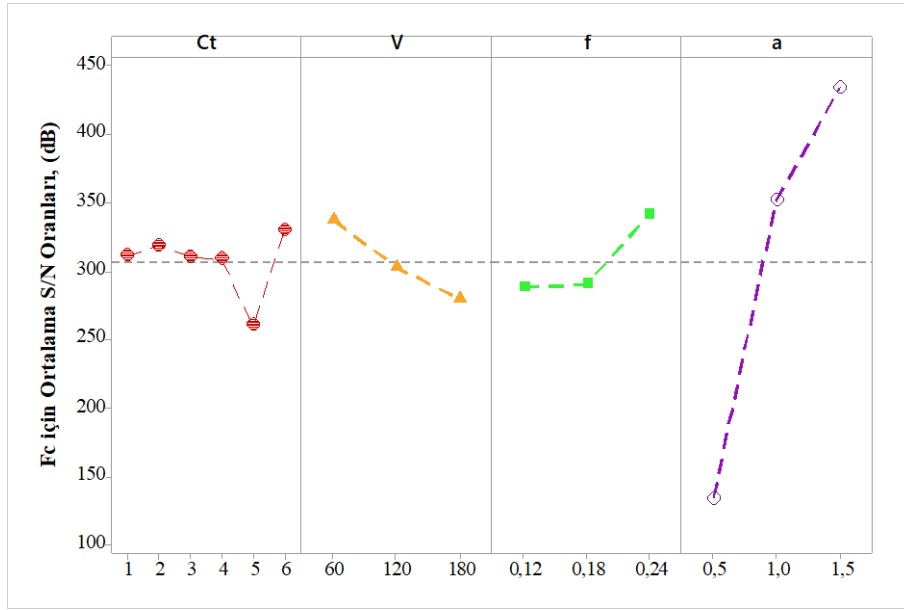
Çizelge 5.5. Kaplamasız takımlar için Fc ve Ra değerleri ve S/N oranları.

Test No	Kesme Parametreleri				Ra (µm)	Ra-S/N (dB)	Fc (N)	Fc-S/N (dB)
	A (Ct)	B (V)	C (f)	D (a)				
1	K-1	60	0,12	0,5	1,20	-1,5836	132	-42,4115
2	K-1	120	0,18	1,0	0,92	0,7242	350	-50,8814
3	K-1	180	0,24	1,5	1,06	-0,5061	450	-53,0643
4	S-12	60	0,12	1,0	0,98	0,1755	390	-51,8213
5	S-12	120	0,18	1,5	0,89	1,0122	420	-52,4650
6	S-12	180	0,24	0,5	1,38	-2,7976	145	-43,2274
7	S-24	60	0,18	0,5	1,32	-2,4115	150	-43,5218
8	S-24	120	0,24	1,0	1,12	-0,9844	370	-51,3640
9	S-24	180	0,12	1,5	0,85	1,4116	410	-52,2557
10	D-12	60	0,24	1,5	0,89	1,0122	500	-53,9794
11	D-12	120	0,12	0,5	0,71	2,9748	125	-41,9382
12	D-12	180	0,18	1,0	0,62	4,1522	300	-49,5424
13	D-24	60	0,18	1,5	0,42	7,5350	400	-52,0412
14	D-24	120	0,24	0,5	0,63	4,0132	130	-42,2789
15	D-24	180	0,12	1,0	0,25	12,0412	250	-47,9588
16	D-36	60	0,24	1,0	0,94	0,5374	450	-53,0643
17	D-36	120	0,12	1,5	0,32	9,8970	420	-52,4650
18	D-36	180	0,18	0,5	0,87	1,2096	120	-41,5836

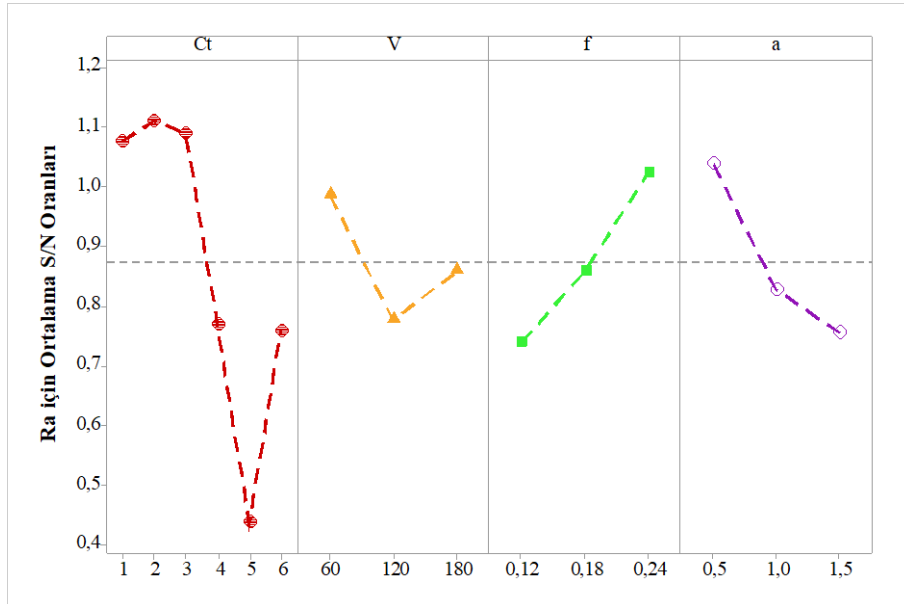
Çizelge 5.6. Kaplamasız takımlarda Fc ve Ra için S/N yanıt tablosu.

	Kesme parametreleri			
	A	B	C	D
Fc				
1	-48,79	-49,47	-48,14	-42,49
2	-49,17	-48,57	-48,34	-50,77
3	-49,05	-47,94	-49,50	-52,71
4	-48,49	-	-	-
5	-47,43	-	-	-
6	-49,04	-	-	-
Delta	1,74	1,53	1,35	10,22
Ra				
1	-0,455	0,877	4,152	0,234
2	-0,536	2,939	2,037	2,774
3	-0,661	2,585	0,212	3,393
4	2,713	-	-	-
5	7,863	-	-	-
6	3,881	-	-	-
Delta	8,524	2,062	3,940	3,159

Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için kesme parametrelerinin ideal seviyeleri A kesici takım D-24 (seviye 5), B kesme hızı 120 m/dak (seviye 2), C ilerleme miktarı 0,12 mm/dev (seviye 1), ve D talaş derinliği 1,5 mm (seviye 3) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan tornalama deneyi sonucunda yüzey pürüzlülüğü değeri 0,21 μm ölçülmüştür. Şekil 5.6'da esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin seviye değerleri görülmektedir.



a)



b)

Şekil 5.6. Kaplamasız takımlar için kontrol faktörlerinin S/N oranları etki seviyeleri
a) Fc, b) Ra.

5.4.1.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde kesme parametrelerinin etkilerini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları Çizelge 5.7’de yer almaktadır. Çizelge 5.7’ye göre esas kesme kuvveti üzerinde (Ct) kesici takım, (V) kesme hızı, (f) ilerleme miktarı ve (a) talaş derinliğinin etki oranları sırasıyla %2,71 %3,18 %3,37 ve %90,03 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, esas kesme kuvvetini etkileyen en önemli parametre %90,03 katkı oranı ile (Ct) talaş derinliğidir. Yüzey pürüzlülüğü değeri için ise (Ct) kesici takım, (V) kesme hızı, (f) ilerleme miktarı ve (a) talaş derinliğinin etki oranları sırasıyla %63,55 %6,64 %14,26 ve %14,91 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü değerini etkileyen en önemli parametre %63,55 katkı oranı ile (Ct) kesici takım olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.7. Kaplamasız takımlarda Fc ve Ra için varyans analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
<i>Fc</i>						
Ct	5	8661	1732	4,57	0,046	2,71
V	2	10159	5079	13,40	0,006	3,18
f	2	10795	5398	14,24	0,005	3,37
a	2	287987	143994	379,82	0,000	90,03
Hata	6	2275	379			0,71
Total	17	319877				100
<i>Ra</i>						
Ct	5	1,09383	0,218766	119,69	0,000	63,55
V	2	0,11431	0,057156	31,27	0,001	6,64
f	2	0,24541	0,122706	67,13	0,000	14,26
a	2	0,25671	0,128356	70,22	0,000	14,91
Hata	6	0,01097	0,001828	-	-	0,64
Total	17	1,72123				100

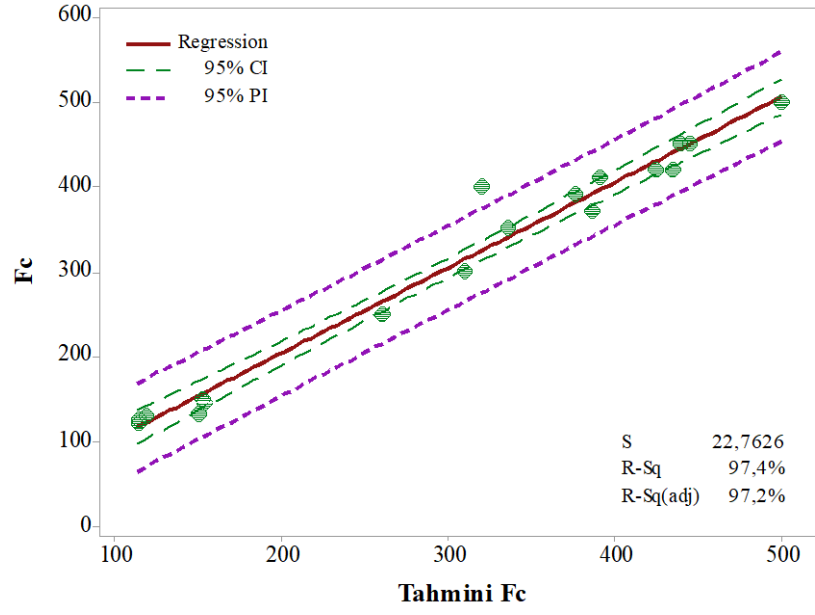
5.4.1.3. Regresyon Analizi

Bağımlı değişken olan esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ile bağımsız değişkenler kesici takım, kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği arasındaki ilişki regresyon analizi ile modellenmiştir. Tahmin denklemleri doğrusal ve ikinci dereceden regresyon modelleri kullanılarak oluşturulmuştur. Esas kesme kuvveti ve

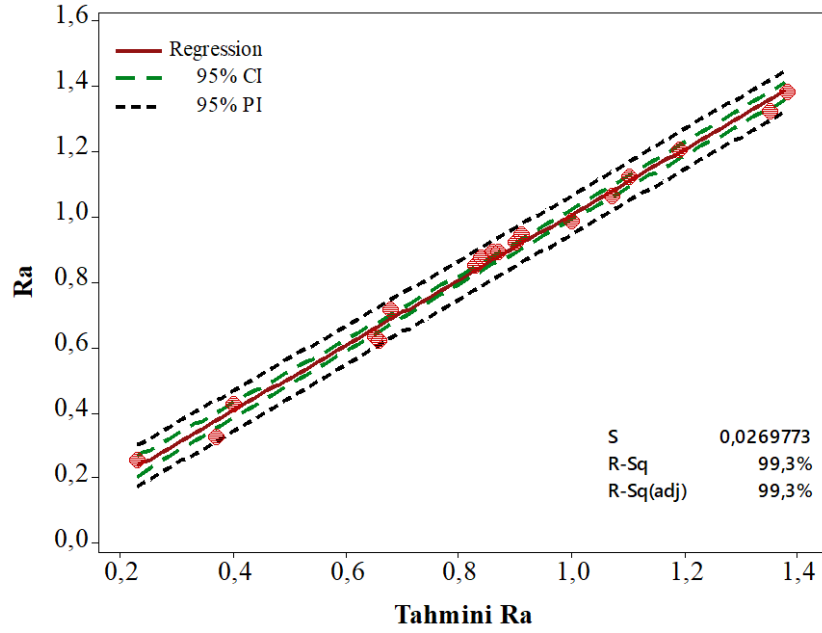
yüzey pürüzlülüğü değerinin doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri aşağıda verilmiştir. Eş. 5.3'de yer alan F_c esas kesme kuvvetini Eş. 5.4'de ise R_a yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmin denklemini göstermektedir. Şekil 5.7'de doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması yer almaktadır. Esas kesme kuvveti için doğrusal regresyon modeli ile geliştirilen tahmin eşitliğinin R^2 değeri %90 iken yüzey pürüzlülüğü değeri için bu değer %72 elde edilmiştir.

$$F_c = -7,1 - 2,29Ct - 0,482V + 442f + 299,7a \quad (5.3)$$

$$R_a = 1,232 - 0,1159Ct - 0,001V + 2,375f - 0,28a \quad (5.4)$$



a)



b)

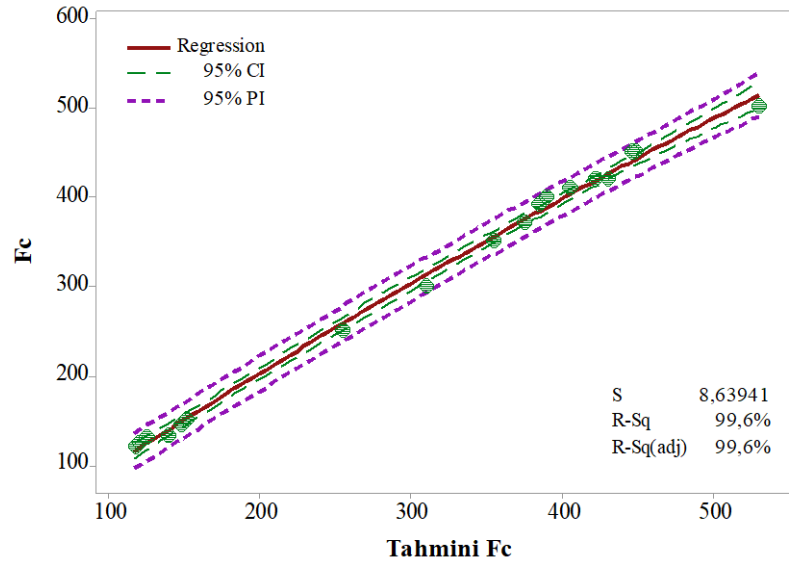
Şekil 5.7. Kaplamasız takımlar için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra.

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için ikinci dereceden regresyon analizi ile oluşturulan tahmin denklemleri sırasıyla Eş. 5.5 ve Eş. 5.6'da verilmiştir.

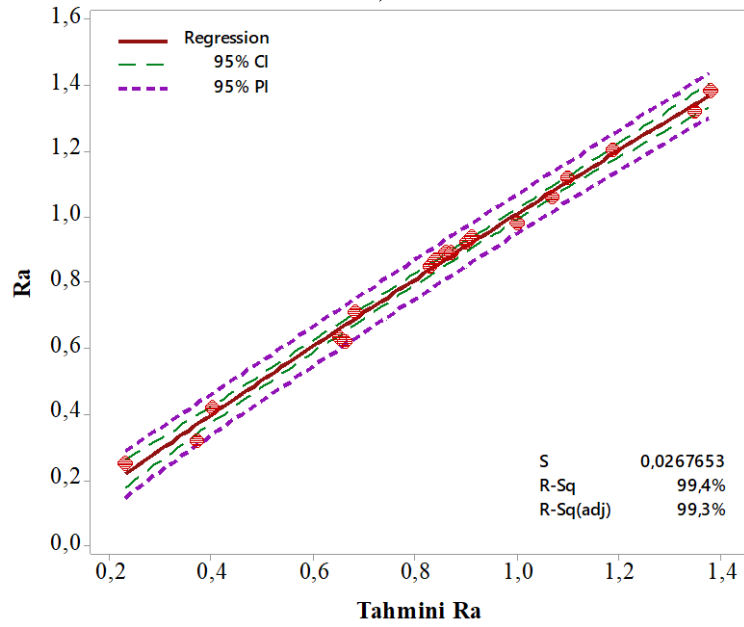
$$F_c = -11 + 7,1Ct - 1,14V - 2440f + 935a + 0,00221V^2 + 7880f^2 - 272a^2 + 25Ctf - 14,3Cta + 0,56Vf - 0,062Va - 176fa \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned}
Ra = & 1,65 - 0,093Ct - 0,0144V + 5,1f - 0,42a + 0,00005V^2 + 13f^2 + \\
& 0,293a^2 + 0,00073CtV - 0,52Ctf - 0,032Cta - 0,0188Vf + 0,00133Vca - \\
& 2,71fa
\end{aligned} \tag{5.6}$$

Eş. 5.5’de ise F_{c_q} esas kesme kuvvetinin, Eş. 5.6’da yer alan R_{a_q} yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmin denklemini göstermektedir. Şekil 5.8’de ikinci dereceden regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile gerçek değerler arasındaki kıyaslama yer almaktadır. Şekil 5.8’e göre tahmin edilen değerler ile deney sonuçları arasında çok iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen denklemlerin R^2 değerleri sırasıyla %97,04 ve %81 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, doğrusal regresyon modeline göre ikinci dereceden regresyon modeliyle oluşturulan tahmin denkleminde deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde edilmiştir. Sonuç olarak, ikinci dereceden regresyon modelinin esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmininde başarılı olduğu görülmüştür.



a)



b)

Şekil 5.8. Kaplamasız takımlar için ikinci dereceden regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra.

5.4.1.4. Doğrulama Deneyleri

Taguchi optimizasyon tekniği ile, optimize edilmiş koşulun doğrulanması için bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir. Burada birbirini takip eden işlemler uygulanacaktır. Öncelikle, Eşitlik 5.7 ve Eşitlik 5.8 kullanılarak $F_{c_{opt}}$ ve $R_{a_{opt}}$ belirlenmektedir. Sonrasında, Eşitlik 5.9 ve 5.10 kullanılarak CI güven aralığı belirlenerek, Eşitlik 11'da tahmini esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerinin

güven aralığı içerisinde olup olmadı test edilmektedir. Sonuç olarak, elde edilen tahmini değerler güven aralığı içerisinde ise Taguchi optimizasyon işleminin %95 güven seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleştiği kabul edilmektedir.

Optimum esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmininde sırasıyla Eş. 5.6 ve Eş. 5.7 kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için sırasıyla (A₅, B₃, C₁, D₁) ve (A₅, B₂, C₁, D₃) optimum seviyeleridir. T_{Fc} ve T_{Ra}, deneysel çalışmadan elde edilen tüm Fc ve Ra değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. T_{Fc} ve T_{Ra} sırasıyla 306,22 N ve 0,853 µm hesaplanmıştır. Fc_{opt}=41,84 N ve Ra_{opt}= 0,145 µm hesaplanmıştır.

$$F_{c_{opt}} = (A_5 - T_{Fc}) + (B_3 - T_{Fc}) + (C_1 - T_{Fc}) + (D_1 - T_{Fc}) + T_{Fc} \quad (5.7)$$

$$R_{a_{opt}} = (A_5 - T_{Ra}) + (B_2 - T_{Ra}) + (C_1 - T_{Ra}) + (D_3 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (5.8)$$

Tahmini esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için güven aralığının (CI) belirlenmesinde aşağıdaki yer alan Eş. 5.9 ve Eş. 5.10 kullanılmıştır.

$$CI_{Ra Fc} = \sqrt{F_{\alpha,1,fe} V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (5.9)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (5.10)$$

Eşitlik 5.9'da yer alan $F_{\alpha,1,fe}$; F oranı %95 güven seviyesini, α anlamlılık düzeyini, fe hata serbestlik derecesidir. V_e hata varyansı, n_{eff} etkili yinleme sayısı ve R doğrulama deneyleri için tekrar sayısıdır. Çizelge 5.8'de hesaplamalarda kullanılan bu parametreler yer almaktadır. Eş. 5.10 kullanılarak $n_{eff}=1,5$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.8. Çeşitli doğrulama parametreleri.

	V_e	$F_{\alpha,1,fe}$	α	fe	N	R	N	T_{dof}	n_{eff}
Fc	379	5,9874	0,05	6	18	3	18	11	1,5
Ra	0,001828								

Eş. 5.9 kullanılarak güven aralıkları $CI_{Fc} = 47,63$ ve $CI_{Ra} = 0,1$ olarak hesaplanmıştır.

$$[Fc_{opt} - CI_{Fc}] < Fc_{exp} < [Fc_{opt} + CI_{Fc}] = [41,84 - 47,63] < 82 < [41,84 + 47,63] = 5,79 < 82 < 89,47 \quad (5.11)$$

$$[Ra_{opt} - CI_{Ra}] < Ra_{exp} < [Ra_{opt} + CI_{Ra}] = [0,145 - 0,1] < 0,21 < [0,145 + 0,1] = 0,045 < 0,21 < 0,245 \quad (5.12)$$

Eş. 5.11’de Fc değeri ($Fc_{exp} = 82$ N) ve Eş. 5.12’de Ra değeri ($Ra_{exp} = 0,21$ μ m) güven aralığı sınırı içinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, Fc ve Ra için sistem optimizasyonu, Taguchi metodu ile %95 anlamlılık seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Çizelge 5.9’da kaplamasız takımlarda Fc ve Ra için doğrulama test sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 5.9. Kaplamasız takımlarda Fc ve Ra için doğrulama testi sonuçları.

Seviye	Taguchi Met.			Doğrusal Tah. Denk.			İkinci Der. Tah. Denk.		
	Den.	Tah.	Hata (%)	Den.	Tah.	Hata (%)	Den.	Tah.	Hata (%)
Fc									
A5B3C1D1	82	94	14,6	82	97,58	19	82	86,282	5,22
A1B2C2D2	350	336	4	350	338,5	3,2	350	333,41	4,73
Ra									
A5B2C1D3	0,21	0,267	27,14	0,21	0,397	89,28	0,21	0,345	64,28
A1B2C2D2	0,92	0,815	11,41	0,92	1,14	23	0,92	1,02	13,33

Çizelge 5.9’da yer alan doğrulama testi sonuçlarında hata oranı sınırlar içerisinde elde edilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre, esas kesme kuvvetinin tahmin edilmesinde Taguchi metoduyla geliştirilen tahmin denklemlerinin yüksek doğrulukta sonuç verdiği ancak yüzey pürüzlülüğü değerleri için analizlerde R^2 değerlerinin düşük elde edilmesinden dolayı yüzey pürüzlülüğü değerleri için geliştirilen tahmin denkleminin doğruluğunun düşük olduğu tespit edilmiştir.

5.4.2. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan AlTiN Kaplamalı Tungsten Karbür Takımların İstatistiksel Değerlendirilmesi

AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımların, ham ve farklı bekleme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmış hallerinin işleme performansları Fc ve Ra göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, kesme parametrelerinin etkileri analiz edilerek, optimum kesme şartları belirlenmiştir.

5.4.2.1. S/N Oranlarının Analizi

Her bir kesme parametresinin optimum seviyesinin belirlenmesinde S/N oranları kullanılmıştır. Çizelge 5.10'da işleme esnasında ölçülen esas kesme kuvveti ve işlenmiş yüzey üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ve bunlara karşılık gelen S/N oranları yer almaktadır.

Çizelge 5.10. AlTiN kaplamalı takımlar için Fc, Ra değerleri ve S/N oranları.

Test No	Kesme Parametreleri				Ra (µm)	Ra-S/N (dB)	Fc (N)	Fc-S/N (dB)
	A (Ct)	B (V)	C (f)	D (a)				
1	K-1	60	0,12	0,5	1,05	-0,42379	120	-41,5836
2	K-1	120	0,18	1,0	0,9	0,91515	270	-48,6273
3	K-1	180	0,24	1,5	1	0,0001	418	-52,4235
4	S-12	60	0,12	1,0	1,05	-0,42379	275	-48,7867
5	S-12	120	0,18	1,5	0,89	1,0122	390	-51,8213
6	S-12	180	0,24	0,5	1,289	-2,20506	120	-41,5836
7	S-24	60	0,18	0,5	1,278	-2,13062	180	-45,1055
8	S-24	120	0,24	1,0	1,08	-0,66848	350	-50,8814
9	S-24	180	0,12	1,5	0,82	1,723723	390	-51,8213
10	D-12	60	0,24	1,5	0,91	0,819172	470	-53,4420
11	D-12	120	0,12	0,5	0,69	3,223018	100	-40,0000
12	D-12	180	0,18	1,0	0,68	3,349822	262	-48,3660
13	D-24	60	0,18	1,5	0,41	7,744323	403	-52,1061
14	D-24	120	0,24	0,5	0,65	3,741733	128	-42,1442
15	D-24	180	0,12	1,0	0,23	12,76544	237	-47,4950
16	D-36	60	0,24	1,0	1,1	-0,82785	400	-52,0412
17	D-36	120	0,12	1,5	0,3	10,45757	430	-52,6694
18	D-36	180	0,18	0,5	0,89	1,0122	150	-43,5218

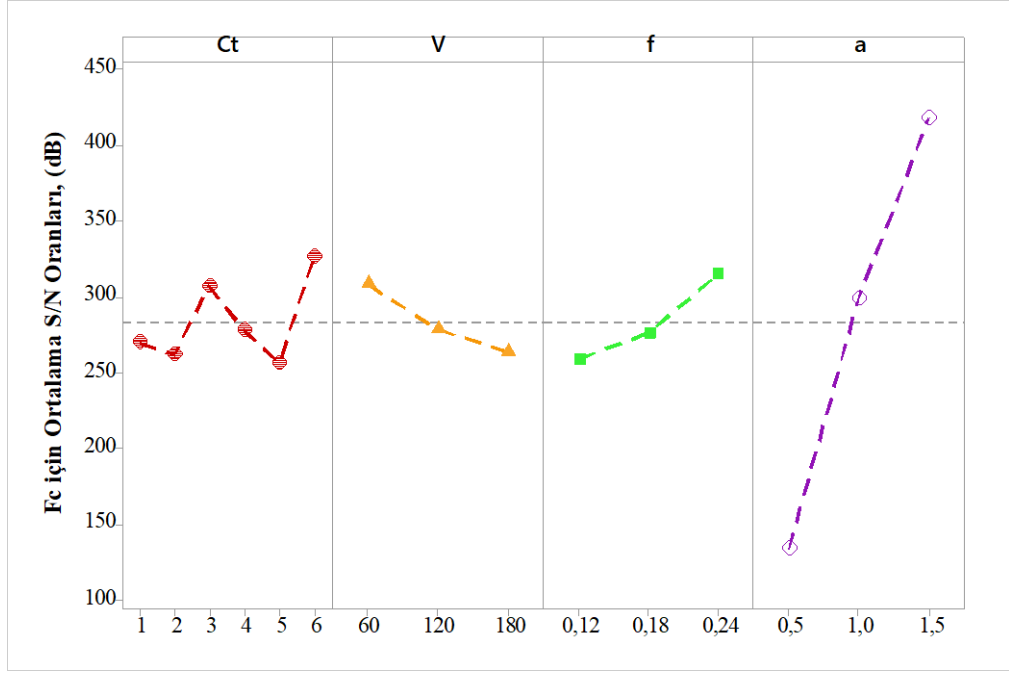
Esas kesme kuvveti (Fc) ve yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) için S/N yanıt tablosu Çizelge 5.11'de verilmiştir. Esas kesme kuvveti (Fc) için kesme parametrelerinin ideal

seviyeleri A kesici takım D-24 (seviye 5), B kesme hızı 180 m/dak (seviye 2), C ilerleme miktarı 0,12 mm/dev (seviye 1), ve D talaş derinliği 0,5 mm (seviye 3) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan tornalama deneyinde esas kesme kuvveti 76 N ölçülmüştür.

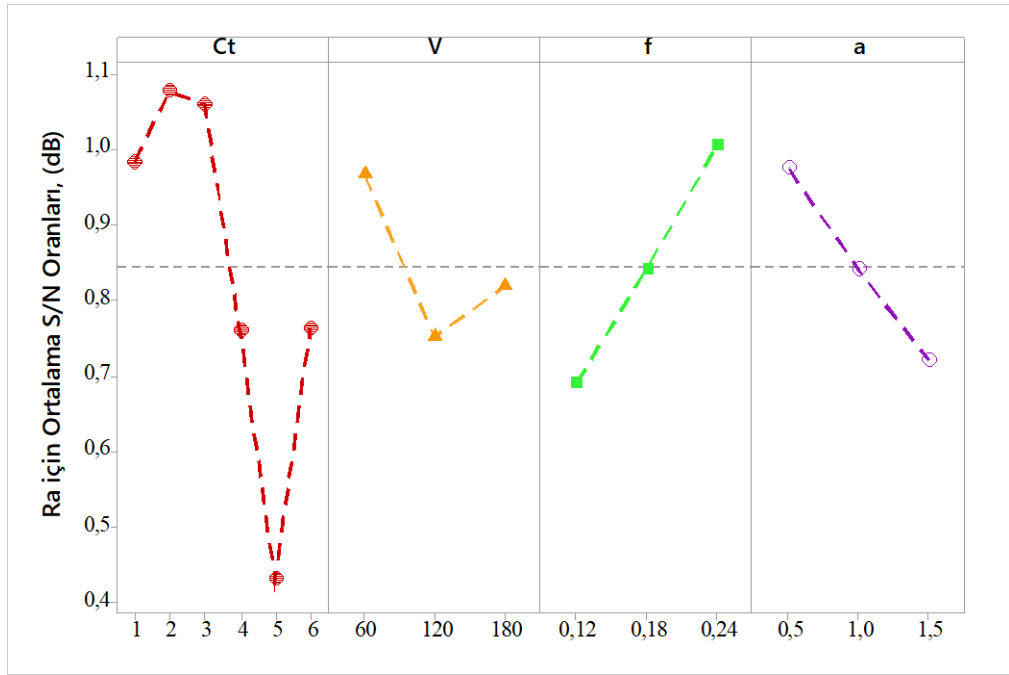
Yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) için kesme parametrelerinin ideal seviyeleri A kesici takım D-24 (seviye 5), B kesme hızı 120 m/dak (seviye 2), C ilerleme miktarı 0,12 mm/dev (seviye 1), ve D talaş derinliği 1,5 mm (seviye 3) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan tornalama deneyi sonucunda yüzey pürüzlülüğü değeri 0,208 µm ölçülmüştür. Şekil 5.9’da Fc (a) ve Ra (b) için kesme parametrelerinin seviye değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.11. AlTiN kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için S/N yanıt tablosu.

	Kesme parametreleri			
	A	B	C	D
<i>Fc</i>				
1	-47,54	-48,84	-47,06	-42,32
2	-47,40	-47,69	-48,26	-49,37
3	-49,27	-47,54	-48,75	-52,38
4	-47,27	-	-	-
5	-47,25	-	-	-
6	-49,41	-	-	-
Delta	2,16	1,31	1,69	10,06
<i>Ra</i>				
1	0,1638	0,7929	4,5537	0,5362
2	-0,5389	3,1135	1,9838	2,5184
3	-0,3585	2,7744	0,1433	3,6262
4	2,4640	-	-	-
5	8,0838	-	-	-
6	3,5473	-	-	-
Delta	8,6227	2,3206	4,4104	3,0899



a)



b)

Şekil 5.9. AITiN kaplamalı takımlar için kontrol faktörlerinin S/N oranları etki seviyeleri a) Fc, b) Ra.

5.4.2.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde kesme parametrelerinin etkilerini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları Çizelge 5.12’de yer almaktadır. Çizelge 5.12’e göre esas kesme kuvveti üzerinde (Ct) kesici takım, (V) kesme hızı, (f) ilerleme miktarı ve (a) talaş derinliğinin etki oranları sırasıyla %4,27 %2,33 %3,58 ve %89,7 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, esas kesme kuvvetini etkileyen en önemli parametre %89,7 katkı oranı ile (Ct) talaş derinliğidir. Yüzey pürüzlülüğü değeri için ise (Ct) kesici takım, (V) kesme hızı, (f) ilerleme miktarı ve (a) talaş derinliğinin etki oranları sırasıyla %57,91 %9,18 %18,85 ve %12,16 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü değerini etkileyen en önemli parametre %57,91 katkı oranı ile (Ct) kesici takım olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.12. AlTiN kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için varyans analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
<i>Fc</i>						
Ct	5	11610	2322	44,42	0,000	4,27
V	2	6340	3170	60,64	0,000	2,33
f	2	9751	4876	93,27	0,000	3,58
a	2	244004	122002	2333,73	0,000	89,7
Hata	6	314	52			0,12
Total	17	272019				100
<i>Ra</i>						
Ct	5	0,91413	0,182825	36,52	0,000	57,91
V	2	0,14491	0,072457	14,47	0,005	9,18
f	2	0,29751	0,148754	29,71	0,001	18,85
a	2	0,19204	0,096018	19,18	0,002	12,16
Hata	6	0,03004	0,005006			1,9
Total	17	1,57862				100

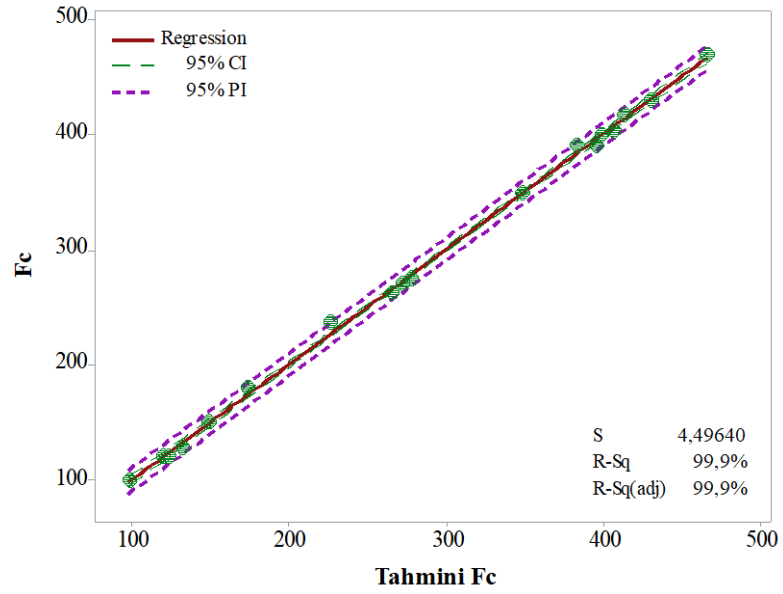
5.4.2.3. Regresyon Analizi

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerinin doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri aşağıda verilmiştir. Eşitlik 5.13’de yer alan Fc1 esas kesme kuvvetini Eşitlik 5.14’de ise Ra1 yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmin denklemini göstermektedir. Şekil 5.10’da doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini

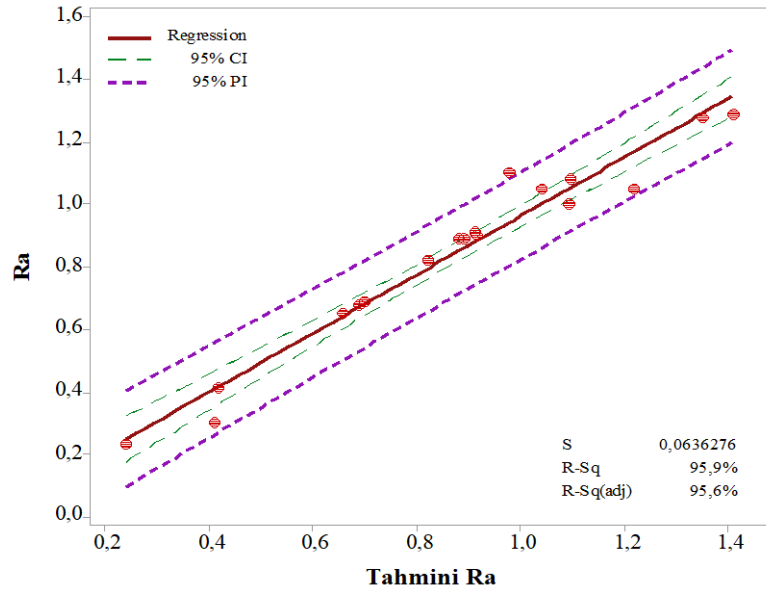
değerler ile gerçek değerler arasındaki kıyaslama yer almaktadır. Esas kesme kuvvetinin tahmini için oluşturulan doğrusal regresyon denkleminin R^2 değeri %95,43 iken yüzey pürüzlülüğü değeri için bu değer %65,41 olarak belirlenmiştir.

$$F_c = -63,3 + 6,87Ct - 0,376V + 464f + 283,8a \quad (5.13)$$

$$R_a = 1,108 - 0,0954Ct - 0,001235V + 2,624f - 0,253a \quad (5.14)$$



a)



b)

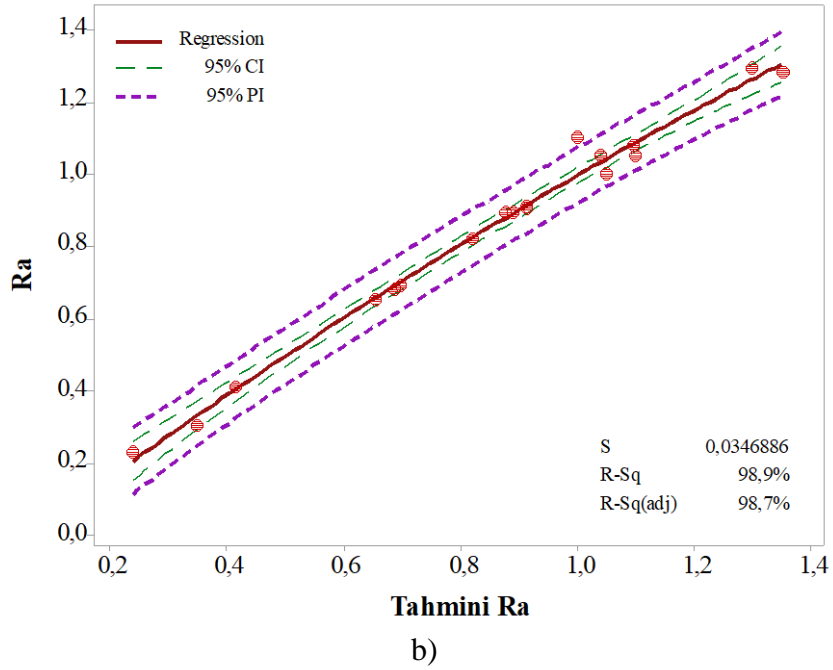
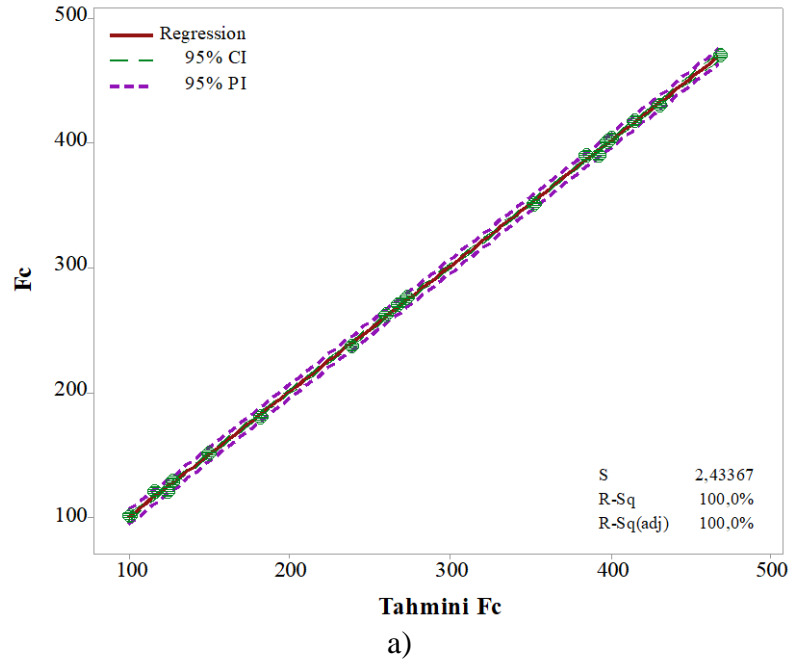
Şekil 5.10. AITin kaplamalı takımlar için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra.

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için ikinci dereceden regresyon analizi ile oluşturulan tahmin denklemleri sırasıyla Eşitlik 5.15 ve Eşitlik 5.16'da verilmiştir.

$$F_c = -42 + 10Ct - 2,05V + 403f + 411a + 0,00345V^2 + 2965f^2 - 102a^2 + 0,149CtV - 117Ctf + 1,7Cta - 2,6Vf + 0,703Va - 63fa \quad (5.15)$$

$$R_a = 1,22 - 0,041Ct - 0,0149V + 4,9f + 0,39a + 0,000052V^2 + 10,9f^2 + 0,047a^2 + 0,00052CtV - 0,3Ctf - 0,079Cta - 0,015Vf + 0,0009Vca - 3,16fa \quad (5.16)$$

Eşitlik 5.15'de yer alan F_{cq} esas kesme kuvvetinin ve Eşitlik 5.16'da yer alan R_{aq} yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmin denklemini göstermektedir. Şekil 5.11'de ikinci derece regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile gerçek değerler arasındaki kıyaslama yer almaktadır. Şekil 5.11'de tahmin edilen değerler ile deney sonuçları arasında çok iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen denklemlerin R^2 değerleri sırasıyla %97,67 ve %75,4 olarak belirlendi. Sonuç olarak, doğrusal regresyon modeline göre ikinci derece regresyon modelinde deneysel sonuçlara daha yakın tahmin değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.11. AlTiN kaplamalı takımlar için ikinci dereceden regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra.

5.4.2.4. Doğrulama Deneyleri

Optimum esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmininde sırasıyla Eşitlik 5.7 ve Eşitlik 5.8 kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için sırasıyla (A₅, B₃, C₁, D₁) ve (A₅, B₂, C₁, D₃) optimum

seviyeleridir. T_{Fc} ve T_{Ra} , deneysel çalışmadan elde edilen tüm F_c ve R_a değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Çizelge 5.10 göre, T_{Fc} ve T_{Ra} sırasıyla 283 N ve 0,845 μm hesaplanmıştır. Çizelge 5.13’de hesaplamalarda kullanılan çeşitli parametrelerin değerleri yer almaktadır. Eşitlik 5.7 ve Eşitlik 5.8’den sırasıyla $F_{c_{opt}}=61,5$ N ve $R_{a_{opt}}=0,37$ μm hesaplanmıştır. Eşitlik 5.9 ve 5.10 kullanılarak güven aralıkları $CI_{Fc}=17,64$ ve $CI_{Ra}=0,173$ hesaplanmıştır.

Çizelge 5.13. Çeşitli doğrulama parametreleri

	Ve	$F\alpha,1,fe$	α	fe	N	R	N	T_{dof}	n_{eff}
Fc	52	5,9874	0,05	6	18	3	18	11	1,5
Ra	0,005006								

$$[F_{c_{opt}} - CI_{Fc}] < F_{c_{exp}} < [F_{c_{opt}} + CI_{Fc}] = [61,5 - 17,64] < 76 < [61,5 + 17,64] = 43,86 < 76 < 79,14 \quad (5.17)$$

$$[R_{a_{opt}} - CI_{Ra}] < R_{a_{exp}} < [R_{a_{opt}} + CI_{Ra}] = [0,37 - 0,173] < 0,208 < [0,37 + 0,173] = 0,197 < 0,208 < 0,543 \quad (5.18)$$

Eşitlik 5.17 ve 5.18’den sırasıyla F_c değeri ($F_{c_{exp}}=76$ N), R_a değeri ($R_{a_{exp}}=0,208$ μm) güven aralığı sınırı içinde oldukları belirlenmiştir. Sonuç olarak, F_c ve R_a için sistem optimizasyonu, Taguchi metodu ile %95 anlamlılık seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Çizelge 5.14’de AlTiN kaplamalı takımlarda F_c ve R_a için doğrulama test sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 5.14. AlTiN kaplamalı takımlarda F_c ve R_a için doğrulama test sonuçları.

Seviye	Taguchi Met.			Doğrusal Tah. Denk.			İkinci Der. Tah. Denk.		
	Den.	Tah.	Hata (%)	Den.	Tah.	Error (%)	Den.	Tah.	Error (%)
<i>F_c</i>									
A5B3C1D1	76	92,1	21,18	76	90,95	19,63	76	64,25	15,46
A1B2C2D2	270	245	9,25	270	265,7	1,56	270	264,66	1,97
<i>R_a</i>									
A5B2C1D3	0,208	0,17	18,26	0,208	0,41	97,11	0,208	0,382	83,53
A1B2C2D2	0,9	0,70	22,22	0,9	1,08	20,13	0,9	1,024	13,77

Çizelge 5.14’de doğrulama testi sonuçlarında hata oranı sınırlar içerisinde elde edilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre, esas kesme kuvvetinin tahmin edilmesinde Taguchi metoduyla geliştirilen tahmin denklemlerinin yüksek doğrulukta sonuç verdiği ancak yüzey pürüzlülüğü değeri için analizlerde R^2 değerlerinin düşük elde edilmesinden dolayı tahmin denkleminin doğruluğunun düşük olduğu tespit edilmiştir.

5.4.3. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan TiCN-Al₂O₃ Kaplamalı Tungsten Karbür Takımların İstatistiksel Değerlendirilmesi

TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımların, ham ve farklı bekleme sürelerinde sıg ve derin kriyojenik işlem uygulanmış hallerinin işleme performansları Fc ve Ra göre değerlendirilmiştir ve ayrıca, kesme parametrelerinin etkileri analiz edilerek, optimum kesme şartları belirlenmiştir.

5.4.3.1. S/N Oranlarının Analizi

Çizelge 5.15’de işleme esnasında ölçülen esas kesme kuvveti ve işlenmiş yüzey üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ve bunlara karşılık gelen S/N oranları yer almaktadır.

Çizelge 5.15. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda Fc, Ra değerleri ve S/N oranları.

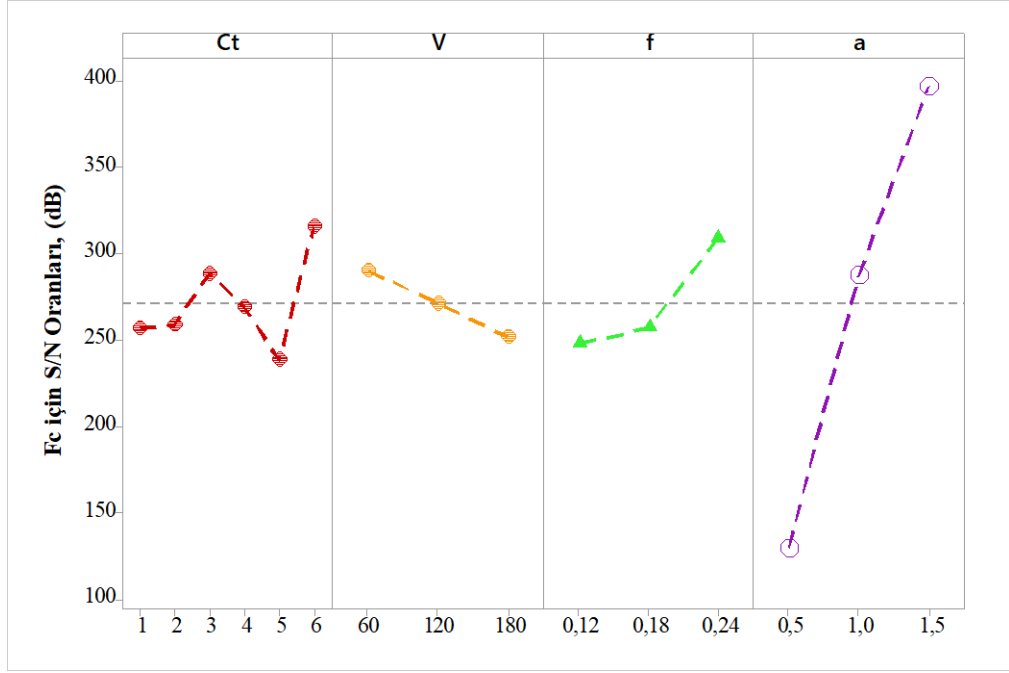
Test No	Kesme Parametreleri				Ra (µm)	Ra-S/N (dB)	Fc (N)	Fc-S/N (dB)
	A (Ct)	B (V)	C (f)	D (a)				
1	K-1	60	0,12	0,5	1,000	0,0001	115	-41,2140
2	K-1	120	0,18	1,0	0,900	0,9151	255	-48,1308
3	K-1	180	0,24	1,5	1,100	-0,8279	400	-52,0412
4	S-12	60	0,12	1,0	0,950	0,4455	250	-47,9588
5	S-12	120	0,18	1,5	0,850	1,4116	390	-51,8213
6	S-12	180	0,24	0,5	1,300	-2,2789	135	-42,6067
7	S-24	60	0,18	0,5	1,285	-2,1781	160	-44,0824
8	S-24	120	0,24	1,0	0,987	0,1137	335	-50,5009
9	S-24	180	0,12	1,5	0,800	1,9382	370	-51,3640
10	D-12	60	0,24	1,5	0,912	0,8001	450	-53,0643
11	D-12	120	0,12	0,5	0,680	3,3498	112	-40,9844
12	D-12	180	0,18	1,0	0,620	4,1522	245	-47,7833
13	D-24	60	0,18	1,5	0,423	7,4732	360	-51,1261
14	D-24	120	0,24	0,5	0,635	3,9445	125	-41,9382
15	D-24	180	0,12	1,0	0,240	12,3958	230	-47,2346
16	D-36	60	0,24	1,0	0,945	0,4914	405	-52,1491
17	D-36	120	0,12	1,5	0,350	9,1186	410	-52,2557
18	D-36	180	0,18	0,5	0,890	1,0122	130	-42,2789

Çizelge 5.16’de esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N yanıt tablosu verilmiştir. Esas kesme kuvveti (Fc) için kesme parametrelerinin ideal seviyeleri A kesici takım D-24 (seviye 5), B kesme hızı 180 m/dak (seviye 2), C ilerleme miktarı 0,12 mm/dev (seviye 1), ve D talaş derinliği 0,5 mm (seviye 3) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan tornalama deneyinde esas kesme kuvveti 70 N ölçülmüştür.

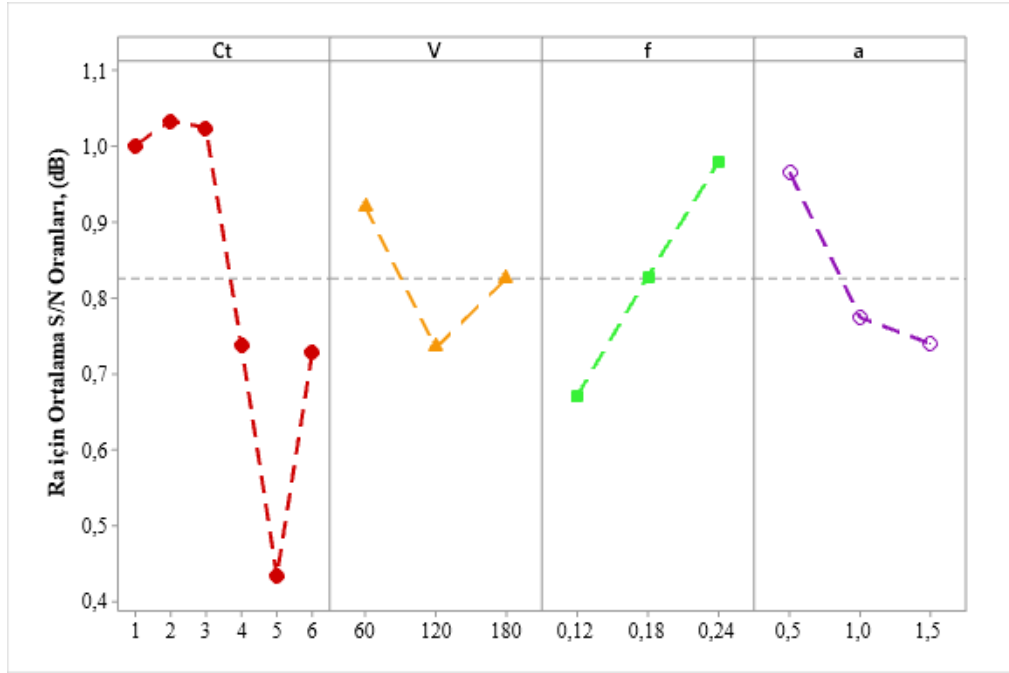
Yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) için kesme parametrelerinin ideal seviyeleri A kesici takım D-24 (seviye 5), B kesme hızı 120 m/dak (seviye 2), C ilerleme miktarı 0,12 mm/dev (seviye 1), ve D talaş derinliği 1,5 mm (seviye 3) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan tornalama deneyi sonucunda yüzey pürüzlülüğü değeri 0,195 µm ölçülmüştür. Şekil 5.12’de esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için kesme parametrelerinin seviye değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.16. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için S/N yanıt tablosu.

	Kesme parametreleri			
	A	B	C	D
<i>Fc</i>				
1	-47,13	-48,27	-46,84	-42,18
2	-47,46	-47,61	-47,54	-48,96
3	-48,65	-47,22	-48,72	-51,95
4	-47,28	-	-	-
5	-46,77	-	-	-
6	-48,89	-	-	-
Delta	2,13	1,05	1,88	9,76
<i>Ra</i>				
1	0,02910	1,17202	4,54133	0,64160
2	-0,14057	3,14224	2,13104	3,08561
3	-0,04207	2,73194	0,37382	3,31898
4	2,76736	-	-	-
5	7,93783	-	-	-
6	3,54073	-	-	-
Delta	8,07840	1,97021	4,16751	2,67738



a)



b)

Şekil 5.12. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlar için kontrol faktörlerinin S/N oranları etki seviyeleri a) Fc, b) Ra.

5.4.3.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde kesme parametrelerinin etkilerini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları Çizelge

5.17’de yer almaktadır. Çizelge 5.17’e göre esas kesme kuvveti üzerinde (Ct) kesici takım, (V) kesme hızı, (f) ilerleme miktarı ve (a) talaş derinliğinin etki oranları sırasıyla %4,47 %1,79 %5,2 ve %87,73 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, esas kesme kuvvetini etkileyen en önemli parametre %87,73 katkı oranı ile (Ct) talaş derinliğidir. Yüzey pürüzlülüğü için ise (Ct) kesici takım, (V) kesme hızı, (f) ilerleme miktarı ve (a) talaş derinliğinin etki oranları sırasıyla %59 %7,13 %19,91 ve %12,27 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü değerini etkileyen en önemli parametre %59 katkı oranı ile (Ct) kesici takım olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.17. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için varyans analizi sonuçları.

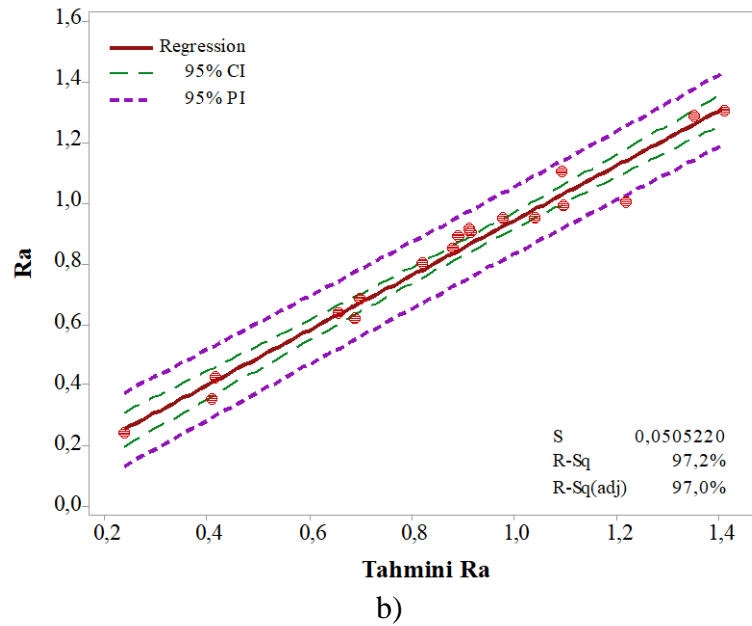
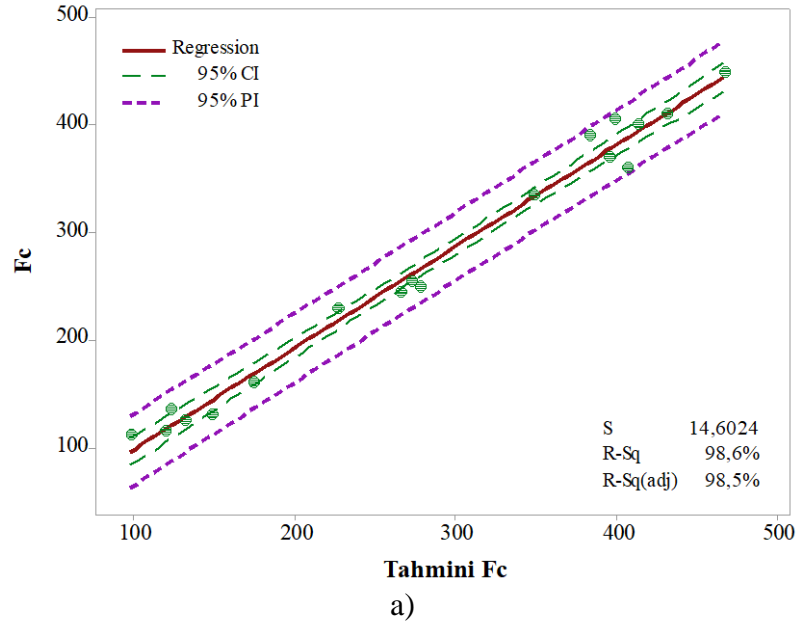
Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
<i>Fc</i>						
Ct	5	11020	2204	6,55	0,020	4,47
V	2	4409	2204	6,55	0,031	1,79
f	2	12815	6408	19,04	0,003	5,2
a	2	216359	108179	321,38	0,000	87,73
Hata	6	2020	337			0,82
Total	17	246623				100
<i>Ra</i>						
Ct	5	0,85374	0,170747	41,99	0,000	59
V	2	0,10324	0,051619	12,69	0,007	7,13
f	2	0,28803	0,144014	35,41	0,000	19,91
a	2	0,17760	0,088799	21,84	0,002	12,27
Hata	6	0,02440	0,004066			1,69
Total	17	1,44700				100

5.4.3.3. Regresyon Analizi

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerinin doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri aşağıda verilmiştir. Eşitlik 5.19’da yer alan Fc_i esas kesme kuvvetini Eşitlik 5.20’de ise Ra_i yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmin denklemini göstermektedir. Şekil 5.13’de doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile gerçek değerler arasındaki kıyaslama yer almaktadır. Esas kesme kuvvetinin tahmini için oluşturulan doğrusal regresyon denkleminin R² değeri %93,85 iken yüzey pürüzlülüğü değeri için bu değer %67,51 olarak belirlendi.

$$F_c = -69,9 + 6,07Ct - 0,319V + 504f + 267,2a \quad (5.19)$$

$$R_a = 1,026 - 0,0985Ct - 0,000785V + 2,582f - 0,226a \quad (5.20)$$



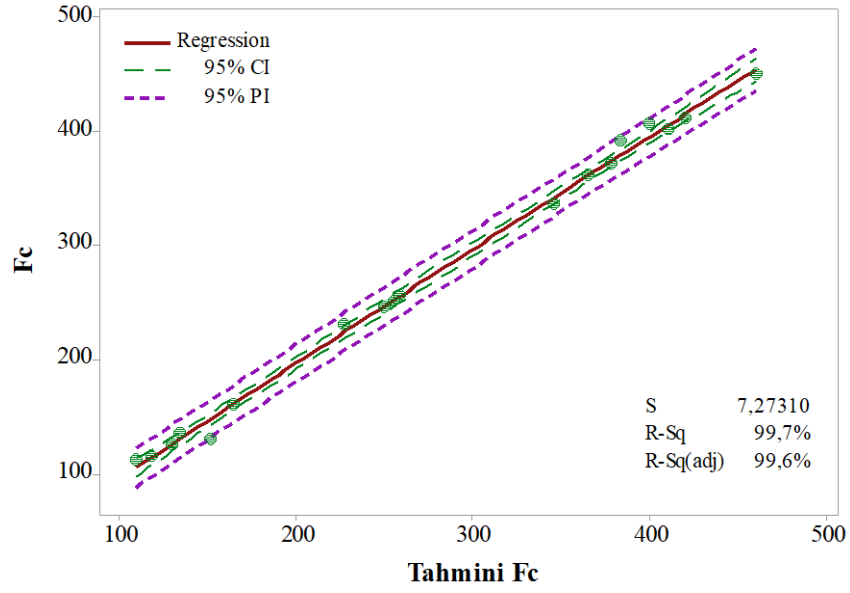
Şekil 5.13. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlar için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra

Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için ikinci dereceden regresyon analizi ile oluşturulan tahmin denklemleri sırasıyla Eşitlik 5.21 ve Eşitlik 5.22'de verilmiştir.

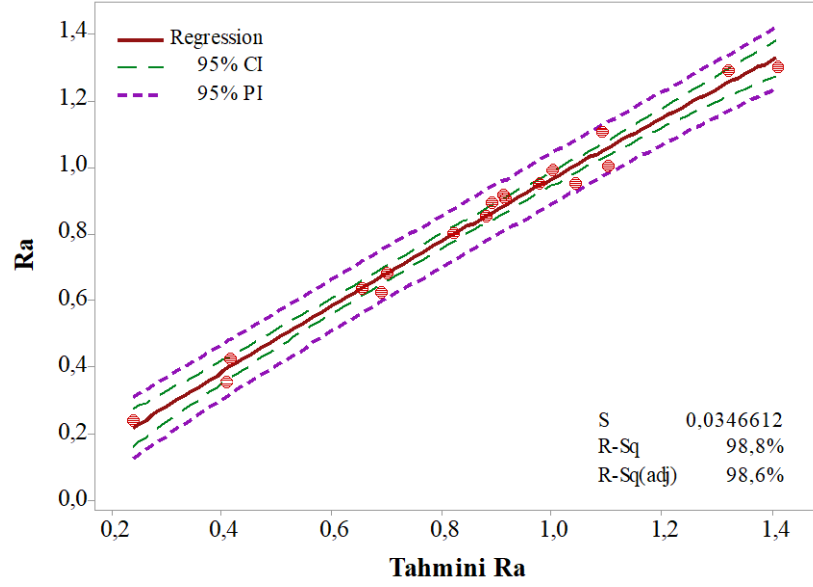
$$F_c = 1 + 4,9Ct - 0,5V - 614f + 337a + 0,00014V^2 + 4955f^2 - 88,3a^2 + 0,053CtV - 52Ctf + 4,7Cta - 3,51Vf + 0,592Va + 79fa \quad (5.21)$$

$$R_a = 1,07 + 0,046Ct - 0,0156V + 7,6f - 0,09a + 0,000056V^2 + 8,5f^2 + 0,274a^2 + 0,00054CtV - 0,8Ctf - 0,083Cta - 0,0166Vf + 0,00102Vca - 3,16fa \quad (5.22)$$

Eşitlik 5.21’de yer alan F_{c_q} esas kesme kuvvetinin, Eşitlik 5.22’de ise R_{a_q} yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmin denklemini göstermektedir. Şekil 5.14’de ikinci derece regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile gerçek değerler arasındaki kıyaslama yer almaktadır. Şekil 5.14’de tahmin edilen değerler ile deney sonuçları arasında çok iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen denklemlerin R^2 değerleri sırasıyla %96,46 ve %79,32 olarak belirlendi. Bu nedenle, doğrusal regresyon modeline göre ikinci derece regresyon modelinde deneysel sonuçlara daha yakın tahmin değerleri elde edilmiştir.



a)



b)

Şekil 5.14. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlar için ikinci dereceden regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması a) Fc, b) Ra.

5.4.3.4. Doğrulama DeneYleri

Optimum esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerinin tahmininde sırasıyla Eşitlik 5.7 ve Eşitlik 5.8 kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri için sırasıyla (A₅, B₃, C₁, D₁) ve (A₅, B₂, C₁, D₃) optimum seviyeleridir. T_{Fc} ve T_{Ra}, deneysel çalışmadan elde edilen tüm Fc ve Ra değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Çizelge 5.15 göre, T_{Fc} ve T_{Ra} sırasıyla 270 N ve 0,825

μm hesaplanmıştır. Eşitlik 5.7 ve Eşitlik 5.8'den $F_{c_{opt}}=57,3$ N ve $R_{a_{opt}}= 0,1$ μm hesaplanmıştır. Çizelge 5.18'de hesaplamalarda kullanılan çeşitli doğrulama parametrelerin değerleri yer almaktadır. Eşitlik 5.9 ve 5.10 kullanılarak güven aralıkları $CI_{F_c}=44,91$ ve $CI_{R_a}= 0,156$ hesaplanmıştır.

Çizelge 5.18. Çeşitli doğrulama parametreleri.

	V_e	$F_{\alpha,1,fe}$	α	fe	N	R	N	T_{dof}	n_{eff}
Fc	337								
Ra	0,004066	5,9874	0,05	6	18	3	18	11	1,5

$$[F_{c_{opt}} - CI_{F_c}] < F_{c_{exp}} < [F_{c_{opt}} + CI_{F_c}] = [57,3 - 44,91] < 70 < [57,3 + 44,91] = 12,38 < 70 < 102,21 \quad (5.23)$$

$$[R_{a_{opt}} - CI_{R_a}] < R_{a_{exp}} < [R_{a_{opt}} + CI_{R_a}] = [0,1 - 0,156] < 0,195 < [0,1 + 0,156] = -0,056 < 0,195 < 0,256 \quad (5.24)$$

Eşitlik 5.23 ve Eşitlik 5.24'den sırasıyla Fc değeri ($F_{c_{exp}}= 70$ N) ve Ra değeri ($R_{a_{exp}} = 0,195$ μm) güven aralığı sınırı içerisinde oldukları belirlenmiştir. Sonuç olarak, Fc ve Ra için sistem optimizasyonu, Taguchi metodu ile %95 anlamlılık seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.19. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda Fc ve Ra için doğrulama test sonuçları.

Seviye	Taguchi Met.			Doğrusal Tah. Denk.			İkinci Der. Tah. Denk.		
	Den.	Tah.	Hata (%)	Den.	Tah.	Error (%)	Den.	Tah.	Error (%)
Fc									
A5B3C1D1	70	87	24,28	70	97,11	38	70	72,471	3,53
A1B2C2D2	255	247	3,13	255	255,8	0,31	255	255,2	0,07
Ra									
A5B2C1D3	0,195	0,16	17,94	0,195	0,402	106	0,195	0,365	87,17
A1B2C2D2	0,9	0,68	24,44	0,9	1,07	19,11	0,9	1,026	14

Çizelge 5.19 göre doğrulama testi sonuçlarında hata oranı sınırlar içerisinde elde edilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre, esas kesme kuvvetinin tahmin edilmesinde

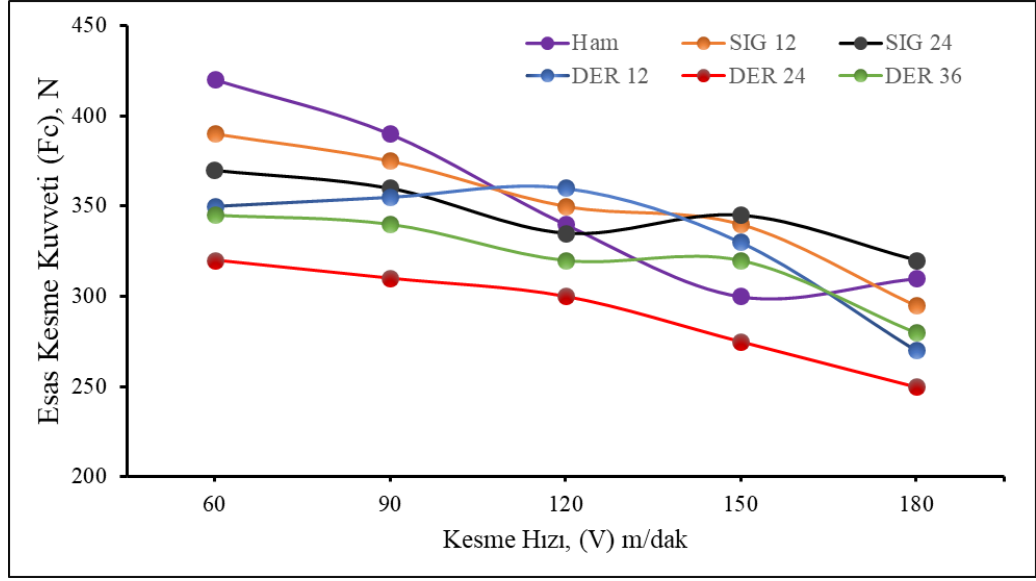
Taguchi metoduyla geliştirilen tahmin denklemlerinin yüksek doğrulukta sonuç verdiği ancak yüzey pürüzlülüğü değeri için analizlerde R^2 değerlerinin düşük elde edilmesinden dolayı yüzey pürüzlülüğü değeri için geliştirilen tahmin denkleminin doğruluğunun düşük olduğu tespit edilmiştir.

5.5. KESME KUVVETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Talaşlı imalat işlemlerinde etkin bir şekilde kesme işleminin yapılabilmesi için kesme kuvvetlerinin bilinmesi gerekmektedir. Önemli işlenebilirlik kriterlerinden birisi olan kesme kuvveti, talaş kaldırmak için gerekli olan gücün hesaplanmasında ve ayrıca, takım malzemesi ve takım geometrisinin seçiminde etkin rol oynamaktadır. Bu bağlamda, Inconel 625 süperal aşımının tornalama deneylerinde ölçülen kesme kuvvetlerinin üç bileşeni olan esas kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvet (F_r) üç yönde ölçümler ile belirlenmiştir. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi talaş oluşum mekaniğinde etkin rol oynayan esas kesme kuvveti bileşeni üzerinden yapılmıştır. Bu bölümde; işlemsiz ve farklı soğuma sürelerinde sıg ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımların ve kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde grafikler ile gösterilmiştir.

5.5.1. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan Kaplamasız Tungsten Karbür Takımlar için Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar ile Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, beş farklı kesme hızlarında (60, 90, 120, 150 ve 180 m/dak), sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür takımların ve kesme hızının F_c değerlerine etkisi Şekil 5.15’de verilmiştir.

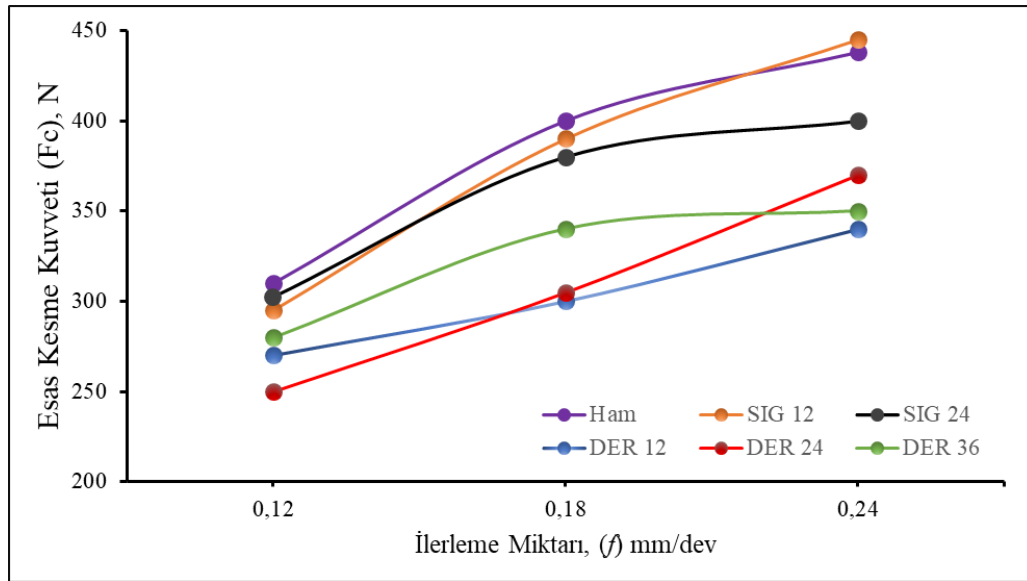


Şekil 5.15. Kaplamasız takımlarda kesme hızına bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.15’de görüldüğü gibi kaplamasız ve farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmış tungsten karbür takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneylerinde 60 m/dak kesme hızında işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Fc değeri 420 N olarak ölçülmüştür. 60 m/dak kesme hızında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan tornalama deneylerinde Fc değeri sırasıyla 390 N, 370 N, 350 N, 319,82 N ve 345 N ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takımda kesme hızının 60 m/dak’dan 120 m/dak’ya artırılması ile yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık olarak %19,14 (340 N) azalmış ve kesme hızının 120 m/dak’dan 180 m/dak’ya arttırılmasıyla Fc değeri yaklaşık olarak %8,82 (310 N) azalmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan D24’de (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) ise kesme hızının 60 m/dak’dan 120 m/dak’ya arttırılması ile Fc değeri yaklaşık olarak %6,25 (300 N) azalmış, kesme hızının 120 m/dak’dan 180 m/dak’ya arttırılmasıyla Fc değeri yaklaşık olarak %12,5 (280 N) azalmıştır. Kesme hızının artması ile Fc değerlerinin azalması beklenen bir durumdur. Kesme hızının artması ile Fc değerlerinin azalması, kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın artmasıyla takım-talaş temas yüzeyindeki akma bölgesinde yapışan malzemenin kayma dayanımının azalması ve buna bağlı olarak takım-talaş temas uzunluğunun azalması ile açıklanabilir [78,79].

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı ilerleme miktarlarında (0,12, 0,18 ve 0,24 mm/dev), sabit kesme hızında (180 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneylerinde ölçülen Fc değerleri üzerinde ilerleme miktarının ve kesme şartlarının etkisi Şekil 5.16’de sunulmuştur.

Şekil 5.16’da 0,12 mm/dev ilerleme miktarında işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Fc değeri 310 N olarak ölçülmüştür. 0,12 mm/dev ilerleme miktarında farklı soğuma sürelerinde siğ ve derin kriyojenik işlem uygulanan SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 takımlar kullanılarak yapılan tornalama deneylerinde Fc değeri sırasıyla 295 N, 302 N, 270 N, 250 N ve 280 N ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takımında ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 0,24 mm/dev artırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değerinde sırasıyla %29 (400 N) ve %41,29 (438 N) oranlarında bir artış olmuştur.

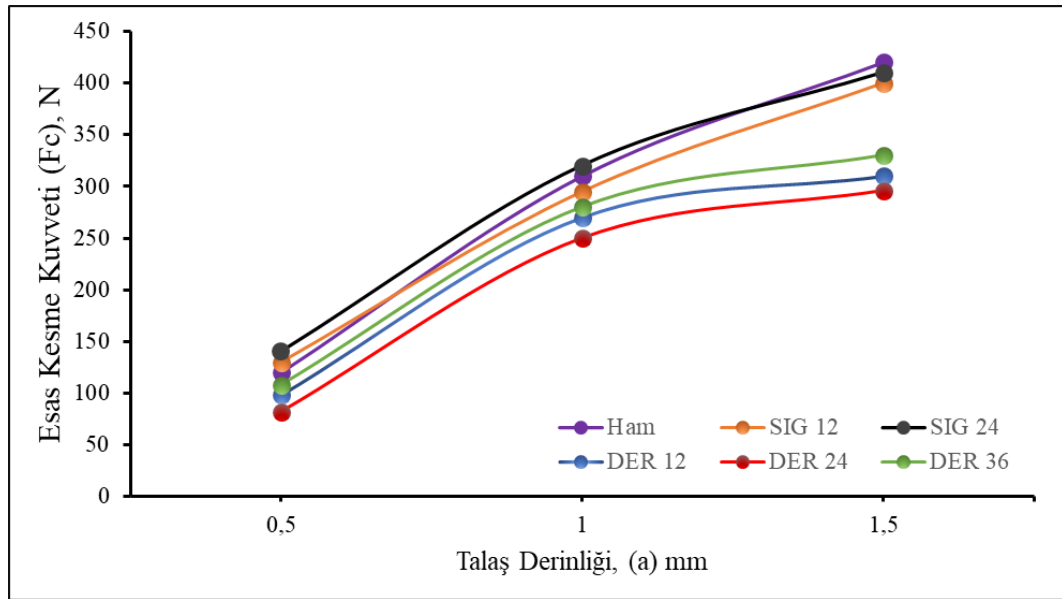


Şekil 5.16. Kaplamasız takımlarda ilerleme miktarına bağlı Fc değişimi.

Kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 0,24 mm/dev artırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değerlerinde sırasıyla %21,98 (304,95 N) ve %48 (370 N) oranlarında bir artış görülmüştür. 0,24 mm/dev

ilerleme miktarında işlemsiz (ham) ve optimum kesici takım seviyesi olan, D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımı karşılaştırıldığında, işlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 kesici takım ile yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık %18,37 oranında daha düşük belirlenmiştir. Şekil 5.16'ya bakıldığında ilerleme miktarının artması ile yapılan deneylerde Fc değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum, ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak talaş kesitinin artması ile talaşın deforme edilmesi için gerekli olan enerjinin artması ile açıklanabilir.

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı talaş derinliğinde (0,5, 1 ve 1,5 mm), sabit kesme hızında (180 mm/dev) ve sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.17'de tornalama deneylerinde ölçülen Fc değerleri üzerinde talaş derinliğinin ve kesme şartlarının etkisi görülmektedir.

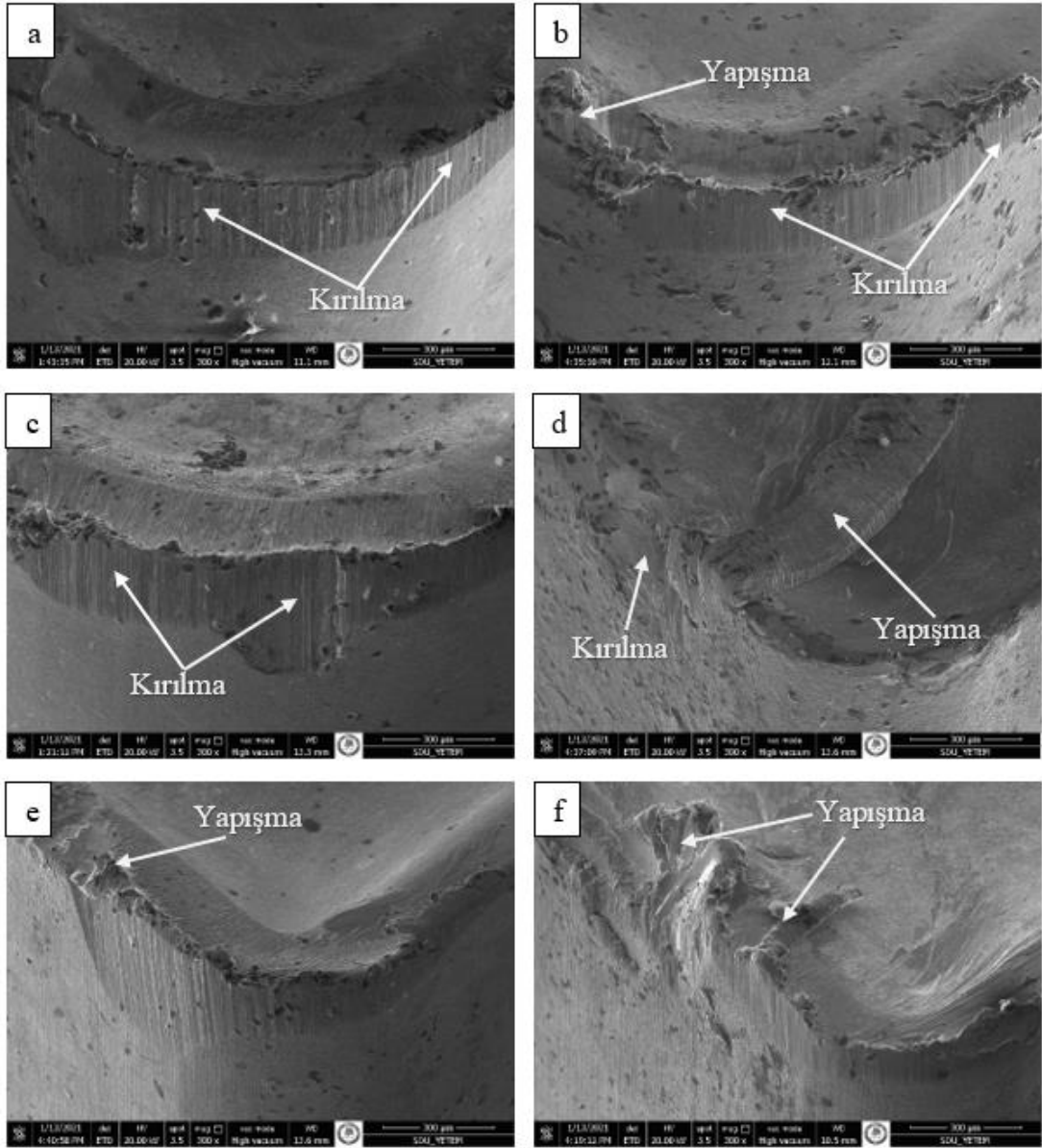


Şekil 5.17. Kaplamasız takımlarda talaş derinliğine bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.17'de 0,5 mm talaş derinliğinde, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Fc değeri 120 N olarak ölçülmüştür. Bu talaş derinliğinde farklı soğuma sürelerinde sıg ve derin kriyojenik işlem uygulanan SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 takımlar kullanılarak yapılan tornalama deneylerinde Fc değeri sırasıyla 130 N, 140 N, 98 N, 82 N ve 108 N ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takımında talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak yapılan deneylerde

1,5 mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde kesme kuvvetleri sırasıyla %158,3 (310 N) ve %250 (420 N) oranlarında artmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan DER24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 1,5 mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değeri sırasıyla %204 (250 N) ve %260 (296 N) oranlarında bir artış sergilemiştir. 1,5 mm talaş derinliğinde işlemsiz (ham) ve optimum kesici takım seviyesi olan, DER24 takım karşılaştırıldığında, işlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 kesici takım ile yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık %41,89 oranında daha düşük belirlenmiştir. Bütün takımlarda talaş derinliğinin artması ile yapılan deneylerde Fc değerlerinin arttığı görülmektedir.

Şekil 5.18’de kaplamasız kesici takımlar ile 0,12 mm/dev ilerleme miktarı, 180 m/dak kesme hızı ve 1 mm talaş derinliğinde yapılan deneyler sonrası kesici takımlarda a) işlemsiz, b) SIG12 c) SIG24 d) DER12 e) DER24 f) DER36 meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri yer almaktadır.



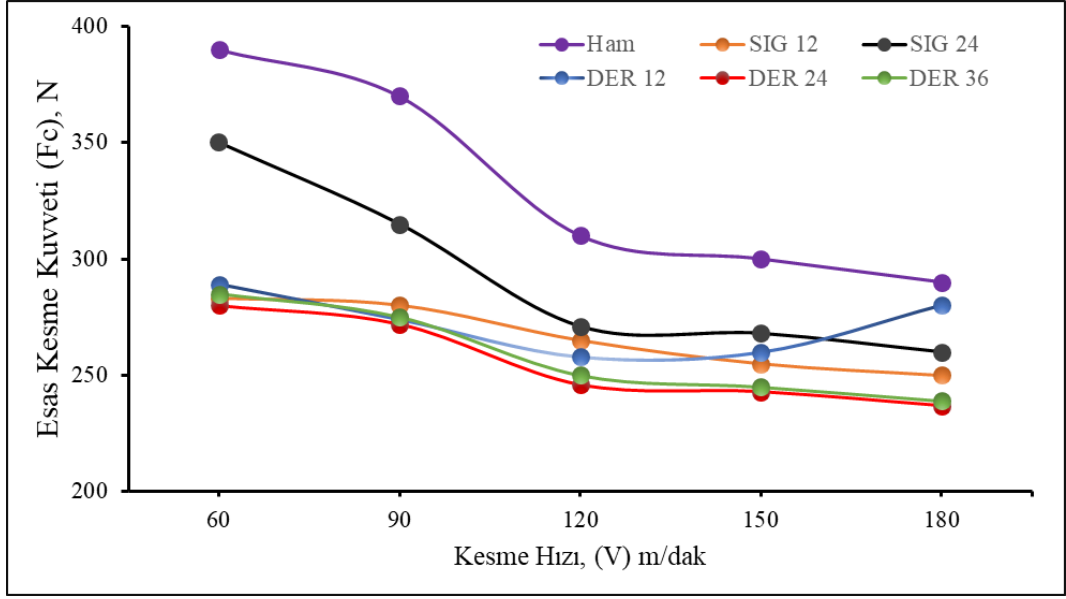
Şekil 5.18. Kaplamasız kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri.

Şekil 5.18 (f)'de aşınma görüntüleri incelendiğinde, yüksek kesme hızlarında yapılan tornalama deneylerinde kesme bölgesinde oluşan yüksek ısıya bağlı olarak ısıl yumuşamadan dolayı çıkan talaşların kesici takıma yapıştığı görülmektedir. Ayrıca, işlemsiz ve sığ kriyojenik işlem uygulanmış takımlar ile yapılan deneyler sonrası kesici takımlarda kırılmalar görülürken derin kriyojenik işlem uygulanmış takımlar ile yapılan deneyler sonrası kesici takımlarda küçük kırılmalar ile birlikte çoğunlukla yığıntı talaş (BUE) oluşumu görülmektedir.

Her bir kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği değerlerinde yapılan deneylerde, işlemsiz (ham) takımlara göre kriyojenik işlem uygulanan takımlarda esas kesme kuvvetinin (F_c) azaldığı görülmektedir. Bu nedenle, işlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar ile F_c değerleri arasındaki etkileşim Taguchi analiziyle belirlenen optimum seviyeler üzerinden incelenmiştir. İşlemsiz (ham) takım ile yapılan deneylerde optimum kesici takım seviyesi olan D24 takımın karşılaştırılması optimum kesme hızı seviyesi 180 m/dak, ilerleme miktarı seviyesi 0,12 mm/dev ve değişimin daha iyi anlaşılabilmesi için 1 mm talaş derinliğinde elde edilen F_c değerleri üzerinden yapılmıştır. Bu kesme şartlarında işlemsiz (ham) kesici takım ile yapılan deneylerde F_c değeri 310 N iken aynı şartlarda D24 kesici takım ile yapılan deneylerde F_c değeri 250 N ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan) kesici takımda F_c değeri yaklaşık olarak %19,35 azalmıştır. İlerleme miktarı ve talaş derinliği arttıkça bu oranda artmaktadır. Benzer çalışmalarda da görülebileceği gibi bu durum, kriyojenik işlem sonrası kesici takımda ince karbürlerin oluşması ile artan sertlik ve aşınma direnci ile açıklanabilir [68,71,80].

5.5.2. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan AlTiN Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlar için Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar ile Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, beş farklı kesme hızlarında (60, 90, 120, 150 ve 180 m/dak), sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. Kesme hızının ve işlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımların F_c değerlerine etkisi Şekil 5.19'da sunulmuştur.

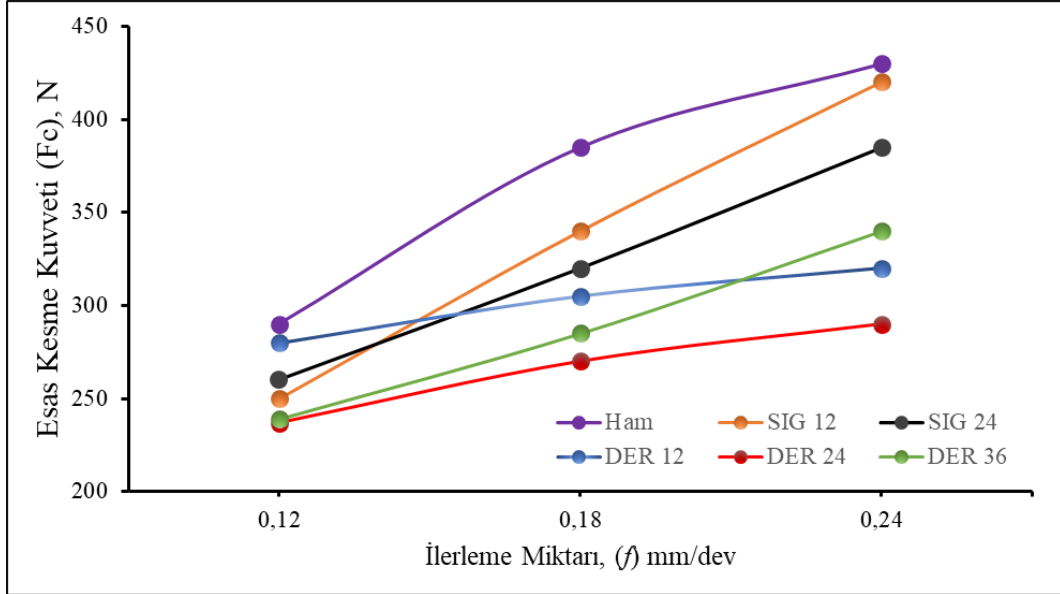


Şekil 5.19. AlTiN kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.19 incelendiğinde işlemsiz (ham) AlTiN kaplamalı takım ile 60 m/dak kesme hızında yapılan deneylerde Fc değeri 390 N olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre 60 m/dak kesme hızında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Fc değeri sırasıyla %37,8 (283 N), %11,41 (350 N), %34,94 (289 N), %39,28 (280 N) ve %36,84 (285 N) azalmıştır. İşlemsiz (ham) takım için kesme hızının 60 m/dak'dan 120 m/dak'ya arttırılması ile yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık olarak %28,8 (310 N) azalmış ve kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değerinde %6,45'lik (290 N) bir azalma olmuştur. Taguchi methoduyla belirlenen ve kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise kesme hızının 60 m/dak'dan 120 m/dak'ya arttırılması ile yapılan deneyde Fc değeri yaklaşık olarak %14,63 (246 N) azalmış ve kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla yapılan deneyde Fc değeri yaklaşık olarak %3,79 (237 N) azalmıştır. Düşük kesme hızlarında kesme kuvvetleri yüksek çıkmaktadır. Bu durum üzerinde kesme bölgesindeki sıcaklık artışının fazla olmaması ve takım-talaş temas yüzeyindeki akma bölgesinde yapışan malzemenin kayma dayanımının azalmamasının etkili olduğu düşünülmektedir.

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı ilerleme

miktarlarında (0,12, 0,18 ve 0,24 mm/dev), sabit kesme hızında (180 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneylerinde ölçülen Fc değerleri üzerinde ilerleme miktarının ve kesme şartlarının etkisi Şekil 5.20’de sunulmuştur.

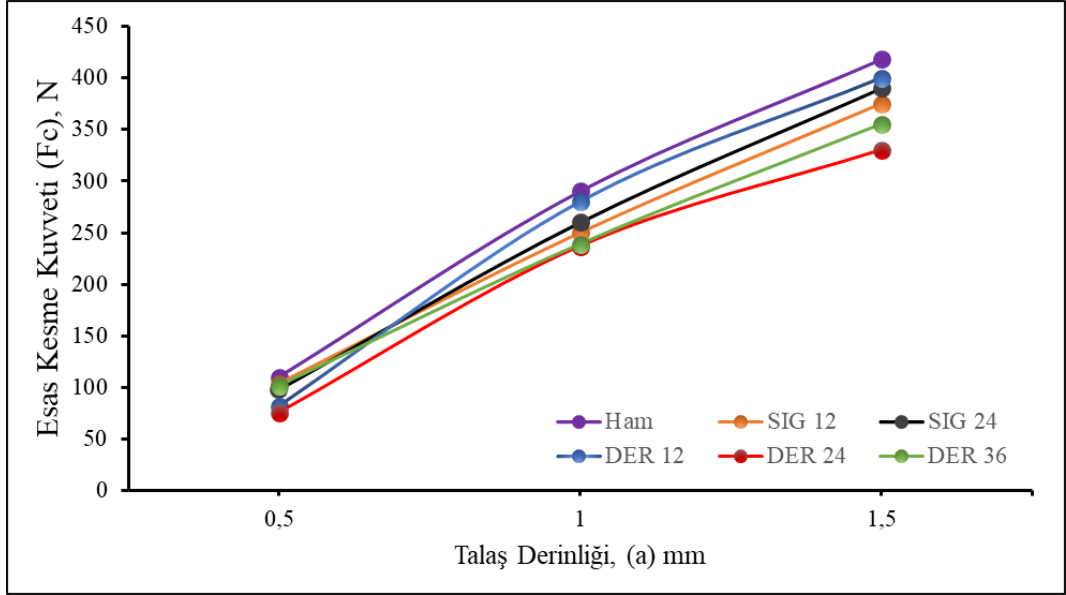


Şekil 5.20. AlTiN kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.20’de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Fc değeri 290 N olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre bu ilerleme miktarında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Fc değeri sırasıyla %16 (250 N), %11,53 (260 N), %3,57 (280 N), %22,36 (237 N) ve %21,33 (239 N) azalmıştır. İlerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 0,24 mm/dev artırılmasıyla yapılan deneylerde işlemsiz (ham) takımında sırasıyla %32,75 (385 N) ve %48,27 (430 N) oranlarında bir artış olmuştur. Kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 0,24 mm/dev artırılmasıyla yapılan deneylerde sırasıyla %13,92 (270 N) ve %22,36 (290 N) oranlarında bir artış görülmüştür. Şekil 5.20 incelendiğinde bütün kesici takımlarda ilerleme miktarının artması ile yapılan deneylerde Fc değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum literatürde birçok çalışmada ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak, talaş kesitinin artmasıyla takım temas yüzeyinin

büyümesi ve takımda meydana gelen gerilmelerin daha geniş bir yüzeyde etkili olması ile açıklanmaktadır [81-83].

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı talaş derinliğinde (0,5, 1 ve 1,5 mm), sabit kesme hızında (180 mm/dev) ve sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.21’de tornalama deneylerinde ölçülen Fc değerleri üzerinde talaş derinliğinin ve kesme şartlarının etkisi görülmektedir.



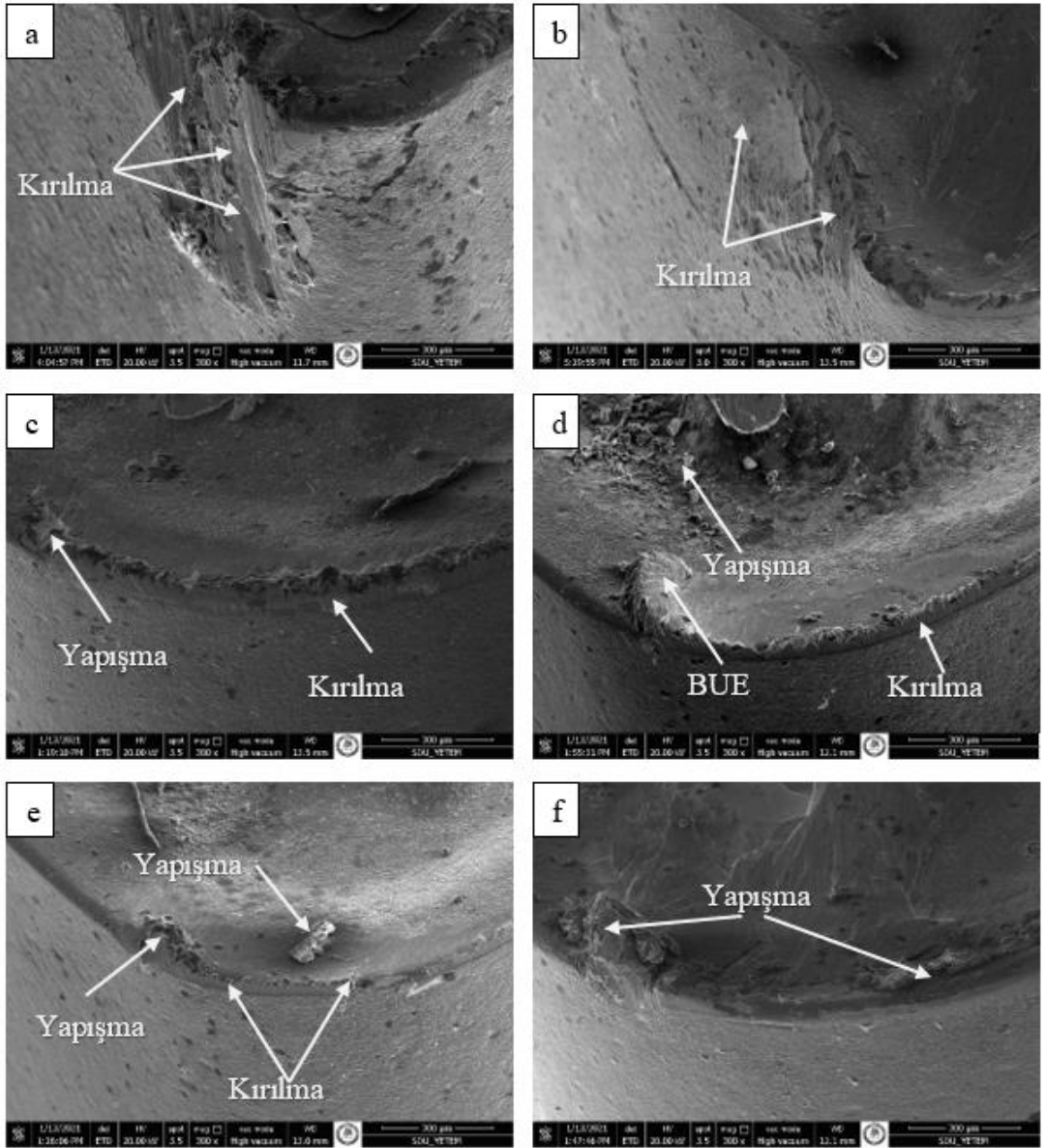
Şekil 5.21. AlTiN kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.21’de 0,5 mm talaş derinliğinde, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Fc değeri 110 N olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre 0,5 mm talaş derinliğinde farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Fc değeri sırasıyla %5,76 (104 N), %12,24 (98 N), %34,14 (82 N), %44,73 (76 N) ve %7,84 (102 N) oranlarında azalmıştır. Talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak talaş derinliğinin 1,5 mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde işlemsiz (ham) takımında sırasıyla %163,63 (290 N) ve %280 (418 N) oranlarında artmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan DER24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve

%100 oranlarında arttırılarak 1,5 mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde sırasıyla %211,84 (237 N) ve %334,21 (330 N) oranlarında artış sergilemiştir. 1,5 mm talaş derinliğinde işlemsiz (ham) ve optimum kesici takım seviyesi olan, DER24 takım karşılaştırıldığında, işlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 kesici takımda Fc değeri yaklaşık %26,66 oranında daha düşük belirlenmiştir. Şekil 5.21 incelendiğinde, bütün takımlarda, talaş derinliğinin artması ile yapılan deneylerde Fc değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu duruma talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak talaş kesitinin artması ile kesici takım üzerine gelen yüklerin artmasının neden olduğu düşünülmektedir.

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar ile yapılan deneylerde Fc değerleri arasındaki etkileşim Taguchi analiziyle belirlenen optimum seviyeler üzerinden incelenmiştir. İşlemsiz (ham) takım ile optimum kesici takım seviyesi olan D24 takımın karşılaştırılması optimum kesme hızı seviyesi 180 m/dak, ilerleme miktarı seviyesi 0,12 mm/dev ve değişimin daha iyi anlaşılabilmesi için 1 mm talaş derinliğinde yapılan deneylerde ölçülen Fc değerleri üzerinden yapılmıştır. Bu kesme şartlarında işlemsiz (ham) kesici takım ile yapılan deneyde Fc değeri 290 N iken aynı şartlarda D24 kesici takım ile yapılan deneyde Fc değeri 237 N olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan) kesici takımda Fc değeri yaklaşık olarak %22,36 azalmıştır.

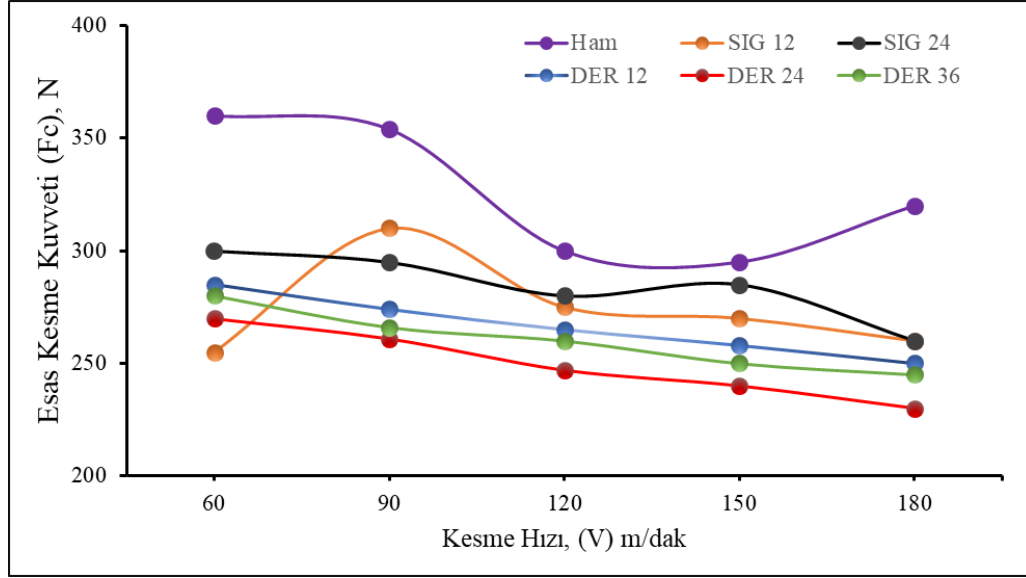
Şekil 5.22’de 0,12 mm/dev ilerleme miktarı, 180 m/dak kesme hızı ve 1 mm talaş derinliğinde yapılan deneylerde AlTiN kaplamalı kesici takımlara (a) işlemsiz, b) SIG12 c) SIG24 d) DER12 e) DER24 f) DER36) ait aşınmaların SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.22. AlTiN kaplamalı kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri.

5.5.3. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan TiCN-Al₂O₃ Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlar için Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar ile Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, beş farklı kesme hızlarında (60, 90, 120, 150 ve 180 m/dak), sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımların ve kesme hızının Fc değerlerine etkisi Şekil 5.23’de sunulmuştur.

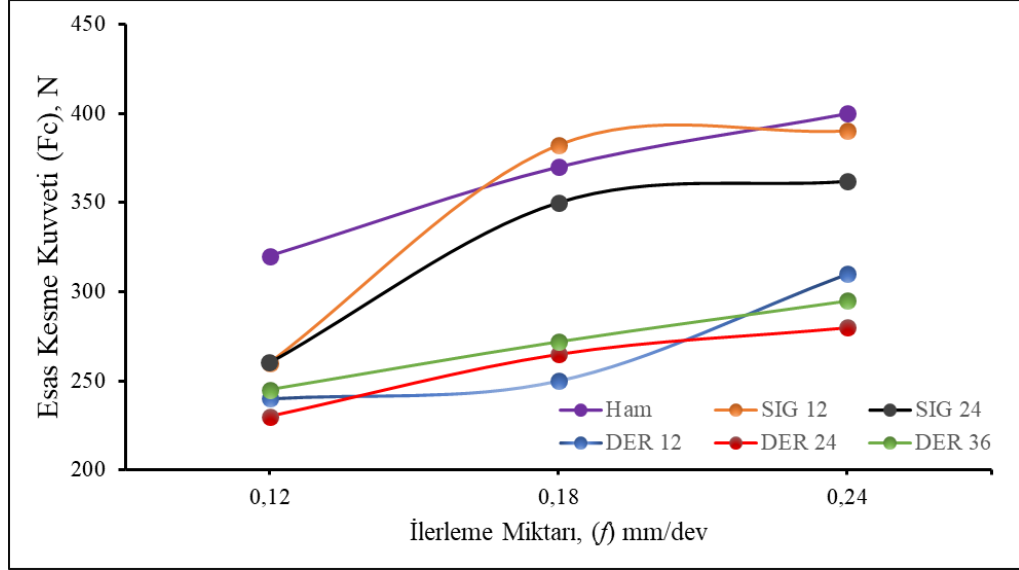


Şekil 5.23. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.23 incelendiğinde işlemsiz (ham) TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takım ile 60 m/dak kesme hızında yapılan deneylerde Fc değeri 360 N ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre 60 m/dak kesme hızında farklı bekleme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Fc değerleri sırasıyla %47,17 (255 N), %20 (300 N), %26,31 (285 N), %33,33 (270 N) ve %28,57 (280 N) azalmıştır. İşlemsiz (ham) takım için kesme hızının 60 m/dak'dan 120 m/dak'ya arttırılması ile yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık olarak %20 (300 N) azalmış ve kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla ile yapılan deneylerde Fc değerinde %12,5'lik (320 N) bir azalma olmuştur. Taguchi metoduyla belirlenen ve kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise kesme hızının 60 m/dak'dan 120 m/dak'ya arttırılması ile yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık olarak %9,31 (247N) azalmış ve kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık olarak %17,39 (230 N) azalmıştır.

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı ilerleme miktarlarında (0,12, 0,18 ve 0,24 mm/dev), sabit kesme hızında (180 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneylerinde ölçülen Fc

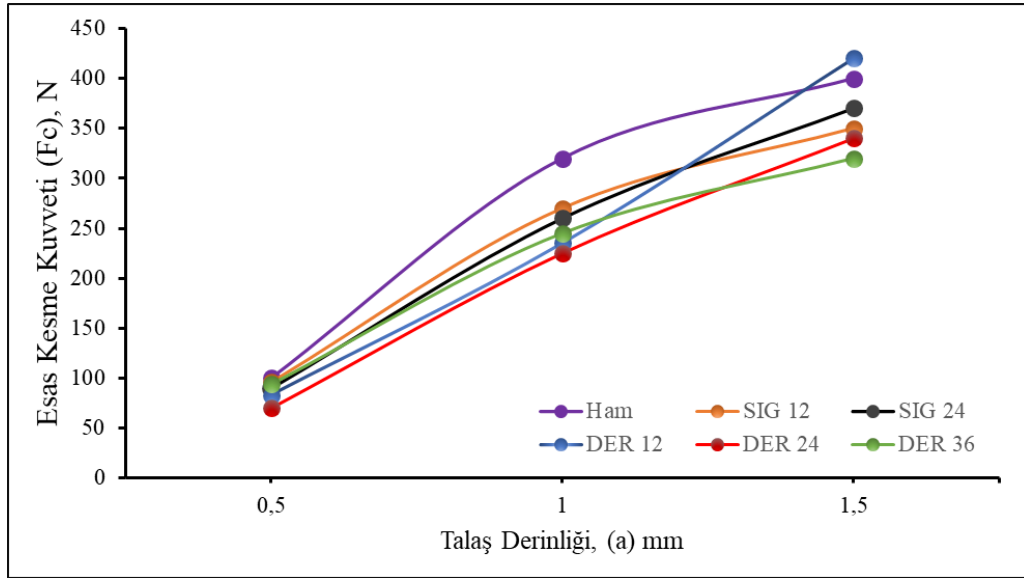
değerleri üzerinde ilerleme miktarının ve kesme şartlarının etkisi Şekil 5.24'de sunulmuştur.



Şekil 5.24. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.24'de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneyinde Fc değeri 320 N olarak ölçülmüştür. Şekil 5.26 incelendiğinde takım üzerindeki aşınmalar görülmektedir. Bu kesme parametrelerinde esas kesme kuvvetinin ani bir artış göstermesinde takımın burun kısmındaki aşınmanın neden olduğu düşünülmektedir. İşlemsiz (ham) takımında ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 0,24 mm/dev arttırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değerlerinde sırasıyla %13,51 (370 N) ve %25 (400N) oranlarında bir artış olmuştur. Kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 0,24 mm/dev arttırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değerinde sırasıyla %15,21 (265 N) ve %21,73 (280 N) oranlarında bir artış görülmüştür. Şekil 5.24 incelendiğinde bütün kesici takımlarda ilerleme miktarının artması ile yapılan deneylerde Fc değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Literatürde, ilerleme miktarındaki artışa ile birlikte Fc değerlerinin arttığını gösteren birçok çalışma vardır [81-83].

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı talaş derinliğinde (0,5, 1 ve 1,5 mm), sabit kesme hızında (180 mm/dev) ve sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.25’de tornalama deneylerinde ölçülen Fc değerleri üzerinde talaş derinliğinin ve kesme şartlarının etkisi görülmektedir.



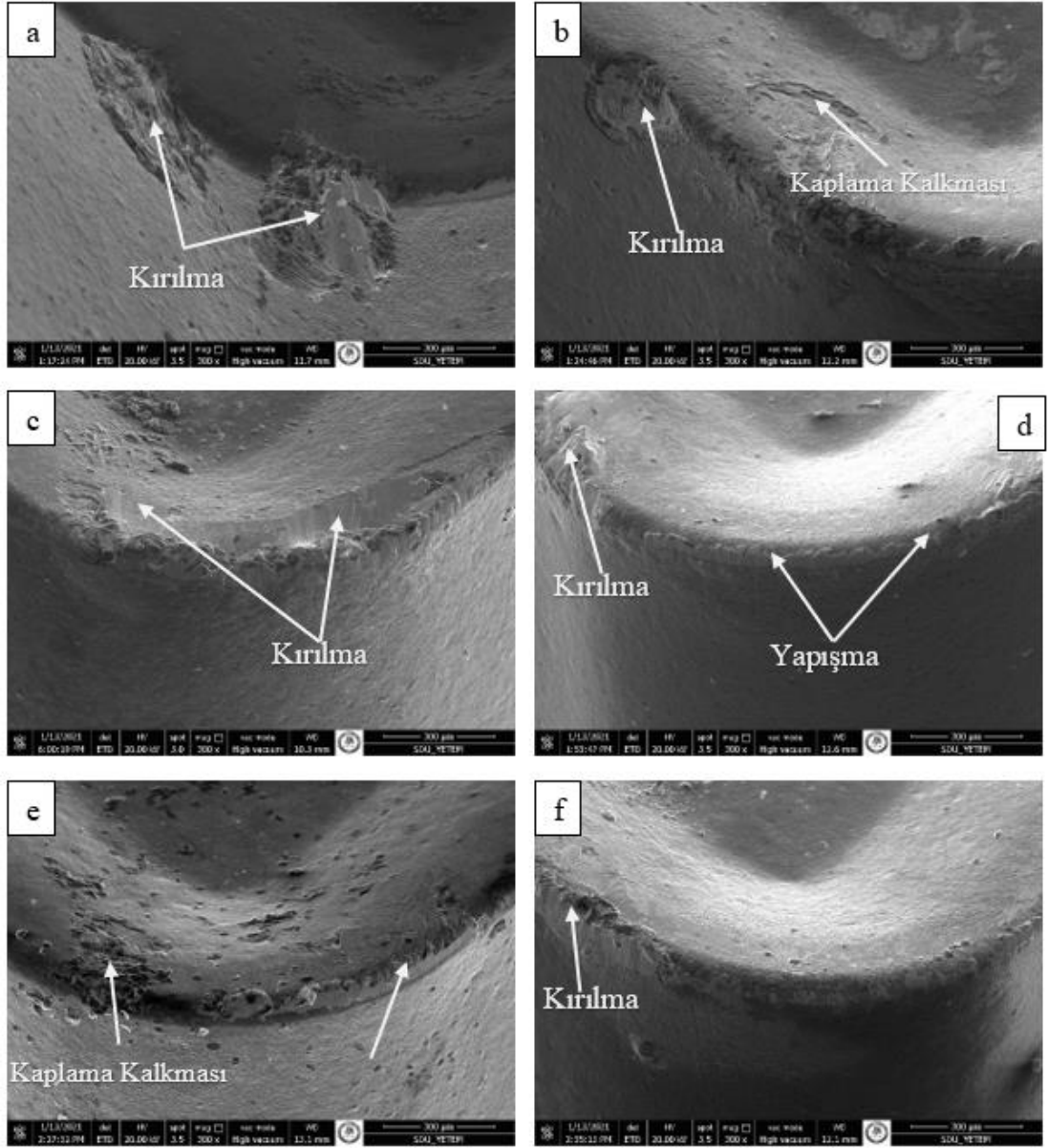
Şekil 5.25. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Fc değişimi.

Şekil 5.25’de 0,5 mm talaş derinliğinde, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Fc değeri 100 N olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre 0,5 mm talaş derinliğinde farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Fc değeri sırasıyla %4,16 (96 N), %10 (90 N), %17 (83 N), %30 (70 N) ve %6 (94 N) oranlarında azalmıştır. İşlemsiz (ham) takımda talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak talaş derinliğinin 1,5 mm artırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değeri sırasıyla %220 (320 N) ve %300 (400 N) oranlarında artmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan DER24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımda ise talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 1,5 mm artırılmasıyla yapılan deneylerde Fc değeri sırasıyla %221,42 (225 N) ve %385,71 (340 N) oranlarında artış sergilemiştir. 1,5 mm talaş derinliğinde işlemsiz (ham) ve optimum kesici takım seviyesi olan, DER24 takım

karşılaştırıldığında, işlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 kesici takım ile yapılan deneylerde Fc değeri yaklaşık %17,64 oranında daha düşük belirlenmiştir. Şekil 5.25 incelendiğinde, bütün takımlarda, talaş derinliğinin artması ile yapılan deneylerde Fc değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu duruma, talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak talaş kesitinin artması ile kesici takım üzerine gelen yüklerin artmasının neden olduğu düşünülmektedir.

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar ile yapılan deneylerde Fc değerleri arasındaki etkileşim Taguchi analiziyle belirlenen optimum seviyeler üzerinden incelenmiştir. İşlemsiz (ham) takım ile optimum kesici takım seviyesi olan D24 takımın karşılaştırılması optimum kesme hızı seviyesi 180 m/dak, ilerleme miktarı seviyesi 0,12 mm/dev ve değişimin daha iyi anlaşılabilmesi için 1 mm talaş derinliğinde yapılan deneylerde ölçülen Fc değerleri üzerinden yapılmıştır. Bu kesme şartlarında işlemsiz (ham) kesici takım ile yapılan deneylerde Fc değeri 320 N iken aynı şartlarda D24 kesici takım ile yapılan deneylerde Fc değeri 230 N ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan) kesici takımda Fc değeri yaklaşık olarak %39,13 azalmıştır. Elde edilen bu sonuç literatürdeki benzer çalışmalarla ile karşılaştırılmıştır. Reddy ve arkadaşları derin kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımlar ile C45 malzemenin işlenmesinde işlemsiz (ham) takıma göre kesme kuvvetlerinde bir düşüş olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu işlemsiz takımlara göre kriyojenik işlemi uygulanmış kesici takımlarda yanak aşınmasını daha az olması ile açıklamışlardır [84].

Şekil 5.26'da 0,12 mm/dev ilerleme miktarı, 180 m/dak kesme hızı ve 1 mm talaş derinliğinde yapılan deneylerde AlTiN kaplamalı kesici takımlara (a) işlemsiz, b) SIG12 c) SIG24 d) DER12 e) DER24 f) DER36) ait aşınmaların SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.26. TiCN-Al₂O₃ kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri.

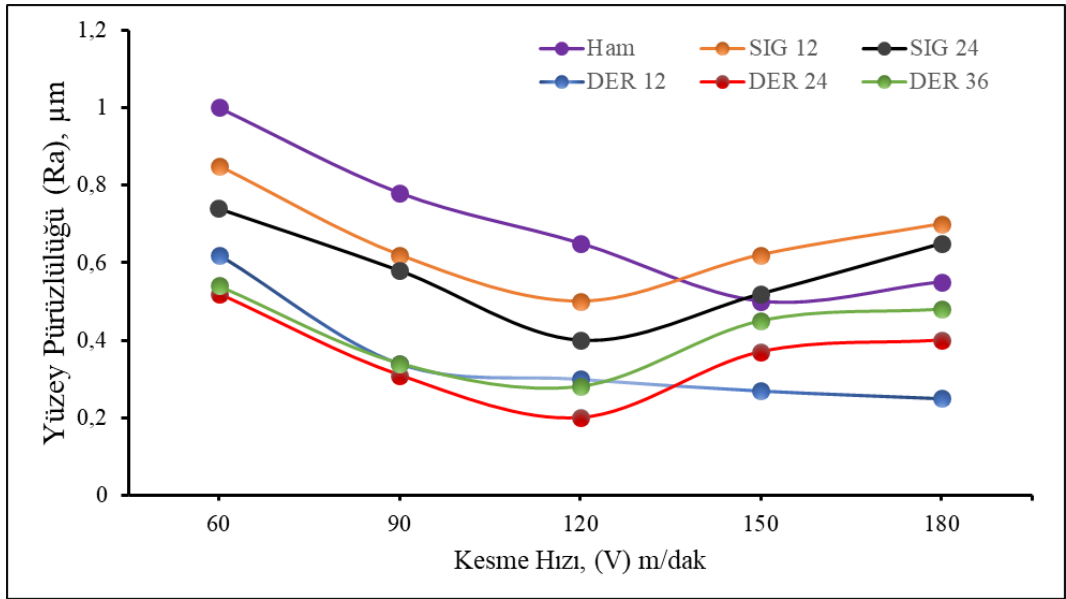
5.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Önemli işlenebilirlik kriterlerinden birisi olan yüzey pürüzlülüğü, işlenen parçanın yüzey durumu hakkında bilgi vermektedir. Bu bağlamda, Inconel 625 süper alaşımının tornalanması sonucu elde edilen her bir kesme alanı üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde; işlemsiz ve farklı bekleme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımların ve kesme parametrelerinin yüzey

pürüzlülüğü değerleri (Ra) üzerindeki etkileri grafikler üzerinden detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

5.6.1. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan Kaplamasız Tungsten Karbür Takımlara Bağlı Ra Değerlerinin Değerlendirilmesi

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar ile Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, beş farklı kesme hızlarında (60, 90, 120, 150 ve 180 m/dak), sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımların ve kesme hızının Ra değerlerine etkisi Şekil 5.27’de verilmiştir.

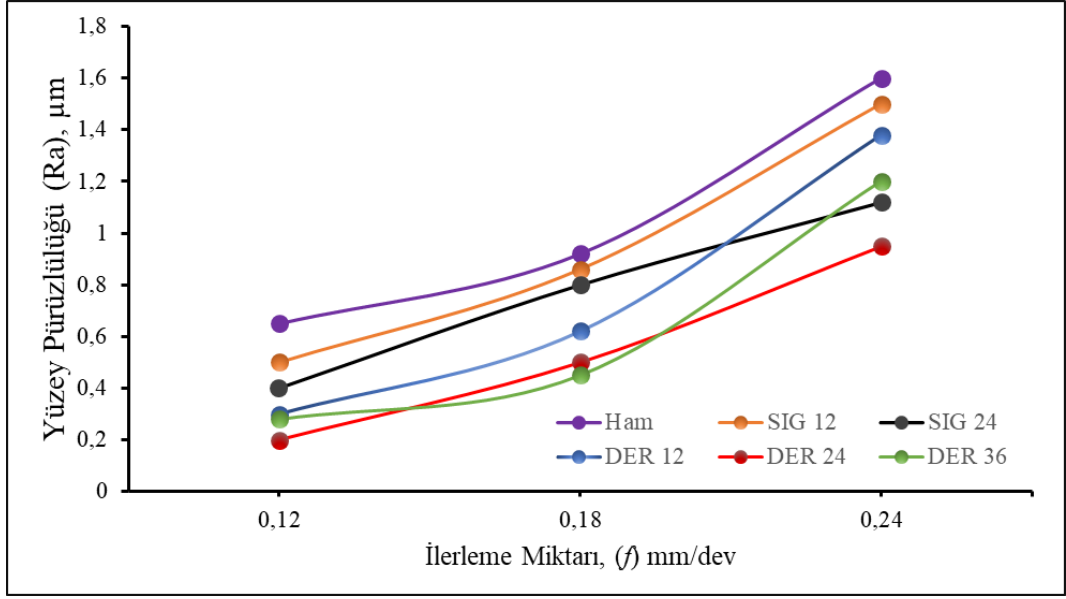


Şekil 5.27. Kaplamasız takımlarda kesme hızına bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.27 incelendiğinde 60 m/dak kesme hızında, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 1,15 μm ölçülmüştür. 60 m/dak kesme hızında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar için S12, S24, D12, D24 ve D36 ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) sırasıyla 0,85 μm , 0,74 μm , 0,62 μm , 0,52 μm ve 0,54 μm ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takım için kesme hızının 60 m/dak’dan 120 m/dak’ya arttırılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) yaklaşık olarak %35 (0,65 μm)

azalmış, kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %45 (0,55 μm) azalmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan D24'de (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) ise kesme hızının 60 m/dak'dan 120 m/dak'ya arttırılması ile yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %61,53 (0,2 μm) azalmış, kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %23,07 (0,4 μm) azalmıştır. Tornalama deneylerinde kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin azalması talaşlı imalat işlemlerinde sıklıkla karşılaşılan bir durum olduğu bilinmektedir. Kesme hızının artmasıyla kesici takım ucunda oluşan yığıntı talaş oluşma eğiliminin azalması Ra değerlerindeki azalmanın nedeni olarak düşünülmektedir. Ancak, kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m'dak arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum, yüksek kesme hızlarında takımın aşınma sürecine daha erken girmesi ve yüksek kesme hızlarından kaynaklı yüksek iş mili devir sayılarındaki titreşimin fazla olması ile açıklanabilir [85,86]. Ayrıca, Şekil 5.18'de yer alan aşınma görüntüleri de bu durumu desteklemektedir.

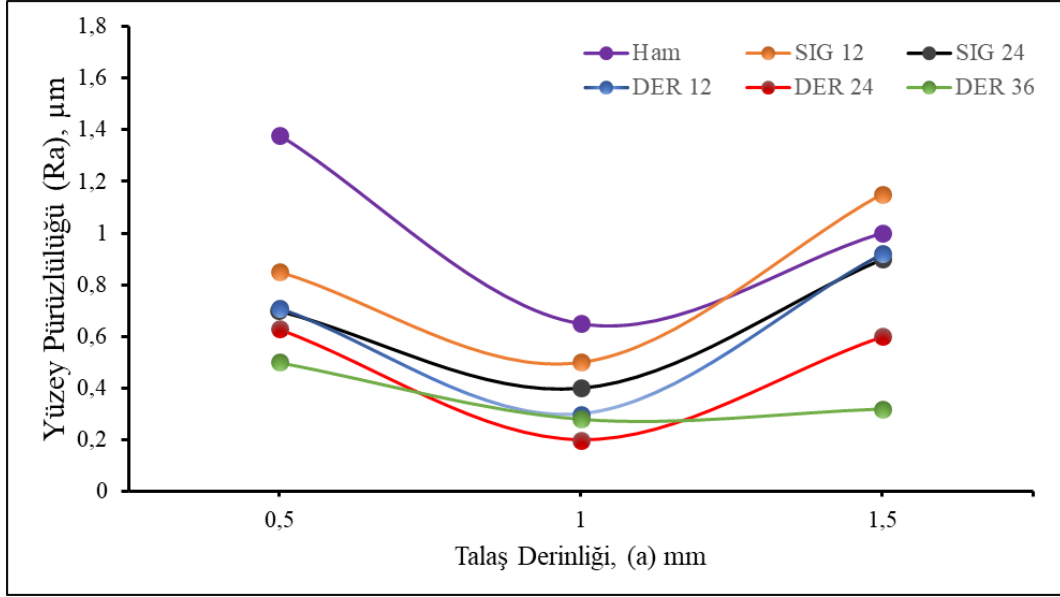
İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı ilerleme miktarlarında (0,12, 0,18 ve 0,24 mm/dev), sabit kesme hızında (120 m/dak) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.28'de ilerleme miktarının ve kesme şartlarının Ra değerlerine etkisi sunulmuştur.



Şekil 5.28. Kaplamasız takımlarda ilerleme miktarına bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.28’de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Ra değeri 0,65 μm ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre 0,12 mm/dev ilerleme miktarında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %18,46 (0,53 μm), %35,38 (0,42 μm), %46,15 (0,35 μm), %63,07 (0,24 μm) ve %56,92 (0,28 μm) azalmıştır. İşlemsiz (ham) takımında ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 0,24 mm/dev arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %41,53 (0,92 μm) ve %146,15 (1,6 μm) oranlarında bir artış olmuştur. Kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 0,24 mm/dev arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %108,33 (0,50 μm) ve %295,83 (0,95 μm) oranlarında bir artış görülmüştür. Bütün kesici takımlarda yapılan deneylerde ilerleme miktarının artması ile Ra değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum, ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak, talaş kesitinin artmasıyla takım temas yüzeyinin büyümesi ve takımında meydana gelen gerilmelerin daha geniş bir yüzeyde etkili olması ile açıklanmaktadır [87]. Kesme parametrelerinin Ra değerleri üzerindeki etkisi karşılaştırıldığında ilerleme miktarının baskın bir etkiye sahip olduğu görülmekte ve Anova sonuçları ile örtüşmektedir [88-90].

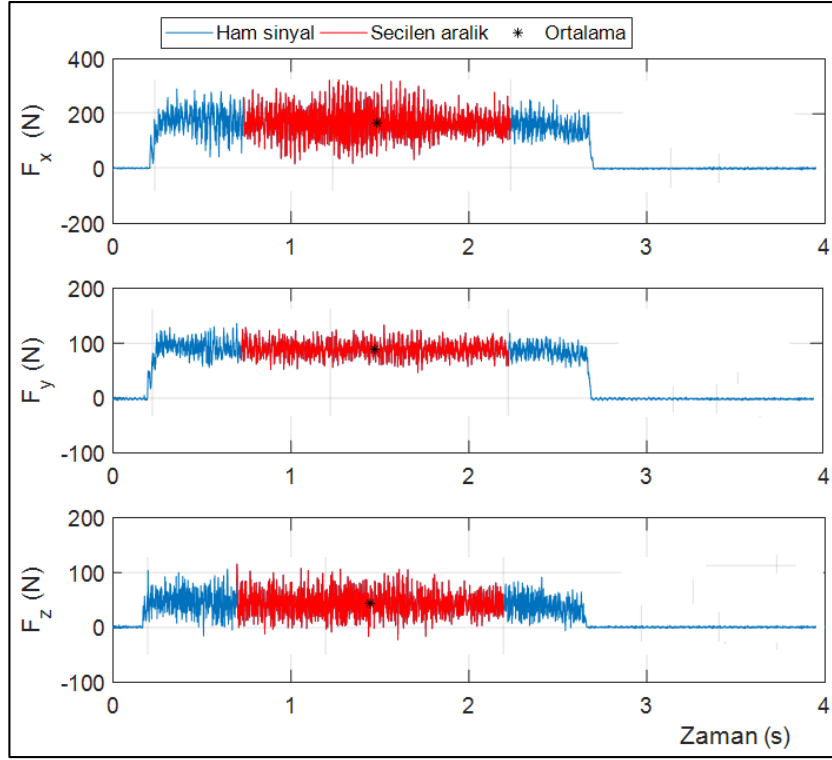
İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı talaş derinliğinde (0,5, 1 ve 1,5 mm), sabit kesme hızında (120 m/dak) ve sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.29'da tornalama deneylerinde ölçülen Ra değerleri üzerinde talaş derinliğinin ve kesme şartlarının etkisi görülmektedir.



Şekil 5.29. Kaplamasız takımlarda talaş derinliğine bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.29'da 0,5 mm talaş derinliğinde, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Ra değeri 1,38 µm olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre 0,5 mm talaş derinliğinde farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %38,4 (0,85 µm), %49,27 (0,7 µm), %45,65 (0,75 µm), %54,34 (0,63 µm) ve %63,76 (0,5 µm) oranlarında azalmıştır. İşlemsiz (ham) takımında talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak talaş derinliğinin 1,5 mm artırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerleri sırasıyla %52,89 (0,65 µm) ve %27,53 (1,00 µm) oranlarında azalmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan DER24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 1,5 mm artırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerlerinde sırasıyla %68,25 (0,2 µm) ve %4,76 (0,6 µm) oranlarında bir artış belirlenmiştir. 1,5 mm talaş derinliğinde işlemsiz (ham) ve optimum kesici takım seviyesi olan, DER24 takım karşılaştırıldığında, işlemsiz (ham) kesici takıma

göre D24 kesici takım ile yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık %40 oranında daha düşük belirlenmiştir. Şekil 5.30'de 0,5 mm talaş derinliğinde, 0,12 mm/dev ilerleme miktarında ve 180 m/dak kesme hızında yapılan deneylerde elde edilen kesme kuvvetlerinin değişim şekli yer almaktadır.



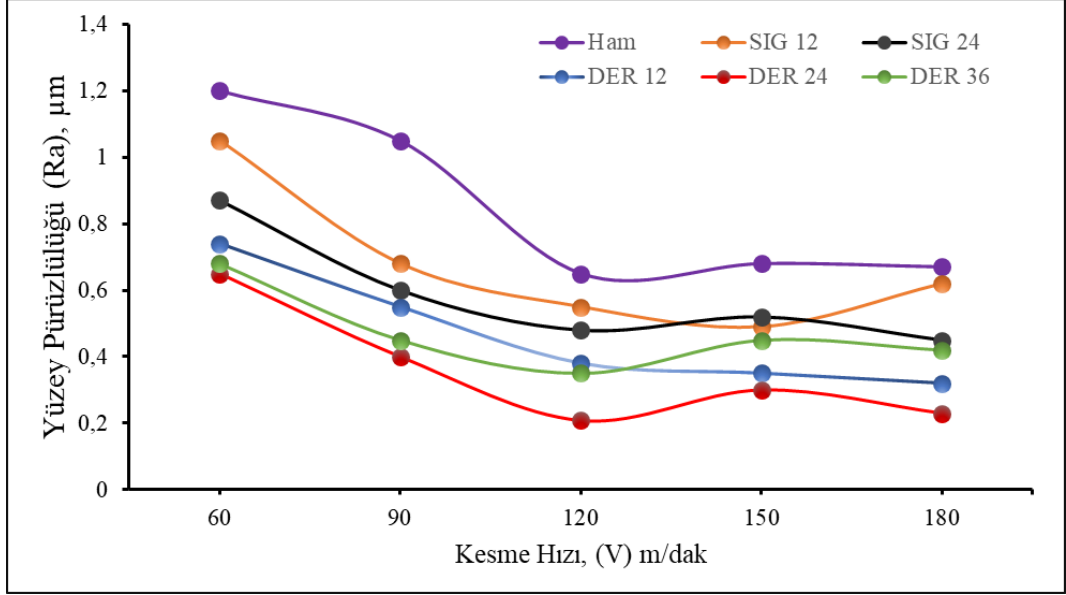
Şekil 5.30. Kuvvet grafiği.

Düşük talaş derinliklerinde yapılan deneylerde Ra değerlerinin düşük çıkması beklenmekteyken aksine yüksek çıkmıştır. Bu duruma düşük talaş kesitinde, yüksek kesme hızlarından kaynaklı yüksek iş mili devir sayılarındaki titreşimin neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.30'da kuvvet genliğindeki yüksek sapmalar işleme esnasında meydana gelen titreşimi göstermektedir.

5.6.2. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan AlTiN Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlara Bağlı Ra Değerlerinin Değerlendirilmesi

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan AlTiN kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar ile Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, beş farklı kesme hızlarında (60, 90, 120, 150 ve 180 m/dak), sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) ve sabit talaş

derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımların ve kesme hızının Ra değerlerine etkisi Şekil 5.31’de verilmiştir.

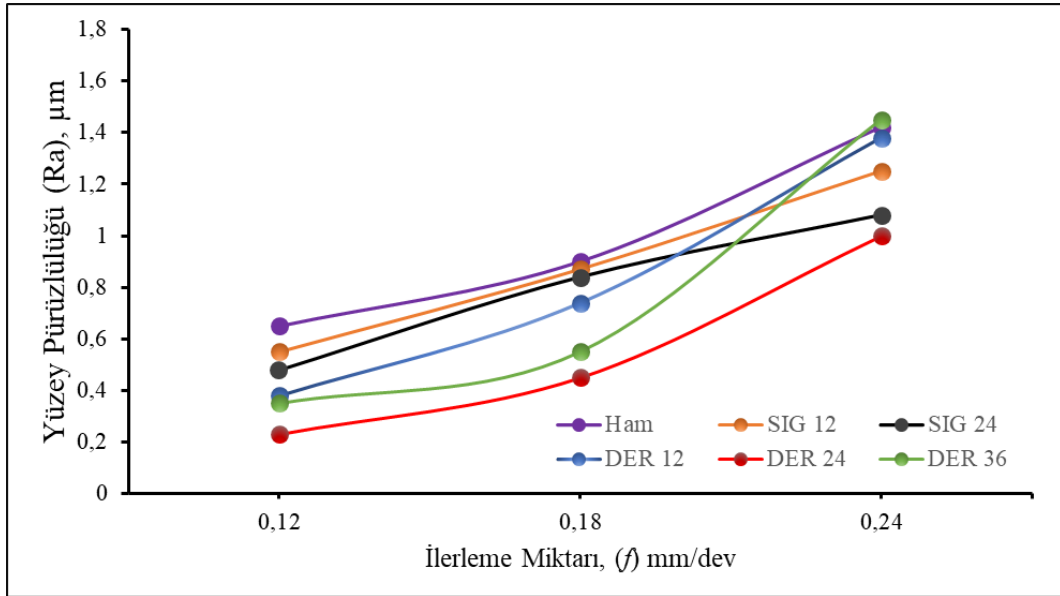


Şekil 5.31. AlTiN kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.31 incelendiğinde 60 m/dak kesme hızında, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 1,25 μm ölçülmüştür. 60 m/dak kesme hızında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar için S12, S24, D12, D24 ve D36 ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) sırasıyla 1,05 μm , 0,87 μm , 0,74 μm , 0,65 μm ve 0,68 μm ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takım için kesme hızının 60 m/dak’dan 120 m/dak’ya arttırılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) yaklaşık olarak %48 (0,65 μm) azalmış, kesme hızının 120 m/dak’dan 180 m/dak’ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %46,4 (0,67 μm) azalmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan D24’de (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) ise kesme hızının 60 m/dak’dan 120 m/dak’ya arttırılması ile yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %68 (0,208 μm) azalmış, kesme hızının 120 m/dak’dan 180 m/dak’ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %64,61 (0,23 μm) azalmıştır. Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azalması talaşlı imalat işlemlerinde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Ancak, kesme hızının 120 m/dak’dan 180 m/dak arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerlerinin arttığı

görülmektedir. Bu durum, yüksek kesme hızlarında, takımın aşınma sürecine daha erken girmesi ve kesici takım ucunda meydana gelen küçük kırılmalar (chipping) ile açıklanabilir.

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı ilerleme miktarlarında (0,12, 0,18 ve 0,24 mm/dev), sabit kesme hızında (120 m/dak) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.32’de ilerleme miktarının ve kesme şartlarının Ra değerlerine etkisi sunulmuştur.

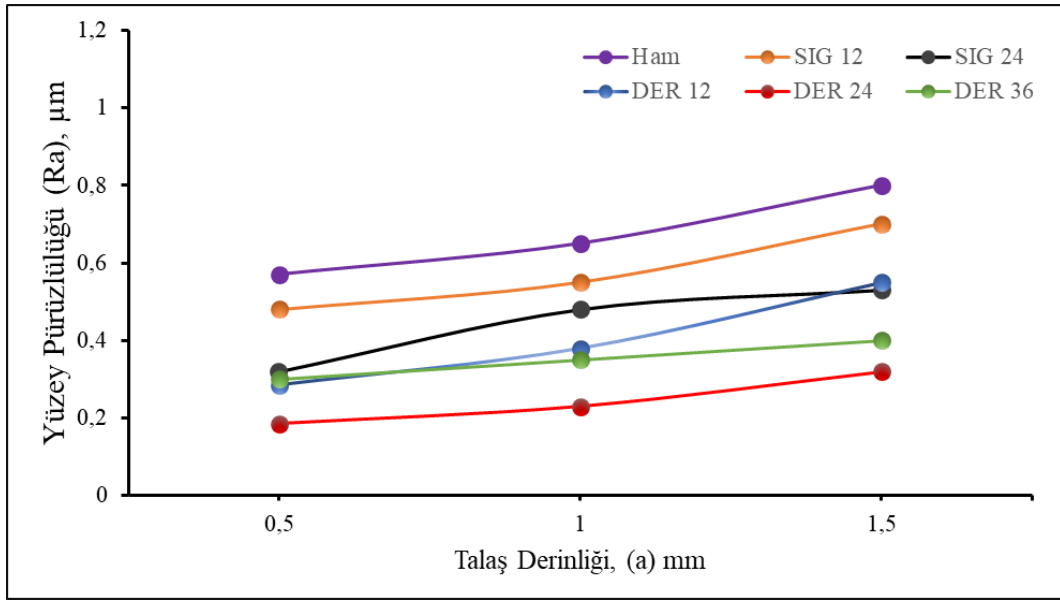


Şekil 5.32. AlTiN kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.32’de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Ra değeri 0,61 μm ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre bu ilerleme miktarında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %9,83(0,55 μm), %21,31 (0,48 μm), %37,7 (0,38 μm), %62,29 (0,23 μm) ve %42,62 (0,35 μm) azalmıştır. İşlemsiz (ham) takımında ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 0,24 mm/dev artırılmasıyla yapılan deneylerde Ra sırasıyla %47,54 (0,90 μm) ve %132,78 (1,42 μm) oranlarında bir artış olmuştur. Kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100

oranlarında arttırılarak 0,24 mm/dev arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerlerinde sırasıyla %65,65 (0,45 μm) ve %334,78 (1,00 μm) oranlarında bir artış görülmüştür. Bütün kesici takımlarda ilerleme miktarının artması ile yapılan deneylerde Ra değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artmasına, ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak kesme kuvvetlerinin artması neden olmaktadır [91].

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı talaş derinliğinde (0,5, 1 ve 1,5 mm), sabit kesme hızında (120 m/dak) ve sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.33'de tornalama deneylerinde ölçülen Ra değerleri üzerinde talaş derinliğinin ve kesme şartlarının etkisi görülmektedir.



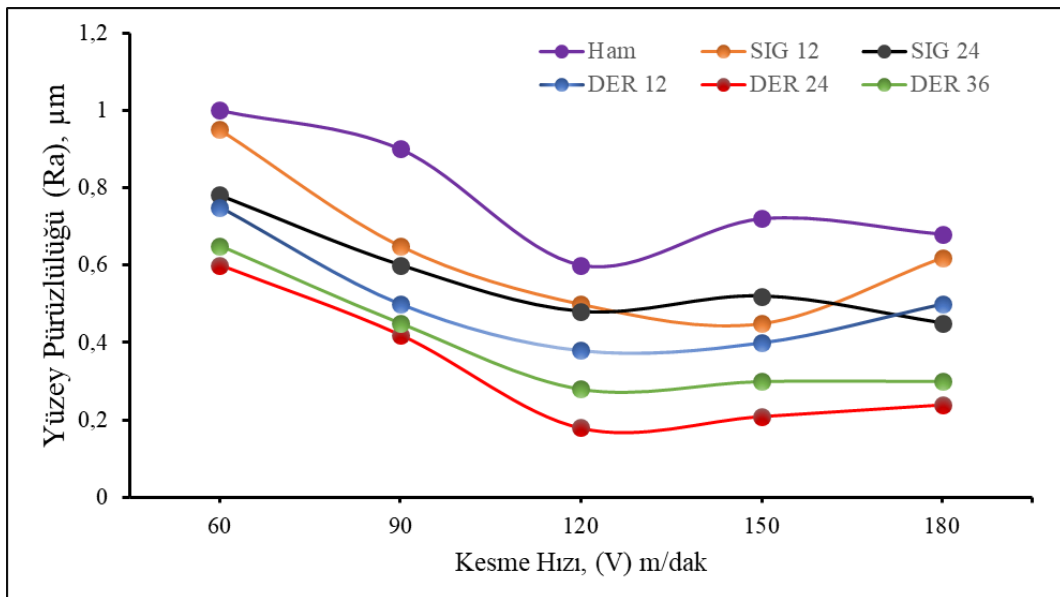
Şekil 5.33. AlTiN kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.33'de 0,5 mm talaş derinliğinde, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Ra değeri 0,57 μm olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre 0,5 mm talaş derinliğinde farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %15,78 (0,48 μm), %43,85 (0,32 μm), %50,87 (0,28 μm), %67,54 (0,185 μm) ve %47,36 (0,3 μm) oranlarında azalmıştır. İşlemsiz (ham) takımında talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak talaş derinliğinin 1,5

mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerleri sırasıyla %14,03 (0,65 μm) ve %40,35 (0,8 μm) oranlarında artmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan DER24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 1,5 mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerlerinde sırasıyla %24,32 (0,23 μm) ve %72,97 (0,32 μm) oranlarında bir artış belirlenmiştir. 1,5 mm talaş derinliğinde işlemsiz (ham) ve optimum kesici takım seviyesi olan, DER24 takım karşılaştırıldığında, işlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 kesici takımında ile yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık %60 oranında daha düşük belirlenmiştir.

5.6.3. İşlemsiz ve Kriyojenik İşlem Uygulanan TiCN-Al₂O₃ Kaplamalı Tungsten Karbür Takımlara Bağlı Ra Değerlerinin Değerlendirilmesi

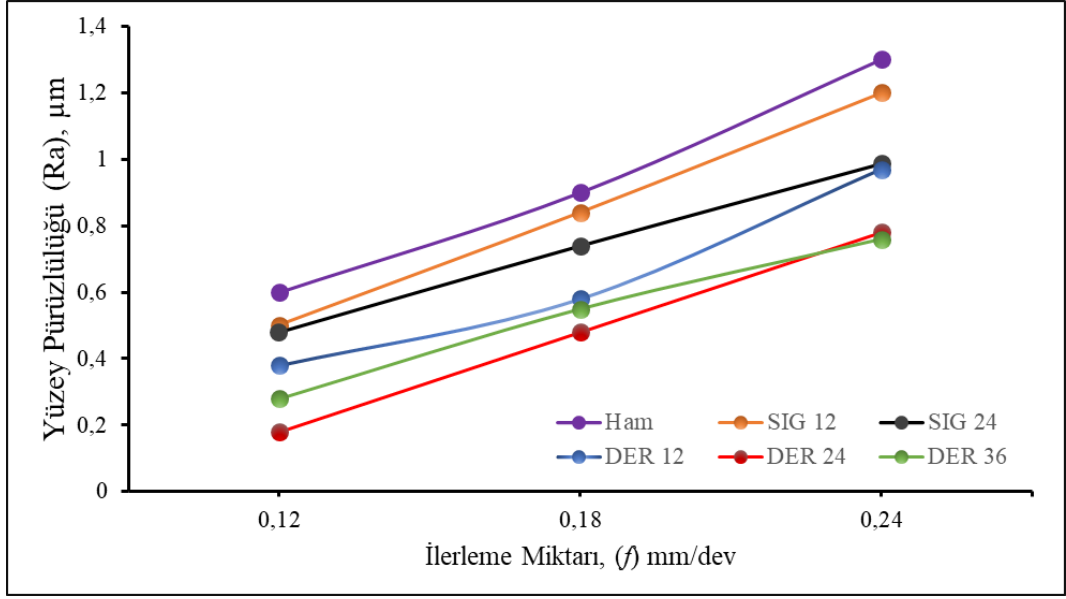
İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar ile Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, beş farklı kesme hızlarında (60, 90, 120, 150 ve 180 m/dak), sabit ilerleme miktarında (0,12 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımların ve kesme hızının Ra değerlerine etkisi Şekil 5.34'de verilmiştir.



Şekil 5.34. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.34 incelendiğinde 60 m/dak kesme hızında, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 1,05 μm ölçülmüştür. 60 m/dak kesme hızında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar S12, S24, D12, D24 ve D36 ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) sırasıyla 0,95 μm , 0,78 μm , 0,75 μm , 0,60 μm ve 0,65 μm ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takım için kesme hızının 60 m/dak'dan 120 m/dak'ya arttırılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) yaklaşık olarak %42,85 (0,60 μm) azalmış, kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %35,23 (0,68 μm) azalmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan D24'de (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) ise kesme hızının 60 m/dak'dan 120 m/dak'ya arttırılması ile yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %70 (0,18 μm) azalmış, kesme hızının 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık olarak %60 (0,24 μm) azalmıştır. Literatürde, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azalması talaşlı imalat işlemlerinde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Birçok çalışmada bu durum, yığıntı talaş (BUE) oluşumu eğilimindeki azalma ile ilişkilendirilmiştir [92,93].

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı ilerleme miktarlarında (0,12, 0,18 ve 0,24 mm/dev), sabit kesme hızında (120 m/dak) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.35'de ilerleme miktarının ve kesme şartlarının Ra değerlerine etkisi sunulmuştur.

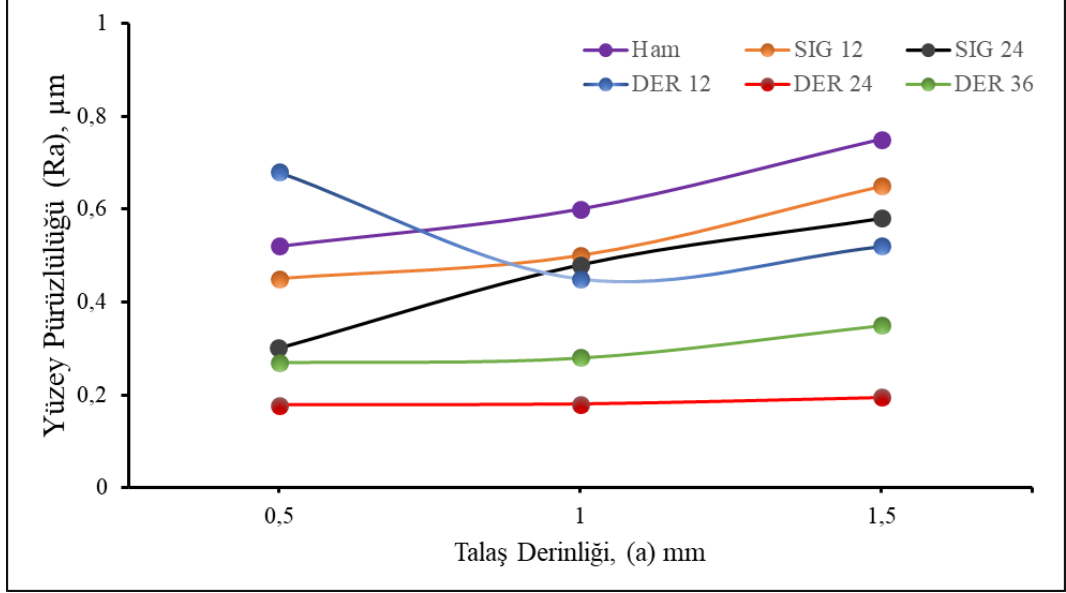


Şekil 5.35. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda ilerleme miktarına bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.35’de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Ra değeri 0,60 μm ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre bu ilerleme miktarında farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %16,66 (0,5 μm), %20 (0,48 μm), %36,6 (0,38 μm), %70 (0,18 μm) ve %53,33 (0,28 μm) azalmıştır. İşlemsiz (ham) takımında ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 0,24 mm/dev arttırılmasıyla yapılan deneylerde sırasıyla %50 (0,90 μm) ve %116,6 (1,3 μm) oranlarında bir artış olmuştur. Kesici takım için optimum seviye olan D24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 0,24 mm/dev arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %166,66 (0,48 μm) ve %333,33 (0,78 μm) oranlarında bir artış görülmüştür. Bütün kesici takımlarda yapılan deneylerde ilerleme miktarının artması ile Ra değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum, İlerleme miktarındaki artışa bağlı olarak, talaş kesitinin artmasıyla takım temas yüzeyinin büyümesi ve takımında meydana gelen gerilmelerin daha geniş bir yüzeyde etkili olması ile açıklanmaktadır [78].

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanan kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 alaşımının tornalama deneyleri, üç farklı talaş derinliğinde (0,5, 1 ve 1,5 mm), sabit kesme hızında (120 m/dak) ve sabit ilerleme miktarında (0,12

mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.36'da tornalama deneylerinde ölçülen Ra değerleri üzerinde talaş derinliğinin ve kesme şartlarının etkisi görülmektedir.



Şekil 5.36. TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlarda talaş derinliğine bağlı Ra değişimi.

Şekil 5.36'de 0,5 mm talaş derinliğinde, işlemsiz takım (ham) kullanılarak yapılan deneylerde Ra değeri 0,52 µm olarak ölçülmüştür. İşlemsiz (ham) takıma göre bu talaş derinliğinde farklı soğuma sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar SIG12, SIG24, DER12, DER24 ve DER36 ile yapılan deneylerde Ra değeri sırasıyla %13,46 (0,45 µm), %42,3 (0,3 µm), %30,76 (0,48 µm), %65,76 (0,178 µm) ve %48,07 (0,27 µm) oranlarında azalmıştır. İşlemsiz (ham) takımında talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak talaş derinliğinin 1,5 mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerleri sırasıyla %15,38 (0,6 µm) ve %44,23 (0,75 µm) oranlarında artmıştır. Kesici takım için optimum seviye olan DER24 (24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım) takımında ise talaş derinliğinin düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında arttırılarak 1,5 mm arttırılmasıyla yapılan deneylerde Ra değerlerinde sırasıyla %1,12 (0,18 µm) ve %9,55 (0,195 µm) oranlarında bir artış belirlenmiştir. 1,5 mm talaş derinliğinde işlemsiz (ham) ve optimum kesici takım seviyesi olan, DER24 takım karşılaştırıldığında, işlemsiz (ham) kesici takıma göre D24 kesici takım ile yapılan deneylerde Ra değeri yaklaşık %74 oranında daha düşük belirlenmiştir. Şekil 5.37'de 180 m/dak kesme hızında, 0,12

mm/dev ilerleme miktarında ve farklı talaş derinliklerinde tornalama deneyi sonrası oluşan talaşlar görülmektedir.



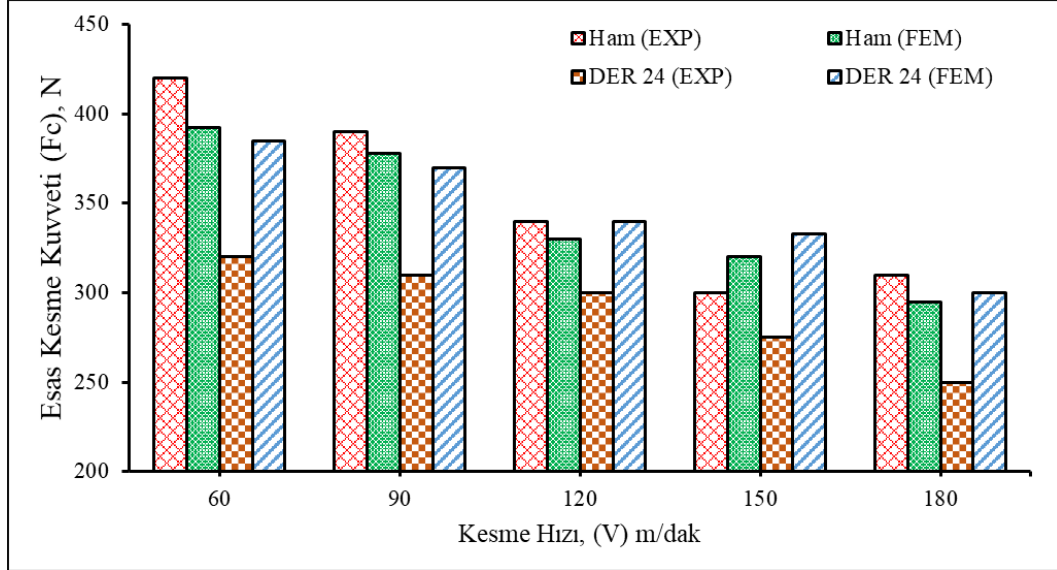
Şekil 5.37. Talaş görüntüleri a)0,5 b)1 c)1,5 mm.

Talaş derinliğinin artması ile yapılan deneylerde Ra değerlerinde bir artış görülmektedir. Bu durumun işleme esnasında çıkan talaşın sürekli talaş olması ve kırılmamasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 5.37). Talaş derinliğinin artması ile oluşan bu sürekli talaş, iş parçasına sarma yaparak ve kopmayarak iş parçası ve kesici takım arasına sıkışması ile iş parçasının yüzeyinde bozulmalara neden olmuştur.

5.7. NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Inconel 625 alaşımının kaplamasız tungsten karbür ve 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış tungsten karbür kesici takımlar ile tornalanmasında oluşan esas kesme kuvveti (F_c) değerleri ile sonlu elemanlar analizinde elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Şekil 5.38'de F_c değerlerinin 0,12 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm talaş derinliğinde ve farklı kesme hızlarındaki değişim grafiği yer almaktadır.

Nümerik analizlerde kriyojenik işlem şartı kesici takımın sertliği üzerinden tanımlanmıştır.

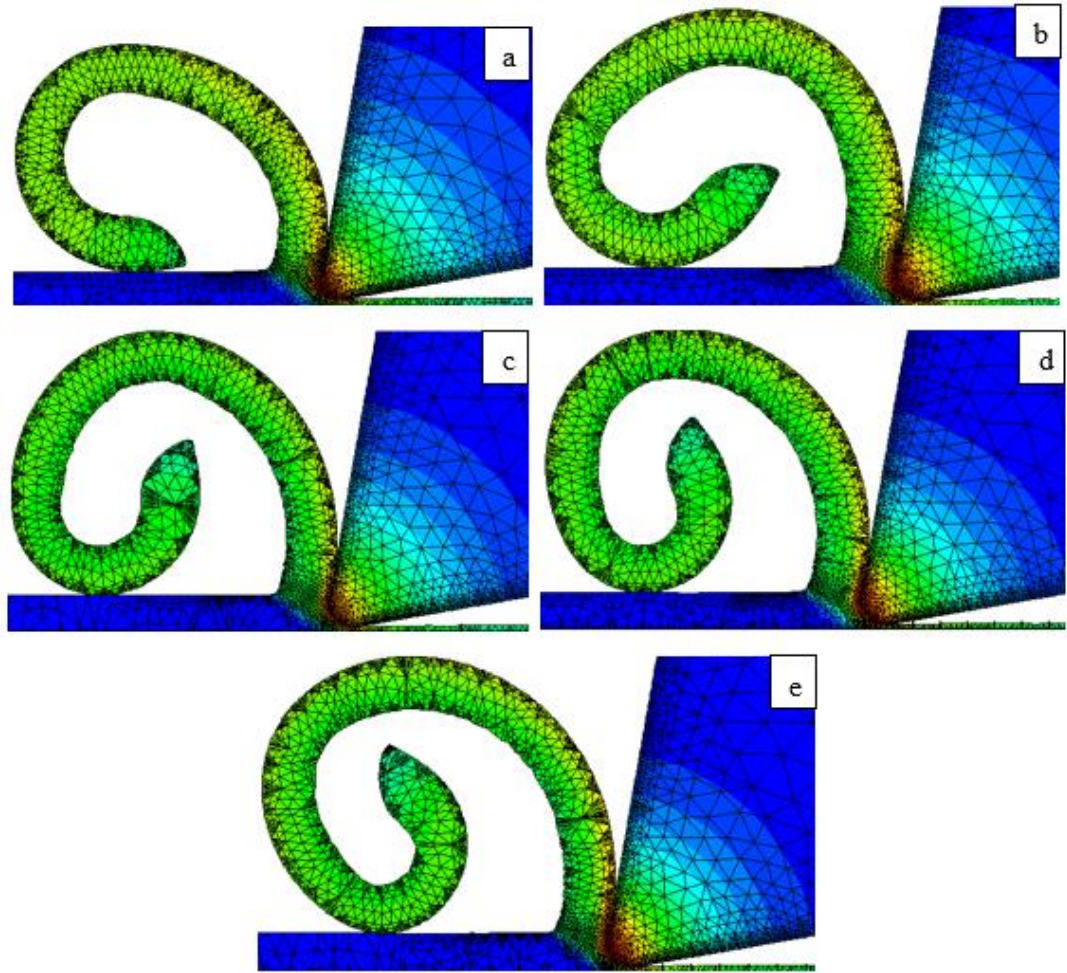


Şekil 5.38. Kesme hızına göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

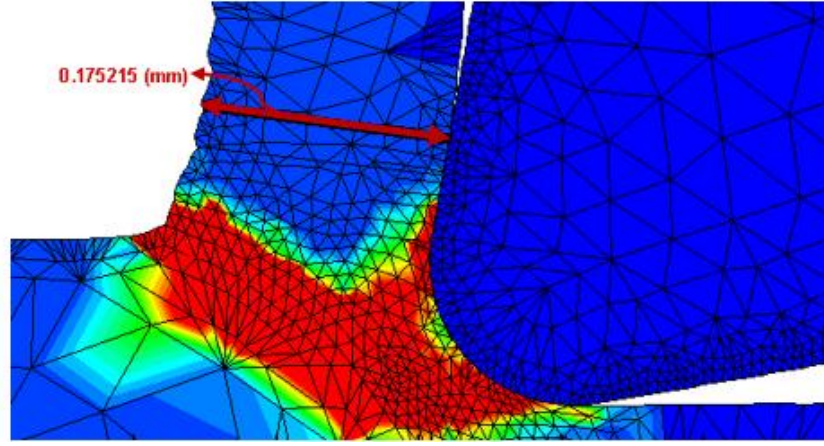
Şekil 5.38 incelendiğinde işlemsiz tungsten karbür takımlar kullanılarak yapılan tornalama deneylerinde ölçülen Fc değerleri ile nümerik analizlerden elde edilen Fc değerlerinin benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Ancak, bu durum 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takımlar için söylenemez. Nümerik analizlerde; işlemsiz tungsten karbür takımlar göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takımlarda belirgin bir değişimin olmadığı görülmektedir. İşlemsiz tungsten karbür takımlar için nümerik analiz sonuçlarında elde edilen Fc değerlerinin deneysel olarak ölçülen Fc değerlerinden yaklaşık olarak %8 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Hem deneysel hem de nümerik analizlerle belirlenen Fc değerlerinin kesme hızındaki artışa bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Örneğin, kesme hızının düzenli olarak %100 ve %150 oranlarında arttırılarak kesme hızının 180 m/dak arttırılmasıyla deneysel olarak ölçülen Fc değerlerinin sırasıyla, %23,52 (340 N) ve %35,48 (310 N) oranlarında azalmıştır. Aynı durum nümerik analizlerle belirlenen Fc değerleri için değerlendirildiğinde sırasıyla %18,78 (330 N) ve %32,88 (295 N) oranlarında azalmıştır. Bu duruma literatürler benzer bir şekilde kesme hızının artmasıyla kesme bölgesinde artan sıcaklığa bağlı olarak kayma dayanımının azalması sonucuyla talaş

kalınlığının azalmasını neden olduğu düşünölmektedir [94,95]. Bu bağlamda, nümerik analizlerde talaş kalınlığı ölçölmüştür.

Şekil 5.39'da 0,12 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm talaş derinliğinde ve farklı kesme hızlarındaki nümerik analizler sonucunda elde edilen talaş oluşumu görüntüleri yer almaktadır. 60 m/dak, 90 m/dak, 120 m/dak, 150 m/dak ve 180 m/dak kesme hızlarında yapılan nümerik analizlerde talaş kalınlığı sırasıyla, yaklaşık olarak 0,204 mm, 0,198 mm, 0,187 mm, 0,181 mm ve 0,175 mm ölçölmüştür. Şekil 5.40'de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm talaş derinliğinde ve 180 m/dak kesme hızında nümerik analiz sonucunda talaş kalınlığı ölçümü görölmektedir.

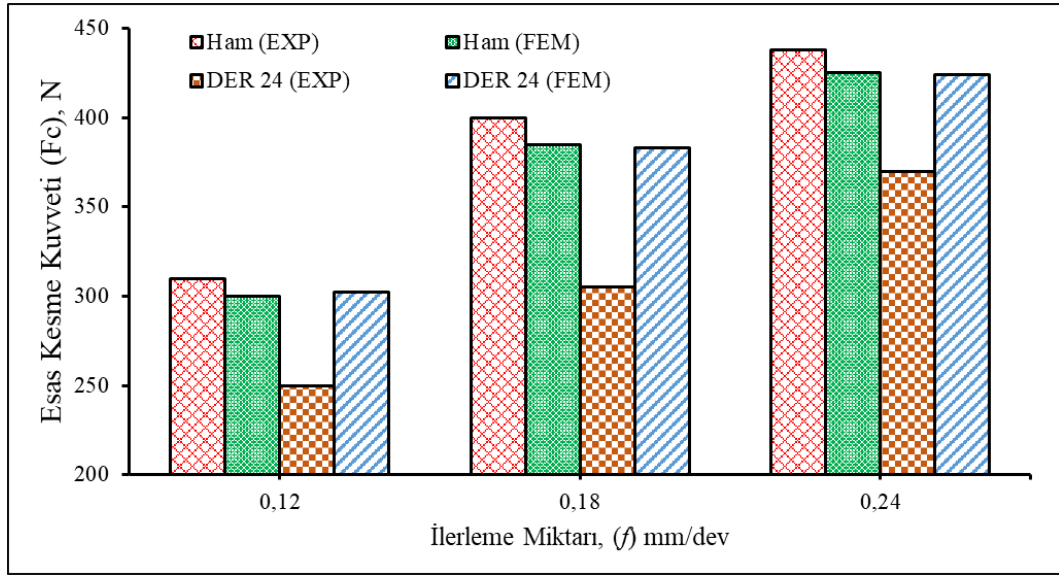


Şekil 5.39. Kesme hızına bağlı talaş oluşumu a) 60, b) 90, c) 120, d)150, e) 180 m/dak.



Şekil 5.40. Talaş kalınlığı ölçümü.

Şekil 5.41’de işlemsiz tungsten karbür takımlar kullanılarak farklı ilerleme miktarlarında yapılan tornalama deneylerinde ölçülen F_c değerleri ile nümerik analizlerden elde edilen F_c değerlerinin değişim grafiği yer almaktadır.

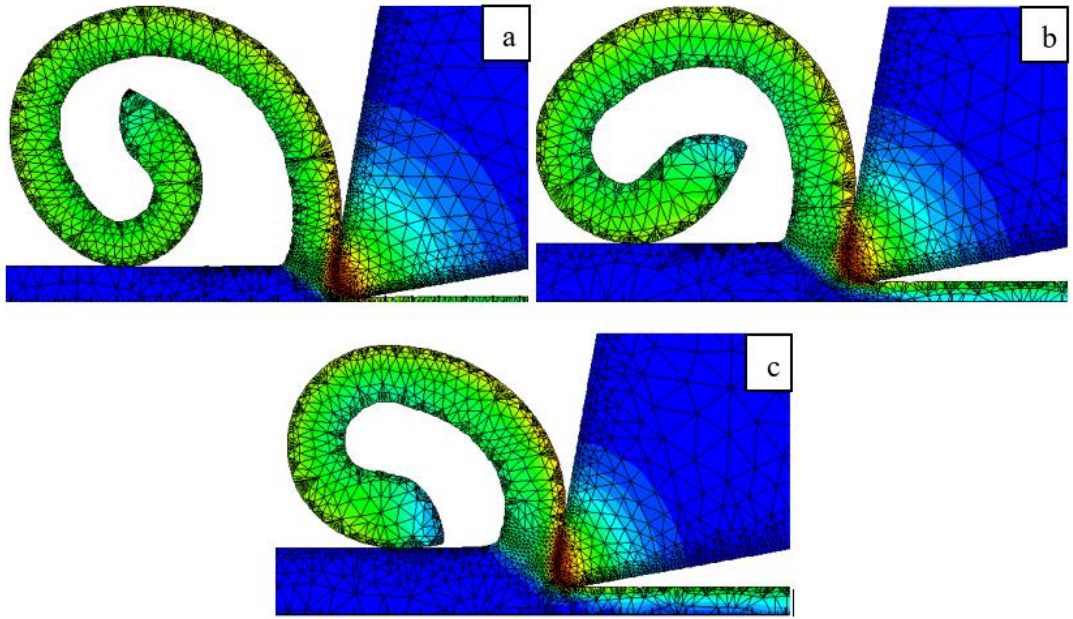


Şekil 5.41. İlerleme miktarına göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

İlerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 0,24 mm/dev artırılmasıyla F_c değerinin %29 (400 N) ve %41,29 (438 N) oranlarında artmıştır. Aynı kesme şartlarında nümerik analizlerle belirlenen F_c değerinde ise sırasıyla %28,33 (385 N) ve %41,66 (425 N) oranlarında bir artış görülmüştür. Hem deneysel

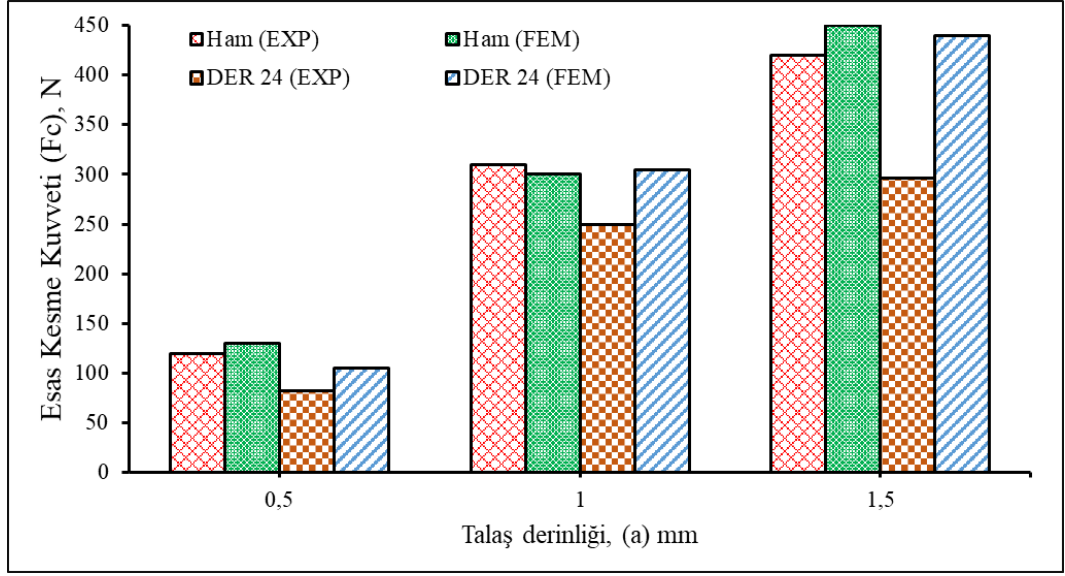
hem de nümerik analizlerle belirlenen F_c değerlerinin ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak arttığı görülmektedir. Şekil 5.42’de 180 m/dak kesme hızında, 1 mm talaş derinliğinde ve farklı ilerleme miktarlarında yapılan nümerik analizlerde elde edilen talaş oluşumu görüntüleri yer almaktadır. Nümerik analiz sonucunda, 0,12 mm/dev, 0,18 mm/dev ve 0,24 mm/dev ilerleme miktarları için talaş kalınlığı sırasıyla, yaklaşık olarak 0,175 mm, 0,275 mm ve 0,362 mm ölçülmüştür.

Hem deneysel hem de nümerik analizlerde ilerleme miktarının artması ile F_c değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Literatürde bu durum çoğunlukla ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak talaş kesitinin artması ile talaşın deforme edilmesi için gerekli olan enerjinin artması ile açıklanmaktadır. Nümerik analizler sonucu elde edilen talaş kalınlığı değerleri ve Şekil 5.42’de yer alan talaş oluşumu görüntüleri bu durumu doğrulamaktadır.



Şekil 5.42. İlerleme miktarına bağlı talaş oluşumu a) 0,12, b) 0,18, c) 0,24 mm/dev.

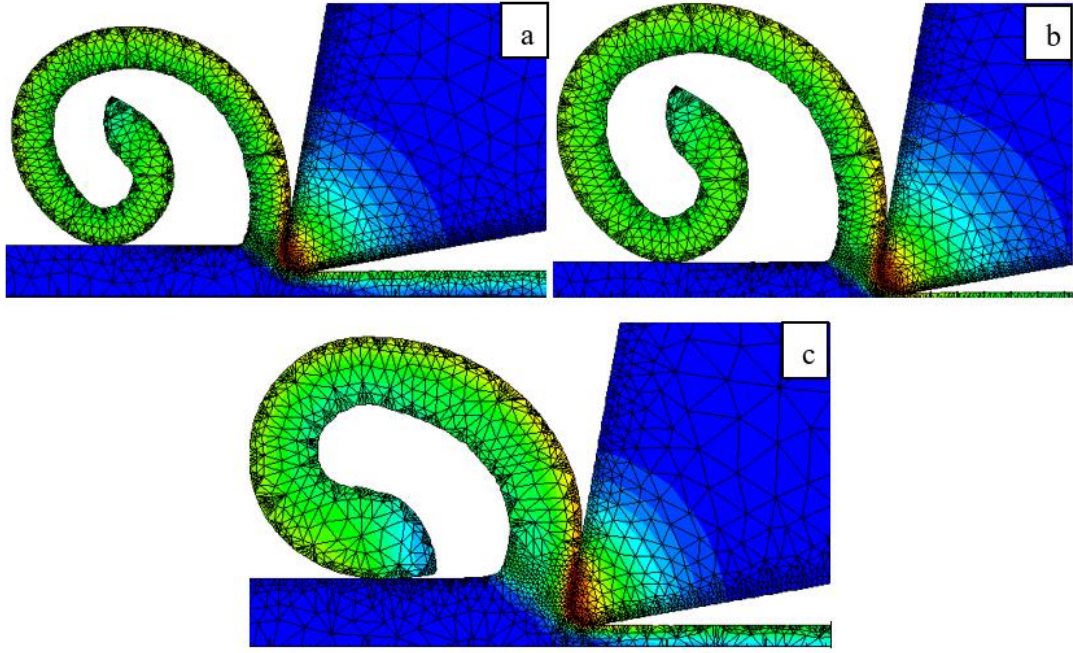
Şekil 5.43’de işlemsiz tungsten karbür takımlar kullanılarak farklı talaş derinliklerinde yapılan tornalama deneylerinde ölçülen F_c değerleri ile nümerik analizlerden elde edilen F_c değerlerinin değişim grafiği yer almaktadır.



Şekil 5.43. Talaş derinliğine göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Talaş derinliğine göre F_c değerlerindeki değişimler değerlendirildiğinde, ilerleme miktarının etkisine benzer bir eğilim görülmektedir. Talaş derinliğinin düzenli olarak %100 ve %200 oranlarında arttırılarak 1,5 mm'ye arttırılmasıyla yapılan deneylerde F_c değeri %158,3 (310 N) ve %250 (420 N) oranlarında artmıştır. Aynı kesme şartlarında nümerik analizlerle belirlenen F_c değerinde ise sırasıyla %130 (300 N) ve %246,15 (450 N) oranlarında bir artış görülmüştür. Şekil 5.43 ve 5.44 incelendiğinde hem deneysel hem de nümerik analizlerle belirlenen F_c değerlerinin talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Şekil 5.44'de 180 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerleme miktarında ve farklı talaş derinliklerinde yapılan nümerik analizlerde elde edilen talaş oluşumu görüntüleri yer almaktadır. Nümerik analizlerde 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm talaş derinlikleri için talaş kalınlığı sırasıyla, yaklaşık olarak 0,168 mm, 0,175 mm ve 0,353 mm ölçülmüştür. Sonuç olarak, talaş derinliğinin artması ile F_c değerlerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.44. Talaş derinliğine bağlı talaş oluşumu a) 0,5, b) 1, c) 1,5 mm.

Hem deneysel hem de nümerik analiz sonuçları için genel bir değerlendirme yapılacak olursa, ilerleme miktarı ve talaş derinliğinin artmasıyla esas kesme kuvvetinin arttığı gözlenirken, kesme hızının artması ile F_c değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuç literatürle örtüşmektedir. Deneysel sonuçlar ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, deneysel olarak ölçülen F_c değerleri ile Nümerik analizler sonucu elde edilen F_c değerleri arasında yaklaşık olarak %12 oranında bir sapma tespit edilmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Inconel 625 süper alaşımın farklı bekleme sürelerinde sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmış takımlar ile işlenebilirliği araştırılmıştır. Ayrıca, kesme parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiş ve esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için Taguchi yöntemi kullanılarak matematiksel modeller geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

Kriyojenik işlemin tungsten karbür kesici takımın mikrosertliğini arttırdığı belirlenmiştir. 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış takımda sertliğin belirgin şekilde arttığı görülmüştür.

Kaplamasız tungsten karbür takımın kriyojenik işlem öncesindeki sertlik değeri 1824 HV iken 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanması sonrası %8,44 oranında artarak 1978 HV olmuştur.

AlTiN Kaplamalı karbür takımda ise kriyojenik işlem öncesinde sertlik değeri 1910 HV iken 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanması sonrası %2,87 oranında artarak 1965 HV olmuştur.

TiCN-Al₂O₃ Kaplamalı karbür takımda ise kriyojenik işlem öncesinde sertlik değeri 1905 HV iken 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanması sonrası %2,62 oranında artarak 1955 HV olmuştur.

Kaplamasız, AlTiN ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici takımlar ile tornalama deneylerinde ölçülen esas kesme kuvvetinin, kaplamasız takımlara göre kaplamalı takımlarda yaklaşık olarak %20 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

En düşük esas kesme kuvveti değeri için işleme parametrelerinin optimum seviyelerinin belirlenmesinde S/N oranlarından yararlanılmıştır. Esas kesme kuvveti için 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takım, 180 m/dak kesme hızı, 0,12 mm/dev ilerleme miktarı ve 0,5 mm talaş derinliğinin optimum kesme parametresi seviyeleri olduğu belirlenmiştir. Bu kesme şartlarında 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana kaplamasız, AlTiN ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici takımlar kullanılarak yapılan tornalama deneylerinde esas kesme kuvveti değerleri sırasıyla, 82 N, 76 N ve 70 N ölçülmüştür.

Optimum kesme şartlarında işlemsiz kesici takım ile 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana kaplamasız takımlar ile yapılan tornalama deneylerinde ölçülen esas kesme kuvveti değeri, işlemsiz takımı göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takım ile yapılan deneylerde %32,3 daha düşük ölçülmüştür.

Optimum kesme şartlarında işlemsiz AlTiN kaplamalı kesici takım ile 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana AlTiN kaplamalı takımlar ile yapılan tornalama deneylerinde ölçülen esas kesme kuvveti değeri, işlemsiz takımı göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takım ile yapılan deneylerde %31 daha düşük ölçülmüştür.

Optimum kesme şartlarında işlemsiz TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici takımlar ile 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlar ile yapılan tornalama deneylerinde ölçülen esas kesme kuvveti değeri, işlemsiz takımı göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takım ile yapılan deneylerde %30 daha düşük ölçülmüştür.

Bütün takımlarda ilerleme miktarının artması ile yapılan deneylerde esas kesme kuvvetinin arttığı görülmüştür.

Bütün takımlarda kesme hızınının 60 m/dak'dan 180 m/dak'a çıkarılması ile yapılan deneylerde esas kesme kuvveti değerlerinin azaldığı görülmüştür.

İşlemsiz ve kriyojenik işlem uygulanmış bütün takımlarda talaş derinliğinin artması ile yapılan deneylerde esas kesme kuvvetinin arttığı görülmüştür.

ANOVA sonuçları, kaplamasız, AlTiN ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 süper alaşımının tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvvetlerini etkileyen en önemli parametrenin sırasıyla %90,03 %89,7 ve %87,73 katkı oranı ile talaş derinliği olduğunu göstermektedir. Esas kesme kuvvetini etkileyen ikinci en önemli parametrenin ise ilerleme miktarı olduğu görülmüştür.

Inconel 625 süper alaşımın tornalanmasında meydana gelen esas kesme kuvvetini tahmin etmek için geliştirilen ikinci dereceden regresyon modelinin 0,936'lık bir korelasyon katsayısı ile deney sonuçları ile çok iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Kaplamasız, AlTiN ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici takımlar ile tornalama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, kaplamasız takımlara göre kaplamalı takımlarda yaklaşık olarak %16 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için işleme parametrelerinin optimum seviyelerinin belirlenmesinde S/N oranlarından yararlanılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takım, 120 m/dak kesme hızı, 0,12 mm/dev ilerleme miktarı ve 1,5 mm talaş derinliğinin optimum kesme parametresi seviyeleri olduğu belirlenmiştir. Bu kesme şartlarında 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana kaplamasız, AlTiN ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici takımlar kullanılarak yapılan tornalama deneylerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla, 0,21 µm, 0,2 µm ve 0,195 µm ölçülmüştür.

Optimum kesme şartlarında işlemsiz kesici takım ile 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana kaplamasız takımlar ile yapılan tornalama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, işlemsiz takımı göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takımda %40 daha düşük ölçülmüştür.

Optimum kesme şartlarında işlemsiz AlTiN kaplamalı kesici takım ile 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana AlTiN kaplamalı takımlar ile yapılan tormalama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, işlemsiz takımı göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takımda %60 daha düşük ölçülmüştür.

Optimum kesme şartlarında işlemsiz TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici takımlar ile 24 saat derin kriyojenik işlem uygulana TiCN-Al₂O₃ kaplamalı takımlar ile yapılan tormalama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerini, işlemsiz takımı göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan takımda %74 daha düşük ölçülmüştür.

Bütün takımlarda ilerleme miktarı ve talaş derinliğinin artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı görülmüştür.

Bütün takımlarda kesme hızınının 60 m/dak'dan 180 m/dak'a çıkarılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ancak, kesme hızınının 120 m/dak'dan 180 m/dak'a çıkarılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değerlerinde bir artış görülmüştür.

ANOVA sonuçları, kaplamasız, AlTiN ve TiCN-Al₂O₃ kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 süper alaşımının tormalama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerini etkileyen en önemli parametrenin sırasıyla %63,55 %57,91 ve %59 katkı oranı ile kesici takım olduğunu göstermektedir.

Inconel 625 süper alaşımının tormalanması sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğünün tahmin etmek için geliştirilen ikinci dereceden regresyon modelinin 0,98'lık bir korelasyon katsayısı ile deney sonuçları ile çok iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

İstatistiksel ve doğrulama sonuçları, Inconel 625 süper alaşımının tormalanmasında optimum kesme parametrelerini tanımlamak için Taguchi optimizasyon metodunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermektedir.

Tornalama Deneyleri ve tornalama simülasyonları karşılaştırıldığında, esas kesme kuvveti için deneysel ve simülasyon sonuçları arasında ortalama %12'lik bir sapma tespit edilmiştir. Bu sapma miktarı çoğunlukla tornalama simülasyonunda kullanılan Inconel 625 süper alaşımının Johnson-Cook malzeme modeli sabitlerine ve takım-iş parçası sürtünme modeline atıf edilebilir.

6.2. ÖNERİLER

Inconel 625 gibi ısı iletkenliği düşük olan süper alaşımların işlenmesinde kesici takımı ısı daha fazla etkilemektedir. Bu nedenle Inconel 625 süper alaşımının işlenmesinde çok katmanlı bir kesici takımın kullanılması önerilmektedir.

Kesme simülasyonları, imalat endüstrisinde kesilmesi zor malzemelerin işlenebilirliği hakkında ileri düzeyde bilgi sağlayabilir.

Talaşlı imalat işlemlerinde kesme ortamına kriyojenik soğutucu gaz direkt püskürtülerek kesme performansına etkisi incelenebilir.

Termokupl ile takım-talaş ara yüzey sıcaklığı ölçülerek kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkileri ilişkilendirilebilir.

HSS ve karbür takımlarda kriyojenik işlemin takım ömrü üzerinde olumlu etkileri görülmüştür. Kriyojenik işlem sermet ve seramik gibi takım malzemelerine uygulanabilir ve kriyojenik işlemin etkisi araştırılabilir.

İdeal uygulama şartları belirli olan kriyojenik işlem ile üretim maliyetleri önemli ölçüde düşürülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Demir, O., Ayhan, A. O., “Düzlemsel Olmayan Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç Boyutlu Analizi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol*, 5 (2): 159–175 (2017).
- [2] Trent, E. M., “Metal Cutting”, *Butterworths Press*, London, 1-171 (1989).
- [3] Black, P. H., “Theory of Metal Cutting”, *Mcgraw-Hill Book Company Inc*, USA, 1-200 (1961).
- [4] Parida, A. K., Maity, K., “Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation”, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 21 (3): 364–370 (2018).
- [5] Kosaraju, S., Kumar, M. and Sateesh, N., “Optimization of machining parameter in turning Inconel 625”, *Materialstoday Proceedings*, 5 (2): 5343–5348 (2018).
- [6] Korkmaz, M. E., Günay, M., “Experimental and statistical analysis on machinability of Nimonic80a superalloy with PVD coated carbide”, *Sigma J. Eng. Nat. Sci. ve Fen Bilim. Derg.*, 36 (4): 1139-1150 (2018).
- [7] Sunulahpasic, R., Hadzalic, M., Oruc, M. and Begovic, E., “Contribution to investigation of the influence of chemical composition on machinability of superalloy Nimonic 80A”, *Procedia Engineering*, 132, 480-485 (2015).
- [8] Sørby, K., Vagnorius, Z., “High-Pressure Cooling in Turning of Inconel 625 with Ceramic Cutting Tools”, *Procedia CIRP*, 77, 74-77 (2018).
- [9] Hemakumar, S., Kuppan, P., “Experimental investigations on the machinability of Inconel 625 under dry cutting environment”, *Materialstoday Proceedings*, 5 (5): 11718-11726 (2018).
- [10] Thakur, A., Gangopadhyay, S., “Dry machining of nickel-based super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool”, *Journal of Cleaner Production*, 129, 256-268 (2016).
- [11] Saleem, M. Q., Mumtaz, S., “Face milling of Inconel 625 via wiper inserts: Evaluation of tool life and workpiece surface integrity”, *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 322-336 (2020).

- [12] Kartheek, G., Srinivas, K. and Devaraj, C., “Optimization of Residual Stresses in Hard Turning of Super Alloy Inconel 718”, *Materialstoday Proceedings*, 5 (2): 4592-4600 (2018).
- [13] Bushlya., Zhou, J. and Ståhl, J. E., “Effect of Cutting Conditions on Machinability of Superalloy Inconel 718 During High Speed Turning with Coated and Uncoated PCBN Tools”, *Procedia CIRP*, 3, 370–375 (2012).
- [14] Özbek, N., Çiçek, A., Gülesin, M. and Özbek, O., “Application of deep cryogenic treatment to uncoated tungsten carbide inserts in the turning of AISI 304 stainless steel”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47 (12): 6270–6280 (2016).
- [15] Wang, Z. Y., Rajurkar, K. P. and Petrescu, G., “Cryogenic Machining of Tantalum”, *Journal of Manufacturing Processes*, 4 (2): 122–127 (2002).
- [16] Höke, G., Şahin, İ., Çinici, H. and Fındık, T., “Kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğin mekanik özellikleri üzerine etkisi”, *Selçuk-Teknik Derg.*, 13, 25–37 (2014).
- [17] Kara, F., Çiçek, A., Kivak, T. and Ekici, E., “Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts”, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 41, 461–469 (2013).
- [18] Khanna, N., Agrawal, C., Gupta, M. K. and Song, Q., “Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy”, *Tribology International*, 143, 106084 (2020).
- [19] Dhananchezian, M., Rajkumar, K., “Cryogenic turning of Hastelloy C-22”, *Materialstoday Proceedings*, 22, 3075–3081 (2020).
- [20] Wang, Z. Y. and Rajurkar, K. P., “Cryogenic machining of hard-to-cut materials”, *Wear*, 239 (2): 168–175 (2000).
- [21] Stampfer, B., Golda, P., Schießl, R., Maas, U. and Schulze, V., “Cryogenic orthogonal turning of Ti-6Al-4V”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111 (1): 359–369 (2020).
- [22] Dhananchezian, M., “Effectiveness of Cryogenic Cooling in Turning of Inconel 625 Alloy”, *Advances in Manufacturing Processes*, 591–597 (2018).
- [23] Leadebal Jr, W. V., de Melo, A. C. A., de Oliveira, A. J. and Castro, N. A., “Effects of cryogenic cooling on the surface integrity in hard turning of AISI D6 steel”, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 40 (1): 15 (2018).
- [24] Korkmaz, M. E., Yaşar, N. and Günay, M., “Numerical and experimental investigation of cutting forces in turning of Nimonic 80A superalloy”, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 23 (3): 664-673 (2020).

- [25] Parida, A. K. and Maity, K., “Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis”, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 20 (2): 687-693 (2017).
- [26] Uçak, N., Çiçek, A., Özkaya, E. and Aslantas, K., “Finite element simulations of cutting force, torque, and temperature in drilling of Inconel 718”, *Procedia CIRP*, 82, 47–52 (2019).
- [27] Özkaya, E., Nicolas, B. and Dirk, B., “Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 108, 52–65 (2016).
- [28] Careri, F., Imbrogno, S., Attallah, M. M., Essa, K. and Umbrello, D., “Finite Element Modeling of Machining Nickel Superalloy Produced By Direct Energy Deposition Process”, *Procedia Manufacturing*, 47, 525–529 (2020).
- [29] Biermann, D., Bücker, M., Tiffe, M. and Özkaya, E., “Experimental investigations for a simulative optimization of the cutting edge design of twist drills used in the machining of Inconel 718”, *Procedia Manufacturing*, 14, 8–16 (2017).
- [30] Dix, M., Wertheim, R., Schmidt, G. and Hochmuth, C., “Modeling of drilling assisted by cryogenic cooling for higher efficiency”, *CIRP Annals*, 63 (1): 73–76 (2014).
- [31] Caruso, S., Imbrogno, S., Rotella, G., Ciarana, M. I., Arrazola, P. J., Filice, L. and Umbrello, D., “Numerical Simulation of Surface Modification During Machining of Nickel-based Superalloy”, *Procedia CIRP*, 31, 130-135 (2015).
- [32] Parida, A. K. and Maity, K., “FEM analysis and experimental investigation of force and chip formation on hot turning of Inconel 625”, *Def. Technol.*, 15 (6): 853-860 (2019).
- [33] Tamang, S. K., Teyi, N. and Tsumkhapa, R. T., “Numerical Simulation of Cutting Force in High Speed Machining of Inconel 718,” *Key Eng. Mater.*, 856, 43–49 (2020).
- [34] Matthew, J. D. and Stephen, J. D., “Superalloys: A Technical Guide, 2nd Edition”. *ASM International*, (2002).
- [35] internet: “High-Temperature Machining Guide”, https://s7d2.scene7.com/is/content/Kennametal/SuperAlloys_material_machining_guide_Aerospacepdf (2020).
- [36] Jawaid, A., Koksai, S. and Sharif, S., “Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy”, *J. Mater. Process. Technol.*, 116 (1): 2–9 (2001).

- [37] Korkmaz, M. E., “Nikel esasli süper alaşimin (nimonic 80a) malzeme yapisal denklem parametrelerinin belirlenmesi ve uygulanabilirliğinin araştirilmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 10-60 (2018).
- [38] Motorcu, A. R., “Nikel Esaslı Süperalaşımların ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, 25 (2): 302–330 (2009).
- [39] Fu, Z., Yu, X., Shang, H., Wang, Z. and Zhang, Z., “A new modelling method for superalloy heating in resistance furnace using FLUENT”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 128, 679–687 (2019).
- [40] Krishna, S. C., Gangwar, N. K., Jha, A. K., Pant, B. and Venkitakrishnan, P. V., “On the direct aging of iron based superalloy hot rolled plates”, *Mater. Sci. Eng. A*, 648, 274–279 (2015).
- [41] Sarıkaya, M., “Kobalt esasli haynes 25 süper alaşimin işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-90 (2014).
- [42] Forsik, S. A., Rosas, A. O. P., Wang, T., Colombo, G. A., Zhou, N., Kernion, S. J. and Epler, M. E., “High-Temperature Oxidation Behavior of a Novel Co-Base Superalloy”, *Metall. Mater. Trans. A*, 49 (9): 4058-4069 (2018).
- [43] Zhang, Y., Fu, H., Zhou, X., Zhang, Y. and Xie, J., “Effects of aluminum and molybdenum content on the microstructure and properties of multi-component γ' -strengthened cobalt-base superalloys”, *Mater. Sci. Eng. A*, 737, 265–273 (2018).
- [44] Yılmaz, T., “Farkli ilave metaller kullanilarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen 316 L paslanmaz çelik ve L605 kobalt esasli süperalaşım levhaların metalurjik özelliklerinin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-74 (2019).
- [45] Peng, H., Shi, Y., Gong, S., Guo, H. and Chen, B., “Microstructure, mechanical properties and cracking behaviour in a γ' -precipitation strengthened nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting”, *Materials & Design*, 159, 155-169 (2018).
- [46] Jarvis, D. J. and Voss, D., “IMPRESS Integrated Project - An overview paper”, *Mater. Sci. Eng. A*, 413–414, 583–591 (2005).
- [47] Garimella, L., Liaw, P. K. and Klarstrom, D. L., “Fatigue behavior in nickel-based superalloys: A literature review”, *JOM*, 49 (7):67 (1997).
- [48] internet: “Inconel 625 Alloy.”
<https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-1-alloy-625.pdf>. (2019)

- [49] Groover, M. P., “Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems”, *Prentice-Hall Inc.*, NJ, 1-816 (2013).
- [50] Shaw, M. C., “Metal Cutting Principles”, *Oxford University Press*, Oxford, 1-20 (1989).
- [51] Çiftçi, İ., “Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-129 (2003).
- [52] Sur, G., “Karma takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi, mekanik özellikler ve işlenebilirliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-267 (2008).
- [53] Zhang, J., “Theory and Technique of Precision Cutting”, *Pergamon Press*, Oxford, 1-40 (1991).
- [54] Günay, M., “Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-232 (2009).
- [55] De Garmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A. and Klamecki, B. E., “Materials and processes in manufacturing”, *Prentice-Hall Inc*, New Jersey (1997).
- [56] Coromant, S., “Modern metal cutting - A practical handbook”, English Edition, *Sandvik Coromant*, Sweden, 1-10 (1994).
- [57] Arık, İ., “Farklı adımlı kesici ağızlara sahip freze çakılarının tırlama titreşimleri üzerine etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-60 (2010).
- [58] Ceylan, İ., “Metallerin Plastik Şekillendirilmesinde Kullanılan Malzeme Modellerinin Sonlu Elemanlar İle Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-60 (2008).
- [59] internet: “Mesh tipleri”
<https://skill-lync.freshdesk.com/support/solutions/articles/43000568714-what-is-mesh-> (2020).
- [60] Korkmaz, M. E. “Ferritik Paslanmaz Çeliğin Malzeme Yapısal Denklem Parametrelerinin Belirlenmesi ve Doğrulanması”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Derg.*, 7 (1): 628-639 (2019).
- [61] Lotfi, M., Jahanbakhsh, M. and Farid, A. A., “Wear estimation of ceramic and coated carbide tools in turning of Inconel 625: 3D FE analysis”, *Tribology International*, 99, 107-116 (2016).

- [62] Hokka, M., Gomon, D., Shrot, A., Leemet, T., Bäker, M. and Kuokkala, V. T. “Dynamic Behavior and High Speed Machining of Ti-6246 and Alloy 625 Superalloys: Experimental and Modeling Approaches”, *Exp. Mech.*, 54 (2): 199-210 (2014).
- [63] internet: “Inconel 625 süperalaşım”
<https://www.alloywire.com/products/inconel-625/>. (2020).
- [64] internet: “Inconel 625 süperalaşımı”
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7682>. (2020).
- [65] Deform, T., “3D Version 6.1 (sp1) User’s Manua”, *Scientific Forming Technologies Corporation*, OH, 1-30 (2006).
- [66] Gill, S. S., Singh, J., Singh, H. and Singh, R., “Metallurgical and mechanical characteristics of cryogenically treated tungsten carbide (WC–Co)”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 58 (1): 119-131 (2012).
- [67] Ruys, A. J., “Metal-Reinforced Ceramics”. *Elsevier*, 2020.
- [68] Reddy, T. V. S., Sornakumar, T., Reddy, M. V., Venkatram, R. and Senthilkumar, A., “Turning studies of deep cryogenic treated P-40 tungsten carbide cutting tool inserts – technical communication”, *Mach. Sci. Technol.*, 13 (2): 269–281 (2009).
- [69] Özbek, N., Çiçek, A. Gülesin, M. and Özbek, O., “Effect of cutting conditions on wear performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts in dry turning of stainless steel”, *Tribology International*, 94, 223–233 (2016).
- [70] Nas, E. and Özbek, N., “Optimization of the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools”, *Surface Review & Letters*, 27 (5): 1950177 (2020).
- [71] Özbek, N., “Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel”, *J. Mater. Res. Technol.*, (2020).
- [72] Kalsi, N. S., Sehgal, R. and Sharma, V. S., “Effect of tempering after cryogenic treatment of tungsten carbide–cobalt bounded inserts”, *Bull. Mater. Sci.*, 37 (2): 327-335 (2014).
- [73] Bilgin, V., Akyüz, I., Ketenci, E., Köse, S. and Atay, F., “Electrical, structural and surface properties of fluorine doped tin oxide films”, *Appl. Surf. Sci.*, 256 (22) 6586–6591 (2010).
- [74] Gürbulak, B., Duman, S., Erzenoğlu, S. Z., Şata, M., Ashkhasi, A., Kundakçı, M., Aksoy, M., Yıldırım, M., “InSe ve InSe:Zn yarıiletkenlerin Bridgman/Stockbarger tekniğiyle büyütülmesi ve yapısal karakterizasyonu”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı, 77–94 (2015).

- [75] Özbek, N., “AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takıma uygulanan kriyojenik işlemin takım ömrü üzerine etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-150 (2013).
- [76] Akıncioğlu, S., Gökkaya, H. and Uygur, İ., “The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 82 (1): 303–314 (2016).
- [77] Mavi, A. and Korkut, İ., “Machinability of a Ti-6Al-4V alloy with cryogenically treated cemented carbide tools”, *Materials & Technology*, 48 (4): 577-580 (2014).
- [78] Çiftçi, İ., “Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools”, *Tribology International*, 39 (6): 565–569 (2006).
- [79] Demir, H., Gündüz, S. and Erden, M. A., “Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of AISI H13 hot work tool steel”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 95 (5): 2951-2958 (2018).
- [80] Vadivel K. and Rudramoorthy, R., “Performance analysis of cryogenically treated coated carbide inserts”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 42 (3): 222–232 (2009).
- [81] Özlü, B., Demir, H., Türkmen, M. and Gündüz, S., “Investigation of Machinability of Cooled Microalloy Steel in Oil After the Hot Forging with Coated and Uncoated CBN Cutting Tools”, *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, 36 (4):. 1165-1174 (2018).
- [82] Uçun, İ., Aslantaş, K. ve Apaydın, D., “Çok Kaplamalı Kesici Takımla Tornalama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi”, *Makine Teknol. Elektron. Derg.*, 7 (1): 69–82 (2010).
- [83] Pul M. ve Şeker, U., “Metal Matrisli Kompozitlerin Tornalanmasında İlerleme Oranının Kesici Takım Aşınma Davranışlarına Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 17 (3): 99-106 (2014).
- [84] SreeramaReddy, T. V., Sornakumar, T., VenkataramaReddy, M. and Venkatram, R., “Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts”, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 27 (1): 181–185 (2009).
- [85] Akgün, M., Demir, H., Çiftçi, İ., “Mg₂Si partikül takviyeli magnezyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 21(3): 645-650 (2018).

- [86] Özlü, B., Akgün, M. and Demir, H., “Analysis and Optimization of Effects on Surface Roughness of Cutting Parameters on Turning of AA6061 Alloy”, *Gazi Mühendislik Bilim. Derg.*, 5 (2): 151–158 (2019).
- [87] Yeyen, H., Korkut, İ., Turgut, Y. ve Çiftçi, İ., “AISI 303 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri”, *5. Uluslararası İleri Teknol. Sempozyumu*, Karabük (2009).
- [88] Basmacı, G., Ay, M. and Kırbaş, İ., “Optimisation of Machining Parameters in Turning 17-4 Ph Stainless Steel Using the Grey-Based Taguchi Method”, *Erzincan Univ. J. Sci. Technol.*, 10 (2): 243–254 (2017).
- [89] Akgün, M., Yurtkuran, H. and Ulaş, H. B., “Optimization of Cutting Parameters and Analysis of Effects of Artificial Aging on Machinability of AA7075 Alloy”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri. Dergisi*, 26 (1): 75-81 (2020).
- [90] Özlü, B., Demir, H., Türkmen, M., “The effect of mechanical properties and the cutting parameters on machinability of AISI 5140 steel cooled at high cooling rates after hot forging”, *Politeknik Dergisi*, 22 (4): 879-887 (2019).
- [91] Şahin, Y., “Talaş kaldırma prensipleri I”, *Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti.*, Ankara (2000).
- [92] Gökçe, H., Çiftçi, İ. And Demir, H., “Cutting parameter optimization in shoulder milling of commercially pure molybdenum”, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 40 (7): 360 (2018).
- [93] H. Yaka, H. Demir, and A. Gök, “Optimization of the cutting parameters affecting the surface roughness on free form surfaces”, *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, 35 (2): 323-331 (2017).
- [94] Korkmaz, M. E. and Yaşar, N., “FEM modelling of turning of AA6061-T6: Investigation of chip morphology, chip thickness and shear angle”, *J. Prod. Syst. Manuf. Sci.*, 2 (1): 50–58 (2021).
- [95] Korkmaz, M. E. and Günay, M., “Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel”, *Arab. J. Sci. Eng.*, 43 (9): 4863–4870 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

07.07.1990 yılında Yozgat ilinde doğan Mahir AKGÜN, ilk ve orta öğrenimini Ankara ilinde ve lise öğrenimini Gazi Teknik Lisesi CNC Bölümü'nde tamamlamıştır. 2007 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, Talaşlı Üretim Öğretmenliği Programında öğrenime başlayıp 2011 yılında mezun olmuştur. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını 2013 yılında tamamlamıştır. Bu süre zarfında Ankara ilinde çeşitli savunma sanayi firmalarında Cad/Cam uzmanı olarak çalışmıştır. 2013 yılında Aksaray Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başlamış ve halen aynı bölümde çalışmalarına devam etmektedir. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Doktora eğitimine devam ederken 2018 yılında Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur.