



**KOBALT ESASLI HAYNES 25 SÜPER ALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Murat SARIKAYA

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2014

Murat SARIKAYA tarafından hazırlanan “KOBALT ESASLI HAYNES 25 SÜPER ALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Rıza GÜRBÜZ

Mekatronik Mühendisliği, Çankırı Karatekin Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 22/04/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat SARIKAYA

26.03.2014

KOBALT ESASLI HAYNES 25 SÜPER ALAŞIMIN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

(Doktora tezi)

Murat SARIKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2014

ÖZET

Bu çalışmada işlenebilirliği en zor malzeme grubunda gösterilen Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi sürecinde kesme parametrelerinin ve soğutma/yağlama yöntemlerinin süper alaşımın işlenebilirliğine etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. İşlenebilirlik deneyleri CNC torna tezgâhında kaplamasız karbür kesici takımlar kullanılarak dört farklı kesme hızı (15; 30; 45; 60 m/min) üç farklı ilerleme oranı (0,08; 0,12; 0,16 mm/rev) ve sabit talaş derinliğinde (1 mm) yapılmıştır. Deneyler önce kuru işleme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, geleneksel soğutma, basınçlı hava ile soğutma (BH), minimum miktarda kesme yağı kullanılarak soğutma (MMS) ve takım içinden sıvı azot geçirilerek kriyojenik soğutma şartlarında tekrarlanmıştır. Her bir deney neticesinde kesme şartları ve takım soğutma sistemi ile aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Kesici takım üzerinden ölçülen sıcaklıklar referans alınmış ve ANSYS programı kullanılarak tersine ısı iletim yöntemi ile kesme bölgesindeki sıcaklıklar modellenmiştir. MMS yönteminde seçilen kesme yağı cinsinin (CF_s), yağ akış debisinin (Q) ve kesme hızının (V); takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini belirlemek için bu parametreler MMS altında Taguchi L_9 dikey deney tasarım yöntemiyle ayrıca değerlendirilmiştir. Tüm işleme şartlarında yapılan deneylerde, malzemeden kaldırılan sabit talaş hacmi sonunda, düşük kesme hızında (15 m/min) yüksek oranda yanak aşınması (VB), yüksek kesme hızında ise yüksek oranda çentik aşınması (VB_{max}) ortaya çıkmıştır. Takımlar üzerinde yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerinde işleme şartlarına bağlı olarak uç üzerinde adheziv aşınma, abrasiv aşınma, difüzyon aşınması, yığıntı talaş (YT) ve yığıntı katmanı (YK) mekanizmaları görülmüştür. Düşük kesme hızında oluşan YT ve YK yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir. Sabit talaş hacminde en düşük takım aşınması kriyojenik soğutma koşullarında $V_c=30$ m/min kesme hızı ve $f=0,16$ mm/rev ilerlemede elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü, kriyojenik soğutma altında $V=60$ m/min kesme hızı ve $f=0,12$ mm/rev ilerlemede $0,572 \mu m$ olarak ölçülmüştür. En düşük takım yüzeyi sıcaklığı ise kriyojenik soğutma şartları altında gerçekleşmiştir. En uygun MMS parametrelerinin belirlenmesi için yapılan deneylerde ise $Q=180$ ml/h yağ akış debisinde bitkisel esaslı kesme yağı en iyi sonucu vermiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Haynes 25/L 605, süper alaşım, işlenebilirlik, MMS, kriyojenik soğutma, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, modelleme.
Sayfa Adedi : 178
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF COBALT-BASED HAYNES 25
SUPER ALLOY
(Ph. D. Thesis)

Murat SARIKAYA

GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2014

ABSTRACT

In this study, investigation of the effects of cutting parameters and cooling/lubricating methods on the machinability of super alloy's during the machining of Haynes 25, which is illustrates in the most difficult materials machining group, has been aimed. Machinability experiments were performed using uncoated carbide tools at four levels of cutting speed (15; 30; 45; 60 m/min), three levels of feed rate (0,08; 0,12; 0,16 mm/rev) and fixed level of depth of cut (1 mm) on CNC machine lathe. First, experiments were carried out under the dry-cutting conditions. Then, they were repeated under conventional cooling, with compressed air cooling, using minimum quantity lubrication (MQL) and cryogenic cooling conditions from through tool passing the liquid nitrogen. At the end of each experiment, the relationships between the cutting conditions and the tool cooling system and the response factors of tool wear, surface roughness and temperature are determined. Temperatures have been taken on measured the cutting tool and at the cutting zone temperatures were modeled with inverse thermal model method using ANSYS software. The type of the cutting fluid (CF_s), fluid flow rate (Q) and cutting speed (V) which are parameters of MQL have been also evaluated under MQL to determine the effect of tool wear and surface roughness using design of experiment of the Taguchi L₉ orthogonal array. In conducted experiments for all machining conditions, at the end of the constant chip volume from material removed, high rate flank wear (VB) at low cutting speed and high rate notch wear (VB_{max}) at high cutting speed have been appeared. On the inspections of the SEM on the tools, it is observed that there are tool wear mechanisms such as adhesion wear, abrasion wear, diffusion wear, built up edge (BUE), built up layer (BUL) depending on machining conditions. Surface quality was adversely affected by BUE and BUL formation which occurred at low cutting speed. At constant chip volume, the lowest tool wear was determined under cryogenic cooling conditions at V= 30 m/min of cutting speed and f= 0,16 mm/rev of feed rate. The lowest surface roughness was measured as 0,572 µm under cryogenic cooling conditions at V= 60 m/min of cutting speed and f= 0,12 mm/rev of feed rate. The lowest temperature was occurred under cryogenic cooling conditions. In experiments performed to determine the optimum parameters for MQL, vegetable base cutting fluid has given the best result at Q= 180 ml/h of fluid flow rate. In experiments conducted to determine the optimum parameters for MQL, vegetable base cutting fluid has given the best result at Q= 180 ml/h of fluid flow rate.

Science Code : 708.3.028

Key Words : Haynes 25 / L 605, super alloy, machinability, MQL, cryogenic cooling, tool wear, surface roughness, temperature, modeling.

Page Number : 178

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince engin bilgi birikimi ve değerli katkıları ile beni yönlendiren Danışmanım Sayın Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ'ye, çok değerli katkılarını esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a ve Sayın Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e ve değerli görüşlerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Rıza GÜRBÜZ'e ve Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneyler ve laboratuvar çalışmalarında emeklerini esirgemeyen Sinop Üniversitesi Makine ve Metal Teknolojileri bölümünün değerli öğretim elemanlarına, kesme yağı temininde yardımcı olan Blaser Swissslube firmasının bölge bayisi Cantek CNC'ye, çalışmalarında emeği geçen arkadaşlarım Arş. Gör. Selim HARTOMACIOĞLU'na, Öğr. Gör. Güven MERAL'e, Arş. Gör. Dr. Gültekin UZUN'a, Ayşegül ÇAKIR'a ve Hacettepe Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Şener KARABULUT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmayı, 112M029 nolu proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, sevgili eşim Mehtap'a ve kızım Ayla Berra'ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGE VE KISALTMALAR	xix
 1. GİRİŞ	1
 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Haynes 25 Süper Alaşımının İşlenebilirliği Üzerine Yapılan Çalışmalar	3
2.2. Soğutma Yağlama Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar	7
2.3. Takım-Talaş Yüzeyi Sıcaklığı ve Tersine Isı İletim Yöntemi Üzerine Yapılan Çalışmalar	25
2.4. Literatür Araştırmasının Genel Değerlendirmesi	29
 3. SÜPER ALAŞIMLAR	33
3.1. Süper Alaşımların Gelişim Süreci	35
3.2. Süper Alaşımların Yapıları	37
3.3. Süper Alaşımların Çeşitleri	37
3.3.1. Nikel esaslı süper alaşımlar	39
3.3.2. Demir esaslı süper alaşımlar	41
3.3.3. Kobalt esaslı süper alaşımlar	42
 4. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK	47

	Sayfa
4.1. Talaş Kaldırma Mekanığı.....	48
4.2. Takım Talaş Ara Yüzeyi ve Yığıntı Talaş Oluşumu.....	50
4.3. Talaş Şekilleri.....	51
4.4. Talaşlı İmalat İşleminde Isı ve Sıcaklık.....	53
4.5. Yüzey Pürüzlülüğü.....	55
4.6. Kesici Takım Aşınması.....	56
4.6.1. Aşınma mekanizmaları.....	58
4.6.2. Aşınma tipleri.....	59
4.7. İşlenebilirlik.....	61
5. MALZEME VE METOT.....	63
5.1. Malzeme.....	63
5.2. Kesici Takım ve Takım Tutucu.....	64
5.2.1. Kesici takım.....	64
5.2.2. Takım tutucu.....	65
5.3. Takım Tezgahı.....	65
5.4. Deneylerin Yapılışı ve Strateji.....	66
5.5. Kesme Parametreleri ve Soğutma/Yağlama Performansı Deneyleri.....	66
5.6. Deneylerde Kullanılan Soğutma/Yağlama Yöntemleri.....	67
5.6.1. Geleneksel soğutma (yağ+su emülsiyonu) yöntemi.....	67
5.6.2. Basınçlı hava ile soğutma yöntemi.....	67
5.6.3. Minimum miktarda kesme sıvısı (MMS) ile soğutma/yağlama yöntemi.....	68
5.6.4. Kriyojenik soğutma yöntemi.....	70
5.7. MMS Performans Deneyleri.....	73
5.8. Kesici Takım Sıcaklığının Belirlenmesi.....	74

	Sayfa
5.8.1. Termokupul ile sıcaklıkların ölçülmesi.....	74
5.8.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile sıcaklıkların tahmini.....	75
5.8.3. Tersine ısı iletim modeli.....	76
5.8.4. Sıcaklık doğrulama deneyleri.....	80
5.9. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi.....	81
5.10. Takım Aşınmasının Ölçülmesi.....	82
5.10.1. Takım ömrü ön deneyleri.....	82
5.10.2. Esas takım ömrü deneyleri ve takım aşınmasının ölçülmesi.....	83
5.11. İstatistiksel Analiz.....	83
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	85
6.1. Deney Sonuçları ve Tartışma.....	85
6.1.1. Aşınma.....	85
6.1.2. SEM fotoğraflarıyla aşınma mekanizmalarının analizi.....	94
6.1.3. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi.....	112
6.1.4. Kesici takım yüzeyi sıcaklığının değerlendirilmesi.....	119
6.1.5. Sıcaklık doğrulama deneyi sonuçları.....	126
6.1.6. MMS parametrelerinin işlenebilirliğe etkisinin değerlendirilmesi.....	127
6.2. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizlerle Yorumlanması.....	134
6.2.1. Kesici takım aşınmasının analizi.....	135
6.2.2. Yüzey pürüzlülüğünün analizi.....	141
6.2.3. Kesici takım sıcaklığının analizi.....	144
6.2.4. MMS parametrelerinin analizi.....	146
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	151
KAYNAKLAR.....	157

	Sayfa
EKLER.....	173
EK-1. Malzeme spesifikasyon raporu.....	174
ÖZGEÇMİŞ.....	175

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Süper alaşımlardaki bazı elementlerin etkileri.....	34
Çizelge 3.2. Nikel esaslı süper alaşımların yaklaşık kimyasal bileşimleri.....	40
Çizelge 3.3. Kobalt esaslı süper alaşımların genel kimyasal bileşimleri.....	42
Çizelge 3.4. Alaşım elementlerinin kobalt esaslı süper alaşımlara etkileri.....	43
Çizelge 5.1. Malzemenin kimyasal bileşimi.....	63
Çizelge 5.2. Malzemenin mekanik özellikleri.....	64
Çizelge 5.3. Malzemenin fiziksel özellikleri.....	64
Çizelge 5.4. Kesici uç geometrisinin teknik özellikleri.....	64
Çizelge 5.5. CNC torna tezgahının teknik özellikleri.....	65
Çizelge 5.6. Deney girdi parametreleri.....	66
Çizelge 5.7. Araştırmada çıktı parametrelerinin özeti.....	66
Çizelge 5.8. Mineral esaslı yağa ait teknik özellikler.....	69
Çizelge 5.9. TAYLOR WHARTON XL-70 tipi sıvı azot tankı özellikleri.....	70
Çizelge 5.10. Sentetik esaslı madeni yağa ait teknik özellikler.....	73
Çizelge 5.11. Bitkisel esaslı yağa ait teknik özellikler.....	73
Çizelge 5.12. Taguchi $L_9(3^3)$ orthogonal deney tasarımı.....	74
Çizelge 5.13. Deney girdi parametreleri (MMS deneyleri için).....	74
Çizelge 5.14. DT 8891A temaslı termometre cihazının özellikleri.....	75
Çizelge 5.15. Kesici ucun fiziksel özellikleri.....	79
Çizelge 5.16. Altılığın fiziksel özellikleri.....	79
Çizelge 5.17. Katerin fiziksel özellikleri.....	79
Çizelge 5.18. Malzemenin fiziksel özellikleri.....	79
Çizelge 5.19. TIME TR yüzey pürüzlülük ölçme cihazının teknik özellikleri.....	82

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Yan yüzey (yanak) aşınması (VB) sonuçları.....	86
Çizelge 6.2. Maksimum yan yüzey (yanak) aşınması (VB _{max}) sonuçları.....	87
Çizelge 6.3. Kesme hızı, ilerleme oranı ve soğutma/yağlama şartına bağlı olarak işlenen yüzeylerde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri.....	113
Çizelge 6.4. İşleme şartlarında ölçülen ve tahmin edilen takım sıcaklıkları.....	120
Çizelge 6.5. Doğrulama deney sonuçları.....	126
Çizelge 6.6. MMS performans deneylerinin sonuçları.....	128
Çizelge 6.7. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.....	134
Çizelge 6.8. Yanak aşınması sonuçları için ANOVA tablosu.....	135
Çizelge 6.9. Maksimum yanak aşınması sonuçları için ANOVA tablosu.....	136
Çizelge 6.10. VB modeli için katsayılar.....	139
Çizelge 6.11. VB _{max} modeli için katsayılar.....	139
Çizelge 6.12. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları için ANOVA tablosu.....	142
Çizelge 6.13. Yüzey pürüzlülüğü modeli için katsayılar.....	143
Çizelge 6.14. Sıcaklık sonuçları için ANOVA tablosu.....	144
Çizelge 6.15. Sıcaklık modeli için katsayılar.....	145
Çizelge 6.16. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.....	146
Çizelge 6.17. MMS parametrelerinin ANOVA tablosu.....	147
Çizelge 6.18. Modeller için katsayılar tablosu.....	148

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Süper alaşımların işlenebilirlik sıralaması.....	4
Şekil 2.2. Dikey kesme modeliyle tornalamada ısı oluşumu.....	7
Şekil 2.3. Nozul yardımıyla kriyojenik soğutma.....	8
Şekil 2.4. Kesici takım içinden hava kanalları ile kriyojenik soğutma.....	9
Şekil 2.5. Kriyojenik soğutma deney düzeneği.....	13
Şekil 2.6. MMS soğutma sistemi deney düzeneği.....	14
Şekil 2.7. Kriyojenik soğutma.....	20
Şekil 3.1. Süper alaşımların gelişimi ve sıcaklık dayanımları.....	36
Şekil 3.2. Süper alaşımların sınıflandırılması.....	38
Şekil 3.3. Levha tipi kobalt esaslı süper alaşımların kopma direncinin karşılaştırılması.....	45
Şekil 4.1. Dik kesme modeli a) İzometrik görünüş b) Önden görünüş.....	49
Şekil 4.2. Plastik deformasyon bölgeleri.....	49
Şekil 4.3. Kesintili talaş.....	51
Şekil 4.4. Sürekli talaş.....	52
Şekil 4.5. Yığıntı talaş.....	52
Şekil 4.6. Yarı kesintili şekilli talaş.....	53
Şekil 4.7. Kesme bölgesinde ısı oluşumu.....	54
Şekil 4.8. Kesme hızı-sıcaklık ile ilerleme-sıcaklık ilişkisi.....	54
Şekil 4.9. Talaşlı imalat işleminde ısı dağılımı.....	55
Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü karakteristikleri.....	56
Şekil 4.11. Temel aşınma mekanizmalarının şematik olarak gösterilmesi.....	57
Şekil 4.12. Kesici takımlardaki aşınma tipleri.....	60
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan kaplamasız karbür kesici uç.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Takım tutucu özellikleri.....	65
Şekil 5.3 Basınçlı hava ile soğutma düzeneği.....	68
Şekil 5.4. Nozul ağız geometrisi.....	68
Şekil 5.5. MMS soğutma/yağlama deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	69
Şekil 5.6. Kriyojenik soğutma için sıvı kanalları açılan takım tutucunun detay resmi görüntüleri.....	71
Şekil 5.7. Kriyojenik soğutma için sıvı geçiş kanalları açılan takım tutucunun katı model görüntüsü.....	71
Şekil 5.8. Sıcaklık ölçme noktası.....	75
Şekil 5.9. 3-D ısı dağılım görüntüsü a) Montaj görüntüsü b) Kesici uç.....	77
Şekil 5.10. Solid 92 - 10 Düğüm) tetrahedral yapı.....	78
Şekil. 5.11. ANSYS program görüntüsü a) Kesici takım b) Sonlu elemanlar analizi ile örgü yapısı.....	78
Şekil 5.12. Kesici takım üzerinde termokupul pozisyonu.....	80
Şekil 5.13. Kesici uç üzerindeki sıcaklıkların ölçüldüğü delik pozisyonu.....	81
Şekil 6.1. İlerleme oranı ve kesme hızına bağlı takımın yanak aşınması a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik.....	88
Şekil 6.2. İlerleme oranı ve kesme hızına bağlı takımın maksimum yanak aşınması a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik.....	89
Şekil 6.3. Soğutma/yağlama yöntemlerinin yanak aşınması üzerindeki etkisi a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme.....	92
Şekil 6.4. Soğutma/yağlama yöntemlerinin maksimum yanak aşınması üzerindeki etkisi a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme.....	94
Şekil 6.5. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik.....	114
Şekil 6.6. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik.....	117

Şekil	Sayfa
Şekil 6.7. Soğutma/yağlama performanslarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme.....	118
Şekil 6.8. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de ölçülen sıcaklıkların dağılımı.....	120
Şekil 6.9. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de oluşan sıcaklığın zamana göre dağılımı.....	121
Şekil 6.10. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de tahmin edilen sıcaklığın kesici uç üzerinde dağılımı a) Takımın genel görünümü b) Kesici ucun görünümü.....	121
Şekil 6.11. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de tahmin edilen maksimum sıcaklık.....	122
Şekil 6.12. Kesme hızı ve ilerlemenin sıcaklığa etkisi a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik.....	123
Şekil 6.13. Soğutma/yağlama performanslarının kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkisi a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme.....	125
Şekil 6.14. Deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	127
Şekil 6.15. Deney sonuçları ile analiz sonuçları arasındaki ilişki.....	127
Şekil 6.16. MMS giriş parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkisi a) Yanak aşınması (VB) b) Maksimum yanak aşınması (VB _{max}).....	129
Şekil 6.17. MMS giriş parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi.....	133
Şekil 6.18. Kontrol faktörlerinin yanak aşınması üzerindeki etkisi a) V=15 m/min dikkate alındığında b) V=15 m/min dikkate alınmadığında.....	138
Şekil 6.19. Kontrol faktörlerinin maksimum yanak aşınması üzerindeki etkisi a) V=15 m/min dikkate alındığında b) V=15 m/min dikkate alınmadığında.....	138
Şekil 6.20. Yanak aşınması için deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	140
Şekil 6.21. Maksimum yanak aşınması için deney sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	140

Şekil	Sayfa
Şekil 6.22. Kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi a) $V=15$ m/min dikkate alındığında b) $V=15$ m/min dikkate alınmadığında.....	142
Şekil 6.23. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	143
Şekil 6.24. Kontrol faktörlerinin sıcaklık üzerindeki etkisi.....	144
Şekil 6.25. Sıcaklık için deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	146
Şekil. 6.26. Hataların normal olasılık grafiği a) VB b) VB_{max} c) Ra.....	149

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Deneylerde işlenecek Haynes 25 süper alaşımından numune.....	67
Resim 5.2. MMS ile soğutma /yağlama deney düzeneği a) Sistemin genel görünümü b) Nozul pozisyonu.....	74
Resim 5.3. Adaptör ve kesici takımın fotoğraf görüntüsü.....	72
Resim 5.4. Kriyojenik soğutma deney düzeneğinin görüntüsü.....	72
Resim 5.5. Kriyojenik soğutma koşullarında yapılan tornalama işleminin bir görüntüsü.....	72
Resim 5.6. Delik delinmiş uç görüntüsü.....	81
Resim 6.1. Kuru kesme altında $V=15$ m/min, $f=0,16$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	95
Resim 6.2. Kuru kesme altında $V=30$ m/min, $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	96
Resim 6.3. Kuru kesme altında, $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	97
Resim 6.4. Geleneksel soğutma altında, $V=30$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	99
Resim 6.5. Geleneksel soğutma altında, $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	101
Resim 6.6. BH altında, $V=15$ m/min ve $f=0,08$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	102
Resim 6.7. BH altında, $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	103
Resim 6.8. MMS altında, $V=15$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	105

Resim	Sayfa
Resim 6.9. MMS altında, $V=30$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	106
Resim 6.10. MMS altında, $V=60$ m/min ve $f=0,08$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	107
Resim 6.11. Kriyojenik soğutma altında, $V=15$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	109
Resim 6.12. Kriyojenik soğutma altında, $V=45$ m/min ve $f=0,16$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	110
Resim 6.13. Kriyojenik soğutma altında, $V=60$ m/min ve $f=0,16$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	111
Resim 6.14. MMS altında, mineral esaslı kesme yağ ile $Q=180$ ml/h debi ve $V=50$ m/min işleme parametrelerinde oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması (X700) c) Talaş yüzeyi aşınması (X2000).....	131
Resim 6.15. MMS altında, sentetik esaslı yağ ile $Q=120$ ml/h debi ve $V=50$ m/min işleme parametrelerinde oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	131
Resim 6.16. MMS altında, bitkisel esaslı yağ ile $Q=180$ ml/h debi ve $V=40$ m/min işleme parametrelerinde oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması.....	132

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalar ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
f	İlerleme miktarı, mm/rev
V	Kesme hızı, m/min
a	Kesme derinliği, mm
Q	Debi, ml/h
CFs	Yağ cinsi
Ra	Yüzey pürüzlülüğü, μm
Tm	Ölçülen sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
Tc	Hesaplanan sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
Td	Kesici ucun delinmiş noktasından ölçülen sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
Td_c	Td referans alınarak hesaplanan sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
SY	Soğutma yöntemi
VB	Yanak aşınması, mm
VB_{max}	Maksimum yanak aşınması, mm
R²	Belirlilik katsayısı
k	Termal iletkenlik katsayısı, W/mk
g	Yoğunluk, (kg/m ³)
Cp	Isı kapasitesi, J/K
α	Isı yayınma katsayısı, m ² /s
qt	Isı akışı, W/m ²
Fqm	Bilinmeyen ısı akış miktarı, W/m ²
t	süre, s
T_∞	Ortalama sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
Fc	Esas kesme kuvveti, N

Kısaltmalar	Açıklamalar
ANOVA	Varyans analizi / Analysis of Variance
BSD / CNC	Bilgisayarlı Sayısal Denetim / Computer Numeric Control
BH	Basınçlı hava
ÇKE	Çok kristalli elmas
HB	Brinell sertlik
Kry	Kriyojenik soğutma
KT	Kareler toplamı
KO	Kareler ortalaması
MMS / MQL	Minimum miktarda sıvı / Minimum quantity lubrication
PDF / PAM	Plazma Destekli Frezeleme / Plasma Assisted Milling
SD	Serbestlik derecesi
SE	Standardize edilmiş katsayı
SEM	Tarama elektron mikroskobu / Scanning electron microscope
SK	Sementit karbür
SY	Soğutma/yağlama
YK / BUL	Yığıntı katmanı / Built up layer
YT / BUE	Yığıntı talaş / Built up edge
WC	Tungsten karbür

1. GİRİŞ

Makina imalat sanayisinde tornalama, frezeleme, delme, taşlama gibi talaş kaldırma işlemlerine her yıl dünyada büyük miktarlarda kaynaklar aktarılmaktadır. Maliyetlerin azaltılarak verimliliğin artırılması, günümüz talaş kaldırma işlemlerinin en önemli başarı kriteri olarak değerlendirilmektedir. Geçtiğimiz yüzyıl, tornalama işlemlerinde, kesici takımlar, makina kontrolleri ve soğutma/yağlama teknikleri gibi imalat sürecini etkileyen faktörlerin gelişmesine tanıklık etmiştir. Bu gelişmeler özellikle uçak motorlarında, endüstriyel gaz türbinlerinde, savunma ve otomotiv sanayisinde, cerrahi uygulamalarda kullanılan işlenmesi zor olan malzemelerin işlenebilirliğini iyileştirmiştir. Fakat tornalama işlemlerinde, kesme bölgesindeki sürtünme ve ısı oluşumu, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen problemlerin halen en başında gelmektedir. Bu ısı oluşum mekanizması, modern malzemelerin düşük termal iletkenliği, yüksek sıcak sertliği, aşınma direnci gibi özgün karakteristiklerinden dolayı talaş kaldırma esnasında negatif olarak etkilenmektedir. Kesme bölgesine soğutma/yağlama yöntemlerinin doğru bir şekilde uygulanması ısı oluşumunu azaltacak ve bu malzemelerin verimli ve ekonomik olarak işlenmesine katkılar sağlayacaktır.

Süper alaşım malzemelerin, yüksek sıcak sertliği, düşük termal iletkenliği ve aşınma direnci gibi üstün niteliklerinden dolayı son yıllarda yeni projeler geliştiren ülkemiz savunma sanayinde kullanılmaya başlanmış fakat malzemelerin işlenmesi sırasında yüzey kalitesi, takım ömrü ve işleme maliyeti gibi çözüm bekleyen soruların ortaya çıktığı görülmüştür. Ülkemizin son yıllarda savunma alanında yapmış olduğu yeniliklerden de anlaşılacağı gibi bu malzemeler; başta savunma sanayi olmak üzere tıbbi malzemelerin üretiminde, petrol endüstrisi, askeri ve ticari gaz türbinleri, yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon ihtiyacı duyulan her alanda önemli bir yer tutmaktadır. Kobalt esaslı Haynes 25 / L 605 süper alaşımının, işleme problemlerinin yaşandığı ve bu problemlerinin çözümünde süper alaşımlar için yol gösterici olacağı düşünülen ve araştırılmayı bekleyen malzemelerin başında geldiği görülmüştür. Kesici takımın daha uzun ömürlü olabilmesi ve iş parçasının istenilen kalitede üretilerek hammadde israfının önlenmesi için, kesme performansı ve şartlarını en uygun hale getirme gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunu gerçekleştirebilmek için, kesici takımların ömrüne tesir eden etkenler ile iş parçasının kalitesinin belirlenmesinde etkili olan etkenler bilim adamları tarafından araştırılmaktadır. Malzemenin işleme

maliyetini düşürerek üretim verimini en üst seviyeye çıkarmak için şüphesiz alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemler içerisinde maliyet ve uygulanabilirlik açısından kesici takımın soğutma ve işleme bölgesinin yağlanması yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler, kesme bölgesine direkt etki edecek ve üretimin verimini arttıracaktır.

Bu çalışmada, kobalt esaslı Haynes 25 / L 605 süper alaşımının işlenebilirliği deneysel olarak araştırılmış ve işleme verimini arttırmak için çeşitli soğutma/yağlama yöntemleri kullanılmıştır. Araştırma sonucunda bulunacak en uygun kesme parametreleri ve soğutma/yağlama yöntemleri sayesinde başta Haynes 25 süper alaşımı olmak üzere işlenebilirliği zor malzemeler için azami oranda kalite ve verimin elde edilebilmesi için yol gösterici olacaktır. Bu amaçla CNC torna tezgâhında ISO 3685 standardına uygun olarak farklı kesme hızı, ilerleme oranı, soğutma/yağlama yöntemi ve sabit talaş derinliğinde deneyler yapılmıştır. Deneyler ilk olarak kuru işleme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra geleneksel soğutma (sulu soğutma) yöntemi, basınçlı hava ile soğutma yöntemi (BH), basınçlı hava ile minimum miktarda kesme yağı püskürtmek suretiyle soğutma/yağlama yöntemi (MMS) ve kater içerisinde sıvı azot geçirilerek kriyojenik soğutma yöntemi düzenekleri kurularak deneyler tekrarlanmıştır. Her bir deney neticesinde kesme şartları ve takım soğutma sistemi ile takım aşınması, takım ömrü ve yüzey kalitesi arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Her deney şartında kesme bölgesindeki sıcaklık, temaslı sıcaklık ölçme cihazıyla kesme bölgesine en yakın noktadan ölçülmüş ve tersine ısı iletim yöntemi ile modellenerek kesme yüzeyi sıcaklığı elde edilmiştir. Modelleme için ANSYS 14.5 paket programı kullanılmıştır. Böylelikle kesme parametrelerinin ve soğutma sistemlerinin kesme bölgesinde oluşan sıcaklıklar üzerindeki etkileri belirlenmiştir. MMS yönteminde seçilen kesme yağı ve yağ akış debisinin, deney sonuçlarına (takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü) etki edebileceği düşünülerek bu parametreler MMS yöntemi içerisinde ayrıca değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına etki eden her bir kesme parametresinin ve soğutma tekniğinin % oranı ANOVA analizi yardımıyla tespit edilmiştir. Farklı işleme parametrelerinde tahminsel sonuçlar elde etmek için çoklu regresyon analizi ile 2. dereceden matematiksel modeller elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölüm; literatür taraması, Haynes 25 süper alaşımının işlenebilirliği, soğutma/yağlama yöntemleri ve sıcaklık konusunda yapılmış çalışmalar olmak üzere üç alt başlık altında sunulmuştur.

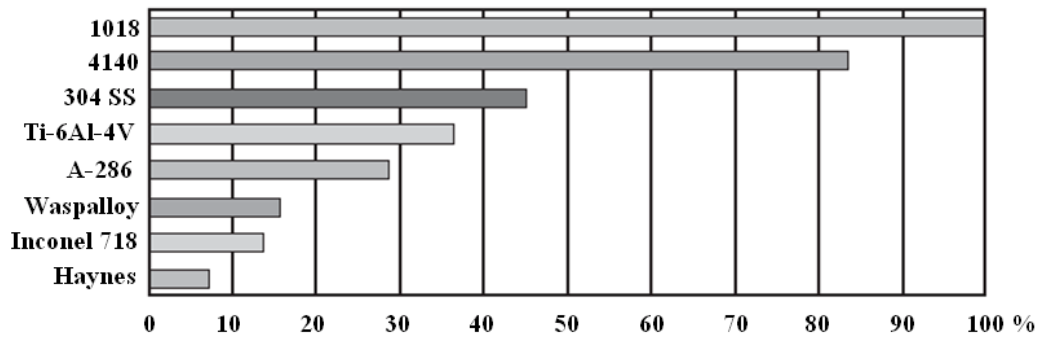
2.1. Haynes 25 Süper Alaşımının İşlenebilirliği Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yüksek sıcaklık alaşımları ya da süper alaşımlar; daha iyi dayanım-ağırlık oranı ve geleneksel alaşımlarla karşılaştırıldığında daha yüksek ısı ve korozyon dayanımı sağladıkları için geliştirilmişlerdir. Süper alaşımlar; uzay, türbin ve fırın parçaları, cerrahi uygulamalar, kimyasal taşıma donanımları ve petrol rafineri elemanları imalatı gibi bazı endüstrilerde daha iyi sonuçlar verdiği için tercih edilmektedir. Tüm bu uygulamalar farklı ısı ve basınç altında gerçekleştirilmekte olup bu şartlar altında özelliğini kaybetmeyecek malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır [1, 2].

Kobalt esaslı süper alaşımlar; yüksek kesme hızlarında oluşan yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliği gösterdiği için işlemede süper alaşımların en fazla ilgi, dikkat ve çaba gerektiren türüdür. Kobalt esaslı içerik, yüksek kesme sıcaklıklarında en yüksek dayanımı sağlamaktadır. Bu alaşımlar muhteva olarak anlamlı miktarlarda nikel, krom ve tungstene sahiptirler ve daha az miktarda molibden, niyobyum, tantalyum, titanyum ve demir içerirler. Haynes 25, Haynes 188, stellite ve AiResist 13 kobalt esaslı süper alaşımlardır [1]. Haynes 25, Kobalt-nikel-krom-tungsten alaşımlarının bileşimi ile mükemmel bir yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma oksidasyon direncine sahip bir süper alaşımdır [3].

İşlenebilirlik; kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi kesme şartlarını içeren bir talaş kaldırma işleminde malzemeyi işlemekteki kolaylık ya da zorluk olarak ifade edilirler. Bir malzemenin işlenebilirliği; takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti gibi bileşenler ölçülerek tanımlanabilir. Çelikte ya da paslanmaz çelikte karşılaştırıldıklarında genel olarak süper alaşım malzemelerinin işlenebilirliği çok daha zordur [4-6]. Bu malzemelerde bulunan bazı elementler (Co, Ni, Cr, Ti) işlemeye karşı yüksek dayanım ve korozyon direnci oluşturmaktadır. Çünkü kobalt, nikel ya da titanyum bileşenleri parçaya sıcak sertlik eğilimi sağlamaktadır.

Bazı süper alaşımların deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş işlenebilirlik indeksleri Şekil 2.1’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde bir 4140 çeliğinin işlenebilirlik indeksi %80’den fazla iken, kobalt alaşımlarının yapısal özelliği nedeniyle Haynes süper alaşımlarının işlenebilirlik oranı %10’nun altında kalarak işlenebilirliği en zor malzeme grubunda yer almaktadır.



Şekil 2.1. Süper alaşımların işlenebilirlik sıralaması [7]

Kobalt esaslı süper alaşımlar kaliteli bir yüzey elde etmede işlenebilirliği en zor olarak bilinen malzemelerdendir ve süper alaşımların işlenebilirliğini güçleştiren belirli sebepler vardır [8-10]. Bunlar;

- i. Yüksek sıcaklık dayanımı özelliğinden dolayı işlenmeleri zorlaşmaktadır.
- ii. İşleme esnasında iş sertliğinin oluşması, talaş derinliğinde çentiğe ve takım aşınmasına sebep olmaktadır.
- iii. Süper alaşımlardaki sert aşındırıcı karbürler, kesilme esnasında kesici takımı önemli derecede etkilemekte ve aşınmayı hızlandırmaktadır.
- iv. Yüksek sıcaklıklarda oluşan kimyasal reaksiyonlar, takım talaş arasında difüzyon aşınmasına neden olmaktadır.
- v. İşleme esnasında talaş ile kesici takım arasında yapışma ya da kaynama oluşmakta, kesici takım yüzeyinde bozulmalar ve malzeme kaybına sebep olmaktadır.
- vi. İşleme esnasında çıkan sürekli ve sert talaşların varlığı, kontrolü sağlamayı güçleştirmekte talaşların takım yüzeyinde krater oluşturmaya sebebiyet vermektedir.

- vii. Zayıf termal iletkenliğinden dolayı süper alaşımlar, takımın yüzeyinde sık sık yüksek sıcaklıklar oluşturmakta, dolayısıyla kesici takımda yüksek radyal gradientlerin oluşmasına neden olmaktadır.

Kobalt esaslı süper alaşımlarda takım ömrünün kısa oluşu ve iş parçasının yüzey kalitesinin işlemeye karşı çok hassas olması dikkat çekicidir [8, 11]. Parça yüzeyindeki artık gerilim, işleme esnasında işlenen elemanın mekanik gerilim ve korozyon özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Süper alaşımların talaş kaldırılarak işlenmesi, esnasında yüzey tamlığını ve kalitesini sağlamak için aşırı dikkat gerekmektedir. Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği gibi parametreler, uzun takım ömrü elde etmek için işleme esnasında sık sık kontrol edilmelidir [12].

Süper alaşım malzemelerinin genel olarak işlenebilirliği çeliklerle hatta paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında oldukça zordur. Bu malzemelere yüksek mukavemet ve korozyon direnci vermek için katılan elementler (Ni, Co, Cr, Ti) süper alaşımların işlenebilirliğinde sorun olmaktadır. Genellikle yüksek kobalt, nikel ya da titanyum içeriği alaşımların sertliğini arttırdığından dolayı işlenebilirliğini de zorlaştırmaktadır. Ayrıca süper alaşımların, sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı özelliklerinden dolayı kesme gücü oldukça artmaktadır. Bu yüzden bu malzemelerin işlenirken kullanılan kesici takımlar ve kesme parametrelerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici uçlar bu malzemelerin işlenmesinde kullanılabileceği gibi bazı uygulamalarda seramik veya PCBN uçlar daha iyi ve etkili sonuçlar verebilir [1].

Kobalt esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklıklarda korozyon direnci nikel esaslı süper alaşımlara göre daha iyidir. Ancak kobalt alaşımlarının işlenebilirliğinin daha zor oluşu kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Bu süper alaşımlar motorların yanma bölgelerinde, nükleer reaktörlerde ve korozyon direncinden dolayı cerrahi uygulamalarda kullanılır. Bu alaşımlar içerisinde yaygın olarak kullanılan türler ise Haynes 25 ve Stellite 31' dir [13, 14].

Isıl dirençli süper alaşımların işlenebilirliği östenitik paslanmaz çeliklerden daha zordur ve bu malzemelerin işlenmesinde düşük ilerleme, kesme hızı ve talaş derinliği tavsiye edilir. Delme operasyonlarında kesme hızı 4,5 m/min ve 0,025 mm/rev ila 0,1 mm/rev arasında ilerleme değerleri verilmelidir. Tornalama operasyonlarında ise kesme 6 m/min ve 0,05

mm/rev ilerleme verilmesi tavsiye edilmektedir. Kobalt takviyeli yüksek hız çelikleri ve tungsten karbür kesici takımlar uygun kesme parametreleri ile kullanılabilir. Takım geometrileri nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kullanılan takımlar ile benzerlik göstermektedir. Isıl dirençli süper alaşımların yüksek sertlik ve yüksek kayma dayanımı özelliği bu alaşımların işlenebilirliğini zorlaştırmaktadır. Tüm işleme seçeneklerinde kesme yağı kullanılabilir [15, 16].

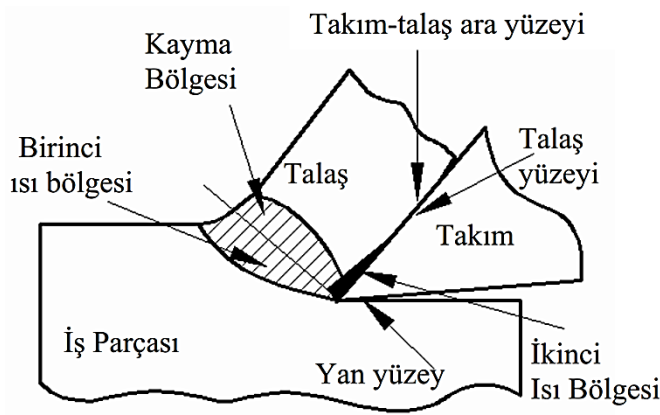
Lacelle ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Haynes 25 ve Inconel 718 gibi işlenebilirliği zor ısıya dirençli süper alaşımların Plazma Destekli Frezeleme (PDF) yöntemi adı verilen uygulamayla malzemenin ısıtarak frezelenmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneylerde TiAlN kaplamalı karbür uçlar kullanılmıştır. PDF yönteminden önce işleme parametreleri olarak 1 mm'lik kesme derinliği ve 20 m/min'lik kesme hızı kullanılmış ve 500 mm'lik frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. PDF yöntemi kullanılarak yapılan frezeleme işleminde ise kesme hızı 70 m/min'e çıkarılmış takım aşınması, kesme kuvveti ve malzemenin yapısındaki değişiklikler gözlenmiştir. Sonuç olarak PDF yönteminden önce 20 m/min'lik kesme hızı %350 artırılarak 70 m/min'e çıkarıldığında herhangi bir olumsuz sonuç oluşmamıştır. Frezeleme esnasında kesme kuvvetlerinin %25 azaldığı, 0,5 mm olan takım aşınmasının 0,1 mm ye düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca PDF yardımıyla yapılan işlemenin, malzemenin yapısında olumlu değişiklikler doğurduğu ortaya çıkmıştır. PDF pahalı bir uygulama olmasına rağmen takım ömründeki artışın yeterli düzeyde olmadığı belirtilmiştir [17].

Aykut ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bir kobalt esaslı süper alaşım olan Stellite 6 süper alaşımının kaplamalı ve kaplamasız takımlar kullanarak frezede işlenebilirliğini deneysel olarak araştırmış ve takım aşınması, kesme kuvvetleri ve talaş formundaki değişiklikleri gözlemlemiştir. 0,25 mm; 0,50 mm ve 0,75 mm talaş derinliklerinde, 60, 70, 80, 90 ve 100 mm/min ilerleme hızlarında, 30, 35 ve 40 m/min'lik kesme hızı değerlerinde TiN/TiCN/TiAlC kaplamalı F40M takım ile kaplamasız H25 takımları kullanmıştır. Sonuç olarak; kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlarda aşınma miktarının kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği parametrelerine bağlı olduğu, ilerleme oranı ve talaş derinliği arttıkça kesme kuvvetinin de arttığı belirtilmiştir. Ayrıca talaş şeklinin kaplamalı ve kaplamasız takımlara göre farklı kesme şartlarında değişiklik gösterdiği görülmüştür [18, 19].

Benghersallah ve diğerleri Stellite 6 kobalt esaslı süper alaşımın SANDVIK üretici firmasına ait 1030, H13A, 3040, 4240 ve 4030 kalitesine sahip kare kesici uçlarla frezede işlenebilirliğini araştırmışlardır. Sonuç olarak süper alaşımın işlenebilirliğinin imkânsız olmadığı fakat zor olduğunu belirtmişlerdir. Kesici uçların aşınma miktarının 0,3 mm'ye ulaştığında işleme zamanlarının karşılaştırılması yapılmış ve en iyi sonucu veren kesicilerin H13A ve 1030 kalitesine sahip uçlar olduğu görülmüştür. Bu iki kalitenin karşılaştırılması yapıldığında ise; gerek 120 m/min'lik, gerekse 190 m/min'lik kesme hızında kaplamasız karbür uç olan H13A kalitesinin daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir [20].

2.2. Soğutma/Yağlama Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde soğutma yöntemleri üzerine yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir. Talaşlı imalatta kesici uç, iş parçası yüzeyinden talaş kaldırırken iç ve dış sürtünmelerden dolayı oluşan ısı, talaş kaldırma mekanizmasını ve takım ömrünü etkileyen önemli faktörlerden biridir [21, 22]. Talaş kaldırma sırasında sarf edilen enerjinin tamamına yakını ısıya dönüşür. Bu sebeple kesme bölgesinde oluşan ısı; takım ömrü, kesme kuvvetleri, talaş biçimi ve iş parçası yüzey kalitesi bakımından önemlidir [22, 23].

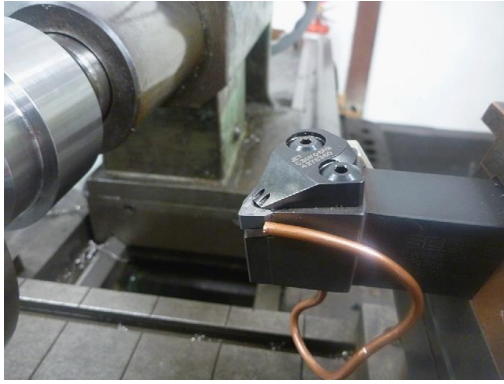


Şekil 2.2. Dikey kesme modeliyle tornalamada ısı oluşumu [24]

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi kesme sırasında meydana gelen plastik deformasyon sonucu açığa çıkan enerji ısı enerjisine dönüşmektedir [24]. Tornalama sırasında kesici kenar bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar takım ömrü ve takım-talaş yüzeyindeki sürtünme üzerinde etkili olmaktadır [25]. Kesme bölgesinde oluşan büyük miktardaki ısı, kesici takımın termal iletkenliğine bağlı olarak kesici takıma taşınmaktadır. Fakat

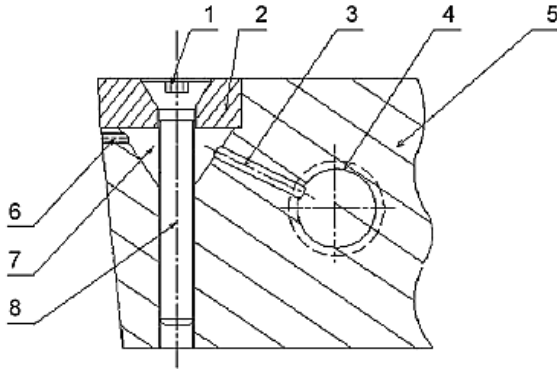
kullanılan takımın yapısal özellikleri ve soğutma metodunun türü bu iletkenliği azaltarak takıma geçen ısıyı da azaltmaktadır [26]. Yapılan deneysel çalışmalarda, kesme bölgesindeki sıcaklığın az da olsa düşürülmesi, takım ömrünün arttırılmasına büyük katkılar sağlamıştır.

Bermingham ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının sabit kesme hızı (125 m/min), sabit talaş hacmi ($\approx 48,6 \text{ Cm}^3/\text{min}$), 0,36; 0,20 ve 0,15 mm/rev ilerleme oranı ve 1,1; 2 ve 2,7 mm kesme derinliği parametrelerinde; kuru ve kriyojenik soğutma şartlarının takım ömrü, kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Soğutma düzeneği Şekil 2.3’de görülen sistemde kriyojenik soğutucu olarak sıvı Azot (N_2) kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda kriyojenik soğutma sistemi kullanıldığında, takım ömrünün, uygun kesme parametrelerinin seçimi ile kuru kesme şartlarına göre ortalama %50 oranında arttığı tespit edilmiştir. Kesme kuvveti sonuçlarında çok fazla değişiklik görülmemesine rağmen, soğutucu düzeneğin aynı zamanda kesme sırasında talaş kırıcı görevi gördüğü ve talaş şeklinin de değiştiği gözlenmiştir [27, 28].



Şekil 2.3. Nozul yardımıyla kriyojenik soğutma [27, 28]

Khan ve Ahmed, AISI 304 paslanmaz çeliğinin farklı kesme parametreleri ile geleneksel ve kriyojenik soğutma şartları altında işlenmesinde takım ömründe meydana gelen gelişmeleri araştırmışlardır. Çalışmada kriyojenik soğutma için sıvı Nitrojen kullanılmıştır. Bu gazın soğutma etkisinin kesme bölgesine daha etkili tesir etmesi için kater içerisine delikler delinmiştir. Sıvı azot bu delikler içerisinden geçirilerek soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Kesici takım içinden geçen kanallar ile kriyojenik soğutma [29]

Çalışmanın sonucunda kriyojenik soğutma şartları altında takım ömrünün geleneksel soğutma koşullarına göre 4 kat daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Kriyojenik soğutmanın yüksek kesme hızlarında etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca kriyojenik soğutma ile büyük kesme derinliklerine oranla yüksek ilerleme hızlarında daha iyi sonuç alındığı belirtilmiştir [29].

Özçatalbaş ve arkadaşları tornalamada hava püskürtme ile soğutmanın kesme kuvvetleri ve takım ömrüne olan etkilerini araştırmışlardır. Normalizasyon ısıtma işlemi uygulanmış SAE 1050 çeliğinin tornalanması sırasında uygulanan basınçlı havanın kesme kuvvetlerine, takım ömrüne ve takım/talaş ara yüzey sıcaklığına etkileri kuru işleme ortamı ile kıyaslanmıştır. Uygulanan yöntem kesme kuvvetlerini, takım/talaş ara yüzey sıcaklığını ve takım aşınmasını önemli ölçüde azaltmıştır [30].

Nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımı, PVD kaplamalı karbür kesiciler ve seramik kesicilerle farklı kesme parametreleri ve geleneksel soğutma, basınçlı su ile soğutma ve basınçlı hava ile soğutma (11 MPa, 15 MPa, 20,3 MPa) şartları altında işlenebilirliği torna tezgâhında talaş kaldırılarak araştırılmıştır. Deney çıktı parametresi olarak uç aşınması, kesme kuvveti ve takım ömrü sonuçları analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda; 11 MPa soğutma basıncında ve 60 m/min kesme hızında takım ömrü geleneksel soğutmaya göre %349 oranında artmıştır. Soğutma yöntemlerine göre takım aşınması değişimleri yüksek kesme hızlarında daha belirgin ortaya çıkmıştır. En iyi yüzey pürüzlülük sonucuna 60 m/min kesme hızı, 0,1 mm/rev ilerleme ve 11 MPa hava soğutma basıncında ulaşılmıştır. Kesme kuvveti sonuçları ise işleme şartlarına göre değişkenlik göstermiştir [31-33].

Machai ve Biermann, Ti-10V-2Fe-3Al titanyum alaşımını su soğuma ve kriyojenik soğutma şartları altında ve farklı kesme parametrelerinde tornalamışlardır. Kriyojenik soğutma işleminde sıvı karbondioksit (CO_2) gazı kullanılmıştır. Talaş kaldırma esnasında soğutma gazını bir nozul yardımıyla kesme bölgesine göndermişlerdir. Karbondioksit gazı ile kriyojenik soğutma altında talaş kaldırma işlemlerinde takım aşınma miktarı daha az oluşmuş ve daha iyi kalitede yüzey pürüzlülüğü sonuçları elde edilmiştir [34].

Kumar ve Choudhury, deney tasarım metodu kullanarak paslanmaz çeliğın farklı kesme şartlarında torna tezgâhında işlenmesi esnasında takım aşınması ve kesme kuvvetinde meydana gelen değişiklikleri araştırmışlardır. Talaş kaldırma esnasında kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürmek için takım-talaş ara yüzeyine basınçlı hava ile Nitrojen gazı püskürtmüşlerdir. Deneyisel çalışma neticesinde yanak aşınma miktarı, kuru kesme şartlarına kıyasla %37,39 oranında daha az oluşmuştur. Ayrıca bu soğutma yönteminin yüksek kesme hızlarında daha ekonomik ve verimli olduğu tespit edilmiştir [35].

Yüksek kesme hızlarında talaş kaldırırken oluşan aşırı sıcaklıklar sadece takım ömrünü sınırlandırmakla kalmamakta aynı zamanda işlenen yüzeyin yapısal özelliklerine de etki etmektedir. Bu problemler ancak kesme bölgesindeki sıcaklığın düşürülmesiyle kontrol altına alınmaktadır. Geleneksel soğutma yöntemi bu sıcaklıkların düşürülmesinde çok fazla etkili olamamıştır. AISI 1045 çeliğın torna tezgâhında işlenmesinde kesme bölgesindeki sıcaklığın düşürülmesi için kriyojenik karbon dioksit (CO_2) gazı kullanılmıştır. Bu gaz bulunduğu tüp den takım/talaş ara yüzeyine esnek bir boru ve nozul yardımıyla nüfuz ettirilmiştir. Yapılan deneyisel çalışma neticesinde kesme bölgesindeki sıcaklığın geleneksel soğutma yöntemi ile karşılaştırıldığında %5 ile %22 arasında daha az oluştuğu görülmüştür. Ayrıca yüzey kalitesi de ıslak kesme koşullarında işlemeye göre %5 ile %25 arasında arttığı tespit edilmiştir [36].

Süper alaşımlar mühendislik ve biyomedikal uygulamalarında sıklıkla tercih edilmesine rağmen bu malzemelerin özğün karakteristiklerinden dolayı talaş kaldırma işlemlerinde kısa takım ömrü ve yüksek sıcaklık gibi sürekli problemlerle karşılaşılmaktadır. Titanyum alaşımlarının tornalanmasında geleneksel ya da düşük basınçlı soğutma yöntemlerinin yerine takım-talaş temas yüzeyine düşük oranlarda kesme yağı ilavesi ile yüksek basınçta soğutma yöntemi ya da Azot (N_2) gazı uygulandığında talaş formu, talaşın kırılabilirliği,

kesme kuvveti, yüzey kalitesi, sürtünme katsayısı ve takım ömrü üzerinde olumlu gelişmeler gözlenmiştir [37-39].

Son yıllarda her üretim alanında olduğu gibi talaş kaldırma işlemlerinde de ekolojik denge ön plana çıkmaktadır. Kesme anında kullanılan yağlar ve soğutma sıvıları her geçen gün önemini yitirmektedir. Basınçlı hava soğutma sistemi ya da su buharı yardımıyla soğutma yöntemlerinin düşük maliyeti ve çevresel özelliklerinden dolayı alternatif soğutma yöntemleri olmuştur. Liu ve diğerleri bu bilgiler ışında C45 çeliğinden torna tezgâhında; 85,6 m/min kesme hızı, 0,15 mm/rev ilerleme, 0,15; 1,5; 2,5 ve 3,5 mm kesme derinliği parametrelerinde ve kuru, su buharı jeti, basınçlı hava ve yağ-su karışımı soğutma tekniklerini kullanarak talaş kaldırmıştır. Deneysel çalışma sonucunda kesme kuvveti, sürtünme katsayısı, talaş deformasyon katsayısı, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını incelemişlerdir. Yapılan değerlendirmelerde başta kesme bölgesi sıcaklığı olmak üzere tüm deney sonuçlarında su buharı jeti ve basınçlı hava soğutma sistemi kullanıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [38].

Kaba tornalamada ya da sert parçaların tornalanması süreçlerinde gösterilen ilgi ve dikkat normal tornalama işlemlerine nazaran daha da fazladır. Bu işlemlerde özellikle sert parçaların tornalanmasında kesme sıvısı kullanılarak bu işlemler daha basit hale getirilmektedir. Kesme bölgesine minimum miktarda kesme sıvısı püskürtme yöntemi bu işlemleri daha da basitleştirmek için yeni bir strateji olarak karşımıza çıkmıştır [40, 41]. 35 HRC sertliğindeki AISI 4340 çeliğinin üzerinden farklı kesme parametrelerinde ve kesme bölgesine nozul yardımıyla 5 MPa ve 10 Mpa basınçta minimum miktarda kesme sıvısı püskürtmek suretiyle torna tezgâhında talaş kaldırılmıştır. Deneyler esnasında kesme kuvveti ve kesme bölgesindeki sıcaklıklar ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda kesme bölgesine minimum miktarda yağ püskürtülerek yapılan talaş kaldırma işleminde ıslak ve kuru kesmeye göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [42]. Bu yöntemde başta nozul basıncı ve kesme sıvısı olmak üzere kesme parametrelerinin seçimine de dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Talaşlı imalat sırasında ısıdan kaynaklanan olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve imalatı kolaylaştırmak için son yıllarda kullanılan teknoloji ise, sentetik kimyasal katkıları içeren çözülebilir soğutucu sıvılardır [43]. Ancak, doğada yok edilmesi çok zor olan olan bu sıvıların çevreye ve insan sağlığına önemli zararları mevcuttur. Atıkların yok edilmesi ise büyük maliyetler getirmektedir. Çevre sağlığı ve mali kaynak problemleri sebebiyle, son

yılların en önemli araştırma konuları, daha az kimyasal madde içeren alternatif soğutma yöntemleri olmuştur [43-45]. Özellikle de takım ömrünü artırmak amacıyla ilk uygulamalarda soğutma sıvısı olarak CO₂ kullanılırken, bu gazın kullanımında büyük hacimli tankların bulunma zorunluluğu ve soğutucu elemanın kontrolünün problemli oluşu gibi sebeplerden dolayı N₂ gazı kullanımı artmıştır [21, 46, 47]. Yapılan çalışmalarda takım/talaş ara yüzeyinin ve talaşın sıcaklığının düşürülmesinde, püskürterek soğutma yönteminin ısı taşıma kapasitesinin sıvı soğutma yönteminden daha üstün olduğu tespit edilmiştir. Hava ile birlikte bir miktar bitkisel yağın yüksek basınçlarda ara yüzeye püskürtülmesiyle talaş kaldırmada önemli avantajlar sağlanmıştır [43]. Çevre kirliliğine yol açmaması, sağlık açısından tehlike arz etmemesi gibi avantajları, sanayicilerin çevre koruma kanunlarına uyma zorunluluğu ve mesleki güvenlik kurallarının yerine getirilmesi bakımından, soğutmada natürel yöntemlerin geliştirilmesi günümüzün önemli araştırma konularındandır [30].

Üretim süresi düşmesine rağmen kriyojenik soğutma ve yüksek basınçlı su soğutma teknikleri ile takım ömrünün arttırılması imalat sanayisini umutlandırmıştır. Birçok araştırmacı bu soğutma tekniklerinin yararlarından bahsetmiştir. Ti-6Al-4V titanyum alaşımı; soğutmasız, kriyojenik soğutma ve yüksek basınçlı su soğutma şartları altında torna tezgâhında işlenmiştir. Deney düzeneği Şekil 2.5’de görülen kriyojenik soğutma için 8 bar basınçta sıvı Nitrojen kullanılmıştır. Su bazlı soğutma yağı ise, takım-talaş ara yüzeyine 100 bar basınçta uygulanmıştır. Yüksek basınçta su bazlı soğutma şartlarında, kuru işleme ve kriyojenik işlemeye göre daha iyi takım ömrü sonuçları elde edilmiştir. Yapılan çalışmada, soğutma şartları altında takım ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden birinin de sıvı akışını takım-talaş ara yüzeyine ileten nozulun pozisyonu olduğu belirtilmiştir [48].

Haq ve Tamizharasan, kesici uçta oluşan sıcaklık ve buna bağlı olarak takımda oluşan aşınmayı düşürmek için ısı borusuyla soğutma yöntemini araştırmışlardır. Çalışmada pirinç, bakır ve çelik olmak üzere 3 farklı ısı borusu kullanmışlardır. Isı borusu kullanılarak yapılan soğutma takım aşınmasını düşürmüştür. Yapılan ölçümler ve analizlerde uç kısımda oluşan sıcaklığın ısı borusuz ortalama 748 °C, ısı borusu kullandığında ise 715 °C’ye düştüğü görülmüştür [49].



Şekil 2.5. Kriyojenik soğutma deney düzeneği [48]

Günümüzde imalat endüstrisinde yüksek üretim miktarı ve kalite arzulanmaktadır. Bunu başarmak ancak kesme hızı ve ilerleme oranını arttırmakla mümkün olmaktadır. Fakat kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar; takım ömrü, yüzey kalitesi ve ölçüsel hataları etkilediği için üretim faktörlerine sınırlandırmalar getirmektedir. Ayrıca dayanım, sertlik, aşınma direnci, kesici takım gibi özellikler de verim üzerinde etkilidir. Bu yüzden verimi arttırmak için optimum kesme şartlarının (kesme hızı, ilerleme oranı, kesici takım geometrisi, kesici takım kalitesi, kesme derinliği) belirlenmesi gerekmektedir. Kesme sıvılarının soğutma ve yağlama özellikleri, kesme bölgesi sıcaklıkları ve kesici uç aşınması gibi işleme problemlerini en aza indirmek için iyi bir yol olarak bilinmektedir.

Silva ve diğerleri, AISI 1047 kalitedeki çeliği işlerken soğutucu yöntem olarak bir hazne içerisinde bulunan kesme yağının basınçlı hava ile belli miktarlarda karışımını sağlayarak nozul yardımıyla takıma püskürtmüşlerdir. Bu sistem takım ömrü ve yüzey kalitesini olumlu etkilediği gibi talaşın daha kolay kırılmasına da yardımcı olmuştur [50].

Soğutma sıvılarının talaş kaldırma operasyonlarında büyük katkısı vardır, ancak; bu sıvıların çevresel etkileri de dikkate alınmalıdır. Talaş kaldırma işlemlerinde bu sıvılara alternatif olarak çevresel soğutucuların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bilgiler ışığında, Stanford ve diğerleri; karbon çeliği üzerinden torna tezgâhında talaş kaldırma işlemlerinde farklı soğutma tekniklerinin takım ömrü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada soğutma tekniği olarak Azot gazı (N_2), sıvı Azot (LN_2) ve geleneksel soğutma yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, sıvı Azot kullanılarak yapılan talaş kaldırma işlemlerinde yatak aşınmasının geleneksel soğutma yöntemine göre %55 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu tekniğin çevre kirliliğine neden olmadığı ve daha

işlemişlerdir (Şekil 2.6). Deneyler sonucunda bu yöntemin geleneksel soğutma yöntemine göre takım talaş ara yüzey sıcaklığını %10 oranında daha da azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca bu yöntemin yüzey pürüzlülüğünün ve takım aşınma miktarını daha da düşürdüğü vurgulanmıştır [58].

Zhang ve Wang yaptıkları çalışmada; Inconel 718 süper alaşımını kuru işleme şartlarında ve minimum miktarda kesme yağı kullanarak freze tezgâhında işlemişlerdir. Deney sonuçlarında; MMS soğutma yöntemiyle yapılan deneylerde takım ömrünün 1,57 kat arttığı, kesme kuvvetlerinin ise önemli oranda azaldığı görülmüştür [59].

Lawal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; işleme süreçlerinde yağlama tekniklerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda; MMS yönteminin kullanımı ile yüzey pürüzlülüğü kuru işleme ve geleneksel soğutma yöntemine nazaran %31,6 oranında daha az oluşmuştur. Kesme kuvvetleri ise %19 ile %27 oranları arasında daha az meydana gelmiştir. Ayrıca kesici uç yan yüzeyinin de ilerleme hızına bağlı olarak %54,59 ile %67,65 arasında daha az aşındığı belirtilmiştir [60].

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan soğutma sıvılarının, iyi yüzey kalitesi ve boyut tamlığında parça imalatı için büyük önemi vardır. Soğutma sıvılarının fiziksel ve kimyasal özellikleri; imalat işlemi sırasında ortaya çıkan ısı ve mekanik sebepli hasarların azaltılmasını veya önlenmesini sağlar. Soğutma/yağlama maddeleri, doğru kullanıldıkları takdirde, bir yandan iş parçasının boyutları ve biçiminde yüksek hassasiyet ve daha iyi yüzey kalitesi sağlarken, öte yandan takımlar için daha uzun kullanım ömrü elde edilir. Talaşlı imalat, kesme sıvıları soğutma, yağlama ve temizleme gibi olumlu etkileri nedeniyle hala çok önemli bir yer tutmaktadırlar. Ancak bunlar çevre ve insanlar için bir tehlike potansiyeli doğurmakta ve imha edilmeleri, devamlı artan masraflara neden olmaktadır [61, 62].

Önemli fonksiyonlarına rağmen talaşlı imalat çalışmalarında kesme sıvısı kullanımını azaltmak için yoğun uğraşlar verilmektedir. Rahman ve diğerleri, 35 HRC sertliğindeki ASSAB 718 HH çeliğini minimum miktarda yağ (8,5 ml/h akış oranı) ve normal oranda yağ (42000 ml/dk akış oranı) kullanarak frezede işlemişlerdir. Kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, talaş şekli ve EDX analizleri MMS tekniğinin düşük kesme hızı, ilerleme

oranı ve kesme derinliğinde ekonomik ve çevreye olan etkisi bakımından dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur [63].

Lacelle ve diğerleri, 5083-H112 (%4,5 Mg, %0,1 Cr, %0,4 max Fe, %0,4 max Si) alüminyum alaşımını 12 mm çapında HSS parmak freze çakısı ile farklı yağ akış debileri ve farklı açılardaki nozul pozisyonlarında MMS tekniği ile frezelemişlerdir. Sonuç olarak, yüksek hızda frezelemede, emülsiyon soğutma yönteminde, sıvının kesici dişlere tam anlamıyla temas etmemesinden dolayı bu yöntemin yetersiz olduğu belirlenmiştir. MMS yönteminde yağ oranının %95 oranında azaltılmasına rağmen geleneksel soğutmaya göre oldukça verimli olduğu bulunmuştur. Ayrıca MMS tekniğinin verimliliğini arttırmak için nozul pozisyonun ilerleme yönüne göre ayarlanmasının oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır [64].

Günümüzde, insan sağlığı, çevresel etkiler ve endüstriyel atıklar ile ilgili ciddi yasalar nedeniyle kesme sıvılarının yoğun kullanımı sorgulanmaktadır. Dolayısıyla imalat sanayi, üretim süreçlerini yeniden gözden geçirmek zorundadır. Diniz ve arkadaşları, AISI 52100 çeliğini kuru kesme, geleneksel soğutma ve minimum miktarda kesme yağı (10 ml/h akış oranı) şartları altında CBN takımlar ile torna tezgâhında işlemişlerdir. Bu çalışmada kesme parametreleri olarak, 110, 130, 150, 175 m/min kesme hızı, 0,08 mm/rev sabit ilerleme ve 0,3 mm sabit kesme derinliği kullanılmıştır. Sonuç olarak, kesici uç yanak aşınması değerleri karşılaştırıldığında; geleneksel soğutma yönteminin kuru işleme ve MMS yöntemine göre daha etkisiz olduğu tespit edilmiştir [65].

Kishawy ve arkadaşları, otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum A356 alaşımını farklı soğutma stratejileri kullanarak yüksek hızda frezelemişlerdir. Deneysel çalışmada, geleneksel soğutma, kuru işleme ve MMS soğutma/yağlama tekniğinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak, MMS yönteminin kuru işleme ve geleneksel soğutma yöntemiyle karşılaştırıldığında alternatif bir işleme yöntemi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, abraziv aşınma ve adheziv aşınma mekanizmaları sonucunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bunların azaltılmasında yağlayıcının önemli bir rolü olduğu vurgulanmıştır [66]. Itoigawa ve diğerleri, alüminyum alaşımının tornalanması esnasında minimum oranda kullanılan kesme yağının kesme kuvveti ve takım aşınması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, MMS

yönteminin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin yetersiz olduğu, ancak takım aşınması üzerindeki etkisinin olumlu olduğu bulunmuştur [67].

Ezugwu ve diğerleri, Ti-6Al-4V alaşımının, geleneksel soğutma ve yüksek basınçlı hava ile soğutma şartları altında PCD kesici takımlarla tornalanmasında kesici takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, belirlenen kesme koşulları altında ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü değerleri 1,6 μm 'nin altında oluşmuştur [68].

Endüstriciler ve araştırmacılar, yoğun bir şekilde kullanılan kesme yağlarının hem çevresel etkilerini azaltmak hem de ekonomiye katkı sağlamak için bir takım yöntemler denemektedirler. Bu amaca ulaşmak için Attanasio ve arkadaşları, tornalama işlemlerinde takım aşınmasını azaltmak için minimum miktarda kesme yağı kullanmışlardır. Ayrıca bu çalışmada nozul pozisyonu kesici takıma göre yan ve ön olmak üzere iki farklı şekilde ayarlanmıştır. Sonuç olarak, MMS yönteminin en büyük avantajının kullanılan kesme yağının azaltılması olduğu belirlenmiştir. MMS sisteminde kesme kenarı boyunca ayarlanan nozul pozisyonunun takım aşınmasını azalttığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra talaş açısı boyunca ayarlanan nozul pozisyonunun kesici uç aşınmasını azalttığına dair herhangi bir sonuç bulunmamıştır [69].

Bruni ve diğerleri, AISI 420 B paslanmaz çeliğin kuru işleme, geleneksel ıslak kesme ve minimum oranda kesme yağı ile işleme koşulları altında tornalanması esnasında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması değerlerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, MMS tekniğinin kuru işleme ile karşılaştırıldığında takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından herhangi bir avantajının olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri ıslak kesme işlemlerinde elde edilmiştir [70].

Hüseyinoğlu yaptığı araştırmada, 7075 alüminyum alaşımı minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametrelerinin etkisi deneysel olarak incelemiştir. Minimum soğutma sıvısı ile işlemede kesme sıvısı pülverize olarak iş parçası ile kesici takım arasına gönderilmiştir. Sonuç olarak; deneylerde ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı, fakat devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak karbür takımlarla yapılan deneylerde TiN ve HSS takımlara göre daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir [71].

Chiffre ve diğerleri östenitik paslanmaz çeliğe torna tezgâhında kanal açma ve vida çekme işlemlerinde kesme sıvısı olarak kriyojenik CO₂ gazı kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda sıvı CO₂ gazının kesme sıvısı olarak kullanıldığında herhangi bir problem oluşturmadığı ve tornalama işlemlerinde genellikle kullanılan su bazlı soğutma sıvılarına alternatif olabileceği belirtilmiştir [72].

Umrello ve diğerleri, sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğinin CBN kesici takımlarla kuru ve kriyojenik şartlar altında tornalanmasında işlenmiş yüzeyleri analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonucu göstermiştir ki; sert tornalama işlemlerinde üretimin kalitesini arttırmak için kriyojenik soğutma yöntemi oldukça faydalıdır [73, 74].

Talaş kaldırma işlemlerinde soğutma uygulamalarının önemli bir rolü vardır. Doğru tercih edilen bir soğutma uygulaması kesme süreçlerinde takım ömrünü ve ölçüsel tamlığı arttırırken, kesme sıcaklıkları, yüzey pürüzlülüğü ve tüketilen güç miktarını azaltmaktadır. Talaş kaldırma operasyonlarında yapılan bir çalışmada, soğutucu olarak sıvı nitrojen kullanıldığında kesici takım ve iş parçası malzemesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, takım ömrü ve yüzey kalitesini arttırmak ve kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürmek için kriyojenik soğutmanın etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir [75].

Titanyum alaşımlarının işlenmesi esnasında kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların bir sonucu olarak oluşan yüksek takım aşınması neticesinde işleme verimliliği olumsuz olarak etkilenmektedir. Bu alaşımların işlenmesinde kullanılan geleneksel kesme yağlarının kesme bölgesindeki sıcaklığın kontrol edilmesinde etkisiz olduğu bilinmektedir. Yapılan bir çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımı, içerisine sıvı azot geçiş kanalları açılan kesici uçlar ile kriyojenik soğutma koşulları altında tornalanmıştır. Düzenlenmiş kesici uçlar kullanılarak kriyojenik soğutmada oluşan kesme sıcaklığı, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması sonuçları ıslak kesme koşullarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, kriyojenik soğutma yöntemi geleneksel soğutma yöntemine göre kesme sıcaklığını %61-%66 arasında, yüzey pürüzlülüğünü %36 oranında düşürmüştür. Kesme kuvveti %35-%42 oranında daha az oluşurken, yanak aşınma miktarı ise %27-%39 oranında düşmüştür. Modifiye edilmiş kesici uçlar ile kriyojenik soğutmanın geleneksel işlemeye göre oldukça verimli olduğu belirlenmiştir [76].

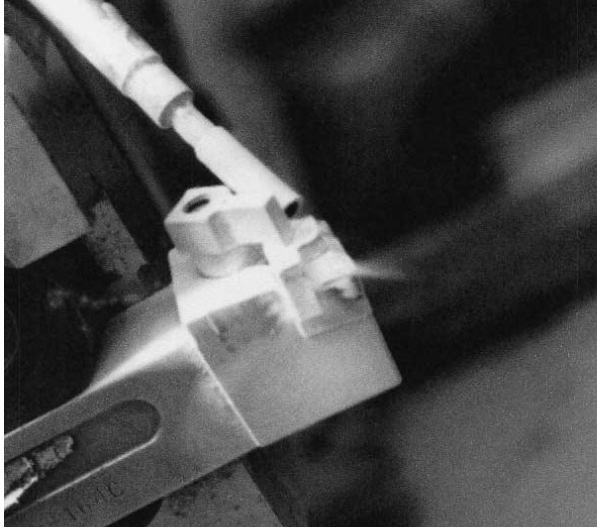
Talaş kaldırma işlemlerinde kullanılan geleneksel soğutma yöntemleri hem kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı kontrol etmesindeki eksikliği hem de çevreye olan zararlı etkileri nedeniyle her geçen gün sorgulanmaktadır. Bu bilgilerden yola çıkarak, Ravi ve Kumar; AISI H13 takım çeliğinin işlenebilirliğini 75-125 m/min kesme hızı ve sabit ilerleme oranında, PVD kaplamalı TiAlN kaplamalı karbür uçlarla, sıvı nitrojen (LN_2) kullanarak kriyojenik soğutma koşullarında araştırmışlardır. Sonuç olarak; LN_2 kullanarak yapılan işleme koşullarında elde edilen sonuçlar kuru ve ıslak işleme şartları altında elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında kriyojenik soğutmada daha düşük yanak aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti elde edilmiştir. Kriyojenik soğutma altında yapılan frezelemede; kesme sıcaklığı %57-60 arasında, yanak aşınması %29-34 ve %10-12 arasında, yüzey pürüzlülüğü %33-40 ve %25-29 arasında azaltılmıştır. Ayrıca frezelemede oluşan kesme kuvvetleri de kısmen azaltılmıştır [77].

Yong ve diğerleri, düşük karbonlu AISI 1008 çeliğinin işlenmesinde talaşın kırılabilirliğini geliştirmek için sıvı LN_2 gazı ile kriyojenik soğutma sistemi kullanmışlardır. Yapılan çalışmanın neticesinde; talaşın kırılabilirliğinin kriyojenik soğutma ile artırılabilceği sonucu elde edilmiştir. Ayrıca LN_2 kullanımı ve ilerleme hız aralığının doğru seçimi ile talaş şeklinin istenen düzeyde olabileceği vurgulanmıştır [78].

Çeliklerin yüksek hızda işlenmesinde doğal olarak yüksek kesme sıcaklıkları oluşur ve bu sıcaklıklar hem takım ömrünü azaltır hem de ürün kalitesini bozar. Geleneksel kesme sıvıları yüksek kesme sıcaklıkları ve hızlı takım aşınmasının kontrol edilmesinde etkisiz kalmaktadır. Yapılan deneysel bir çalışmada, Paul ve arkadaşları; AISI 1060 çeliğini sıvı nitrojen ile kriyojenik soğutma şartları altında tornalamışlardır. Deneylerde; kesme hızı ve ilerleme hızının çeşitli kombinasyonları ile iki farklı karbür kesici uç kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, kriyojenik soğutmanın takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur [79].

Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işlenmesinde takım ömrünün kısa olmasından dolayı bu malzemenin kriyojenik soğutma koşulları altında işlenebilirliğinin araştırılması önemli bir konu haline gelmiştir. Ancak daha önce yapılan çalışmalarda bu yöntem hakkında belirtilen bazı eksiklikler göz önünde bulundurularak Hong ve diğerleri Ti-6Al-4V titanyum alaşımını minimum oranda sıvı nitrojen kullanarak özel tasarlanmış nozul yardımıyla işlemişlerdir (Şekil 2.7). Sonuç olarak, LN_2 kullanımı ile takım üzerinde gereksiz bölgelere

yapılan soğutma azaltılmıştır. Ayrıca bu yöntem diğer soğutma yöntemleri ile karşılaştırıldığında en iyi takım ömrü sonucunu vermiştir [80-81].



Şekil 2.7. Kriyojenik soğutma [80, 81]

Dhar ve Kamruzzaman AISI 4037 çeliğinin kriyojenik soğutma şartları altında tornalanmasında oluşan kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve ölçüsel sapmaları araştırmışlardır. Kuru ve geleneksel soğutma şartlarında yapılan işleme ile sıvı nitrojen kullanılarak yapılan kriyojenik soğutma şartlarında elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında daha az takım aşınması, daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve yüksek ölçüsel tamlik sağlanmıştır [82].

Kriyojenik işleme teknolojisi, kaynak tüketiminin azaltılması, daha az atık oluşturularak işleme maliyetlerinin düşürülmesi ve rekabet gücünü arttırılabilmesi için sürdürülebilir bir işleme teknolojisi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda Pusavec ve Kopac; nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımını kriyojenik şartlar altında işlemişlerdir. Bu çalışmanın sonucu, işleme maliyetlerini azaltarak toplam üretim maliyetlerine katkı sağlaması bakımından kriyojenik işlemenin sürdürülebilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur [83, 84].

Inconel 718 üstün mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde nikel alaşımları içerisinde en sık kullanılan ve işlenebilirliği zor ve maliyetli olan bir süper alaşımdır. Shokrani ve diğerleri, Inconel 718 süper alaşımını TiAlN kaplamalı karbür takımlar kullanarak

kriyojenik soğutma koşullarda frezelemişlerdir. Deneysel araştırmanın sonucu kriyojenik işlemenin kuru işleme ile karşılaştırıldığında güç tüketimini arttırmadan işlenmiş parçaların yüzey kalitesini arttırdığı saptanmıştır [85].

Jerold ve Kumar, AISI 316 paslanmaz çeliğini sıvı CO₂ gazı kullanarak kriyojenik soğutma ile tormalanması sırasında oluşan kesici takım aşınmasını, işlenen yüzeylerin pürüzlülüğünü, kesme sıcaklığını ve talaş morfolojisini, kuru işleme ve geleneksel soğutma koşulları altında yapılan işleme koşulları ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, sıvı CO₂ gazı kullanılarak yapılan işlemede kesme sıcaklığı %35 oranında azaltılmıştır. Ayrıca takım aşınmasının azaltılmasıyla beraber işlenmiş yüzeylerin kalitesi %4 ile %52 aralığında arttırılmıştır [86].

Küresel endüstriyel eğilimler içerisinde ekonomik gerekçeler ile birlikte çevre ve sağlık dostu teknolojiler giderek artan bir öneme sahiptir. Temiz ve sağlığa daha az zararlı işleme süreçleri ile birlikte sürdürülebilir kalkınma fikri son yıllarda ortaya çıkmaktadır. Kriyojenik işleme bu amaca ulaşmak için alternatif bir yöntemdir. Tornalama, frezeleme, delme gibi kesme operasyonlarında kriyojenik işlemede kullanılan sıvı azot düşük üretim maliyeti ve yüksek verimliliği ile çevreci bir yöntem kesme sıvı olarak görünmektedir. Biçek ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğini kriyojenik şartlar altında tormalamışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, kriyojenik şartlar altında yapılan talaş kaldırma işleminde takım ömrü %370 oranında artmıştır [87].

Dhananchezian ve diğerleri, AISI 1045 çeliğini ve 6061-T6 alüminyum alaşımını kriyojenik soğutma şartları altında torna tezgâhında işlemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucunda, AISI 1045 çeliğinin kuru işlemeye göre kriyojenik işlemede kesme sıcaklığı %19-28 oranında, kesme kuvveti ise %15 oranında daha az oluşmuştur. 6061-T6 alüminyum alaşımının işlenmesinde ise kesme sıcaklığı %27-39 oranında, kesme kuvveti ise %10 oranında daha az oluşmuştur [88].

Ravi ve Kumar, AISI D3 çeliğini sıvı nitrojen kullanarak kriyojenik soğutma şartları altında TiN kaplamalı karbür uçlar kullanarak frezelemişlerdir. Deneysel çalışmada, 125 m/min sabit kesme hızı ve 0,01-0,02 mm/diş aralığında üç farklı ilerleme oranı kullanılmıştır. Kuru ve ıslak işlemeye göre sıvı nitrojen kullanılarak yapılan işlemede,

kesme sıcaklığı %43-48 ve %26-35 oranında, kesme kuvveti ise %40-50 ve %22-39 oranında daha az meydana gelmiştir [89].

Fratila ve Caizar, yaptıkları deneysel çalışmada $AlMg_3$ alüminyum alaşımını kuru, yağ-su emülsiyonu ve hava-yağ karışımı altında frezelemişlerdir. Deneylerde kesme parametreleri olarak, 0,5; 1 ve 1,5 mm kesme derinliği, 0,08; 0,12 ve 0,16 mm/diş ilerleme, 100,48; 150,72 ve 200,96 m/min kesme hızı kullanılmıştır. İşleme bölgesine pulverize bir şekilde hava-yağ karışımının gönderildiği kesme şartlarında yağ akış oranı 0; 0,03; ve 90 litre/saat alınmıştır. Temassız infrared sıcaklık ölçer kullanılarak yapılan ölçümlerde ortalama sıcaklık değerleri; emülsiyon işleme koşullarında 21,4 °C, hava-yağ karışımı altında 24,3 - 25,8 °C ve kuru işleme şartlarında ise 27,3 - 30,6 °C aralığında meydana gelmiştir. İşlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğü değerlendirildiğinde; minimum oranda yağ kullanarak işleme (0,03 l/h) ve normal oranda (90 l/h) yağ kullanarak işleme şartlarında benzer sonuçlar elde edilmiştir [90].

Minimum miktarda yağ kullanılarak yapılan işleme yöntemi, tornalama, frezeleme ve delme uygulamalarında olduğu gibi taşlamada da yoğun yağ kullanılarak yapılan işlemlere alternatif bir yöntem olmuştur. Nitekim Tawakoli ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada yağ akış oranı, hava basıncı, nozul pozisyonu ve nozulun kesme bölgesine olan uzaklığı parametrelerinin taşlama kuvvetleri ve taşlanan yüzeylerin pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, nozul pozisyonunun taşlama uygulamalarında önemli bir etken olduğu bulunmuştur. MMS nozul pozisyonunun iş parçası yüzeyine göre yaklaşık 10-20° arasındaki açılarda optimum sonuçlar elde edilmiştir [91-93].

Son yıllarda imalat sektöründe operatör ve çevre sağlığı öncelikle dikkate alınmakta ve çevreci üretimin önemi sürekli artmaktadır. Su buharı, oksijen ve karbondioksit gazı, su buharı-karbondioksit gazı, su buharı-oksijen gazı karışımı gibi soğutucular ve yağlayıcılar verimliliği arttırmak için tornalama operasyonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Liu ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, su buharı, gazlar, gaz-su buharı karışımı, yağ-su karışımı ve kuru kesme şartları altında AISI 1045 çeliğinden torna tezgâhında talaş kaldırmışlardır. Deneysel çalışmada P10 kalitede sementit karbür uçlar kullanılmış ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, talaş deformasyon katsayısı, talaş yüzeyi aşınması ve yanak aşınması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda

su buharı; gaz ve su buharı-gaz karışımı altında yapılan deneylerde ana kesme kuvveti kuru kesme ve ıslak kesme sonuçları ile karşılaştırıldığında daha az oluşmuştur. En düşük kesme sıcaklığı diğer soğutma/yağlama koşullarına göre su buharı altında yapılan deneylerde elde edilmiştir. Takım ömrü; kuru işleme ile karşılaştırıldığında su buharı ve su buharı-gaz karışımında daha fazla artmıştır [94].

Xavior ve Adithan yaptıkları çalışmada, AISI 304 paslanmaz çeliğinin karbür kesici takımlar ile farklı kesme yağları kullanılarak tornalanması esnasında yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınmasını araştırmışlardır. Deneysel çalışmada, Hindistan cevizi yağı, yağ-su emülsiyonu ve su ile karışmayan bir tip yağ olmak üzere üç farklı yağ kullanılmıştır. Sonuç olarak, Hindistan cevizi yağı kullanılarak yapılan talaş kaldırma işlemlerinde kullanılan diğer iki tip yağa göre daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve daha az takım aşınması elde edilmiştir. Ayrıca Talaş kaldırma operasyonlarında Hindistan cevizi yağının diğer bitkisel esaslı kesme yağlarına göre ısı ve oksidasyon kararlılığının daha iyi olmasından dolayı imalat sanayisinde kullanılabileceği vurgulanmıştır [95].

Yuan ve diğerleri, kuru işleme, geleneksel ıslak işleme, minimum miktarda kesme yağı (MMS) ile işleme ve soğutucu hava+minimum miktarda kesme yağı kullanılarak işleme şartları altında kaplamasız karbür kesici uçlar kullanarak Ti-6Al-4V alaşımının frezelenmesi sırasında oluşan kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve talaş morfolojisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda; soğutucu hava ile birlikte minimum miktarda yağ kullanımı kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünü önemli derecede düşürmüştür. Tek başına MMS kullanımının kesme performansı ve yanak aşınması üzerinde olumlu bir etkisine rastlanmamıştır. Soğutucu hava + MMS kullanımı ile yapılan deneylerde en iyi sonuçların -15 °C soğutucu hava ile birlikte MMS kullanımında elde edildiği tespit edilmiştir [96].

Fratila ve Caizar, AISI 1045 çeliğinin karbür kesicilerle tornalanmasında kesme parametrelerinin ve soğutma/yağlama şartlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneylerde kesme parametreleri olarak; 0,25; 0,5 ve 1 mm kesme derinliği, 0,196; 0,226 ve 0,306 mm/rev ilerleme ve 62, 90 ve 204 m/min kesme hızı seçilmiştir. MMS kesme şartları altında yapılan deneylerde 0; 0,066 ve 60 l/h yağ akış oranı kullanılmıştır. Deney sonuçları ise Design Expert yazılımı ve ANOVA tabloları ile değerlendirilmiştir. Sayısal ve grafiksel olarak sonuçlar değerlendirdiğinde, kesme

derinliğinin en düşük seviyesi, kesme hızı ve yağ akış oranının en yüksek seviyesinde en iyi yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir [97].

Li ve Liang yaptıkları deneysel çalışmada talaş kaldırma işlemlerinde MMS soğutma/yağlama tekniğinin mekanik ve çevresel etkileri araştırmışlardır. Sonuç olarak, MMS tekniği özellikle düşük kesme hızlarında teğetsel kesme kuvvetini azaltmıştır. Yüksek kesme hızı aralıklarında MMS ile yapılan talaş kaldırma işlemlerinde kuru işleme ile karşılaştırıldığında daha düşük takım aşınması oluşmuştur [98].

Ezugwu ve Bonney, nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımının geleneksel soğutma ve yüksek basınçlı soğutma koşulları altında tornada işlenebilirliğini araştırmışlardır. Deneylerde kesme parametreleri olarak, 20, 30 ve 50 m/min kesme hızı, 0,25 ve 0,3 mm/rev ilerleme ile 2,5 ve 3 mm kesme derinliği seçilmiştir. Yüksek basınç altında yapılan kesme operasyonlarında basınç seviyeleri 110, 150 ve 203 bara ayarlanmıştır. Sonuç olarak, yüksek basınç altında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü sonuçları önemli oranlarda artırılmıştır. Geleneksel soğutma yöntemi ile karşılaştırıldığında 203 bar basınç altında takım ömrü %740 oranında artmıştır. Basınç oranının artmasıyla takım ömrü de genellikle artmıştır. Ayrıca talaşın kırılabilirliğinin kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme oranının yanı sıra soğutma sıvısı basıncına da bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir [99-101].

Courbon ve diğerleri, nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımının yüksek basınçlı jet ile tornalanmasını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, yüzey cevap yöntemi deney tasarım tekniği olarak seçilmiştir. Tornalama işlemlerinde kaplamalı karbür kesiciler kullanılmıştır. Deney sonuçları regresyon analiziyle modellenmiştir. Jet yardımıyla yüksek basınçlı soğutma kullanılarak yapılan bu çalışma kesme kuvveti, talaş kırılabilirliği, yüzey pürüzlülüğü ve takım sıcaklığına yeni bir bakış açısı getirmiştir [102, 103].

Inada ve arkadaşları; elmas uçlu kesiciler kullanarak demir esaslı malzemelerin işlenmesi için yeni bir soğutucu önermişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmada sertleştirilmiş kalıp çelikleri ve yüksek alaşımlı karbon-krom çeliklerini karbon partikülleri ile iyonize soğutma şartları altında işlemişlerdir. Ayrıca bu soğutma yönteminin birinci kesme bölgesindeki malzeme yapısı ve takım-iş parçası arasındaki sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, iyonize soğutma yönteminin, elmas kesici takımlarla demir

esaslı malzemelerin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından kullanılabileceği önerilmiştir [104].

Marksberry ve Jawahir, sürdürülebilir üretim için kesme bölgesinde minimum miktarda kesme sıvısı kullanılarak yapılan talaş kaldırma işlemlerinde takım aşınması ve takım ömrü performanslarını modellemişlerdir. Sonuç olarak, işlenebilirlik deneyleri için geliştirilen matematiksel model sonuçlarının %10 hata aralığı içinde olduğu tespit edilmiştir [105].

Lacalle ve arkadaşları, havacılık endüstrisinde sıkça kullanılan alfa-beta tip Ti6Al4V titanyum alaşımı ve nikel esaslı inconel 718 süper alaşımının yüksek basınç altında soğutucu kullanarak tornalanması ve delinmesini araştırmışlardır. Sonuç olarak yüksek basınçlı su jeti kullanılarak yapılan deneylerde takım ömrünün iki kat arttığını tespit etmişlerdir [106]. An ve diğerleri, TC9 titanyum alaşımının yüksek basınçlı soğuk su buharı altında tornada işlenebilirliğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, yüksek basınçlı soğuk su buharı altında elde edilen sonuçların geleneksel soğutma/yağlama yöntemlerine göre daha iyi bir soğutma yöntemi olduğuna karar verilmiştir [107].

Tosun ve diğerleri; AA7075-T6 malzemesinin geleneksel ve hava ile soğutma yöntemleri kullanılarak frezelenmesinde iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü deneysel olarak incelemiştir. Hava ile soğutarak işlemede kullanılan hava iki farklı hızda (20 ve 40 m/s) kesme bölgesine gönderilmiştir. Geleneksel soğutmada kesme sıvısı olarak bor yağı ve su karışımı kullanılmıştır. Deneyler farklı kesici takımlar (HSS, Karbür), devir sayıları (780, 1330, 2440 rev/min) ve ilerlemeler (20, 40, 80 mm/min) kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı, ancak devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, karbür takımlarla elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin HSS takımlara göre daha iyi olduğu, hava ile soğutma yöntemiyle elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin de geleneksel soğutma yöntemine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir [108].

2.3. Takım-Talaş Yüzeyi Sıcaklığı ve Tersine Isı İletim Yöntemi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Talaşlı imalatta tornalama işlemlerinde kesme sırasında karşılaşılan en önemli problemlerden biri kesme bölgesinde çok yüksek sıcaklıkların oluşmasıdır. Tornalama

operasyonu sırasında gerek çok yüksek miktardaki plastik şekil değişiminden, gerekse sürtünmeden dolayı yüksek sıcaklıklar oluşur ve hem iş parçası hem de kesici takım işlem sırasında oluşan bu yüksek sıcaklıklara maruz kalır. Yüksek kesme sıcaklıklarının malzemeyi yumuşatıp kesme işlemini kolaylaştırması gibi bazı avantajları olmakla birlikte, yüksek kesme sıcaklıkları; takım aşınmasında, takımda yığılma oluşmasında, iş parçası yüzey bütünlüğünde ve takım ile iş parçasında termal deformasyonlar oluşmasında olumsuz etkiler yapar [109]. Yüksek kesme sıcaklıklarının hem iş parçasına, hem de kesici takıma olumsuz etkileri olmakla birlikte literatürde kesme sıcaklığı üzerine yapılan araştırmalar daha çok takım/talaş temas bölgesi ve takım sıcaklığı üzerine yoğunlaşmıştır. Yüksek takım sıcaklıkları, özellikle karbür ve HSS gibi takım malzemelerinde hızlı takım aşınmasının en önemli faktörlerinden biri olduğundan [110] literatürde takım sıcaklığı konusuyla ilgili çok sayıda çalışma bulmak mümkündür.

Yüksek deformasyon altındaki malzeme davranışı ve takım ile iş parçası arasındaki sürtünme şekli ve sıcaklık oluşumu çok karmaşık bir yapıdadır ve belirlenmesi günümüzde kullanılan deneysel yöntemlerle oldukça zordur [111]. Ayrıca geliştirilen basitleştirilmiş analitik modeller de bu kadar karmaşık süreci tam olarak yansıtamamaktadır. Yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı sayısal modeller önem kazanmaktadır. Örneğin, deneysel olarak belirlenmesi zor olan deformasyon, takım-talaş ara yüzey sıcaklığı, takım ve iş parçasındaki oluşan gerilmeler gibi değişkenler, sayısal modellerle yaklaşık olarak modellenebilmektedir [112].

Kesme sıcaklıklarının tespiti konusunda, infrared pirometre [113], gömme Termokupul [114], takım-iş parçası termokupulları [115] gibi yöntemler olmak üzere birçok çalışma yapılmıştır. Eğer kesme bölgesi yakınında talaş yüzeyi ve sensör çözünürlüğü gibi sınırlandırmalar ortadan kaldırılırsa, infrared pirometre kullanımı iyi bir yöntem olarak görülmektedir [116, 117]. Diğer taraftan takım-iş parçası termokupulu kullanımı kesici takımların elektrik iletkenliğinden dolayı bu yönetime de bazı sınırlamalar getirmektedir. Ayrıca bu yöntemin kesme bölgesindeki sıcaklıkları tam olarak ölçemediği belirtilmiştir [118]. Bu gibi deneysel olarak sıcaklık ölçme yöntemlerindeki zorluklardan dolayı işleme sıcaklıklarının tahmin edilmesinde analitik ve sayısal modeller kullanılmıştır [119, 120].

Tay, kesme işlemi süresince oluşan sıcaklıkların hesaplanmasında kullanılan metotları sınıflandırmıştır. Bu metotlar; hareketli ısı kaynağı metodu, görütüleme ısı kaynağı metodu, sonlu farklar metodu, yarı analitik metot ve sonlu elemanlar metodudur [120]. Düzensiz

takım geometrisinden dolayı, sayısal analiz tekniklerinin çoğu sonlu elemanlar metodunu kullanmaktadır [121-126]. Ancak iş parçası malzemesinin yapısal parametrelerinin elde edilme zorluğu gerçek işleme sürecinde sonlu elemanlar metodunun kullanımını sınırlamaktadır [127]. Takım-talaş ara yüzeyindeki ısı akışı tam olarak bilinmediğinden sonlu farklar metodu da kesme sıcaklığını doğrudan tespit edememektedir [128].

Takım-talaş ara yüzeyi sıcaklıklarını ölçmekte kullanılan deneysel ve analitik yöntemlerin yukarıda belirtilen eksikliklerini aşmak için bazı araştırmacılar tarafından tersine ısı iletim yöntemi geliştirilmiştir. Tersine ısı iletim yöntemi, erişilebilir bir konumdan sıcaklıkların ölçülerek, takım-talaş yüzeyinde oluşan ısı akışının sayısal analizlerle hesaplanması işlemini esas almaktadır [129].

Yen ve Wright [130], talaş kaldırma işlemlerinde takım-talaş ara yüzey sıcaklığını tahmin etmek için uzaktan kumandalı bir sensör kullanmışlardır. Ayrıca bu çalışmada, takım geometrisi ve sınır şartları basitleştirilmiş tek boyutlu eliptik termal model esaslı tersine ısı model analizi yapmışlardır. Benzer bir çalışma, tornalama operasyonlarında kesme sıcaklığını ölçmek için Lin [131] tarafından; frezeleme operasyonlarında ise Kwon ve arkadaşları [132] tarafından yapılmıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda ısı iletim çözümleri, eliptik termal model kullanılarak yapılan iki boyutlu ısı transferi modelleri ile sınırlıdır ve bu yöntemde takım-talaş temas alanının çeyrek elipslere yaklaştırılma zorunluluğu vardır. Bu gibi sınırlamaların genellikle kesme işlemlerinde kesicinin gerçek ısı transferini tanımlamada yetersiz olduğu düşünülmektedir [128].

Son zamanlarda, kesicinin üç boyutlu ısı transferi modellerinden faydalanan tersine yöntemler geliştirilmiştir. Carvalho ve arkadaşları, tornalama işlemlerinde, tersine çözüm yöntemi ile kesicinin üç boyutlu ısı iletim modelini uygulamışlardır. Çalışmalarında, termokupul yardımıyla ölçtükleri sıcaklık değerlerini kullanarak, takım-talaş ara yüzeyine sıcaklık akışını kesici uç ve katerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini de dikkate alarak sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tahmin etmişlerdir. Sonuç olarak, bu yöntemin literatürde elde edilen sonuçlara paralellik gösterdiği bulunmuştur [118].

Cheng ve arkadaşları, delik delme işlemlerinde kesme kenarı boyunca ısı akışını tahmin etmek için üç boyutlu tersine ısı iletim yöntemini kullanmışlardır. Tersine çözüm yönteminde, sıcaklıkları elde etmek için matkap talaş yüzeyi içerisine termokupul yerleştirmişlerdir. Sonuç olarak, delik delme işlemlerinde matkap üzerindeki ısı akışının zamana bağlı olarak hesaplanmasında 3-D tersine termal modelin başarı bir şekilde uygulandığı görülmüştür [133].

Liang ve arkadaşları, AISI 1045 çeliğinin P-10 kalite kaplamasız karbür uçlarla tornalaması işlemlerinde, kararlı haldeki takım-talaş ara-yüzeyi sıcaklığını ölçmek için üç boyutlu tersine ısı iletim yöntemini kullanmışlardır. Tornalama işleminde ilerleme hareketi durup belli bir soğutma süresinden sonra kızıl ötesi termal kamera kullanılarak takım sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. Sıcaklıkların bu şekilde deneysel olarak ölçülmesinden sonra, tornalama süresi boyunca takım-talaş yüzeyinde oluşan ısı akışının tespit edilmesi için kesicinin üç boyutlu ısı iletim modeli ve optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Çalışma sonucunda tersine çözüm tekniğinin, sıcaklıkların elde edilmesi için oldukça başarılı bir yöntem olduğu vurgulanmıştır [128].

Liang ve Quan yaptıkları çalışmada tornalama işlemlerinde kuru işleme ve ısı borusu kullanarak soğutma tekniği ile işleme operasyonlarında takım-talaş ara yüzeyi sıcaklığını elde etmek ve ısı borusunun soğutma performansını belirlemek için sonlu farklar ve tersine ısı akışı yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda, ısı borusunun takıma geçen ısı miktarını arttırdığı ve kesici uçta oluşan sıcaklığın bu sayede azaldığı görülmüştür [134].

Kusiak ve arkadaşları, ahşap işleme boyunca takım üzerindeki ısı akışını araştırmak için 3-D tersine ısı iletim yönteminden faydalanmışlardır [135]. Lima ve arkadaşları [136], ara yüzey ısı akışını tahmin etmek eşlenik yöntem ile “gradient method” esaslı tersine ısı iletim tekniğini kullanmışlardır. Sonlu hacimler metodu ile çevreye olan ısı transferi de dikkate alınarak model sayısal olarak çözülmüştür [136]. Chen ve arkadaşları [137], fonksiyonel özellikleri Beck ve arkadaşları [138] tarafından önerilen tersine ısı iletim yöntemini yöntem kullanmışlardır. Kesici içerisine yerleştirilen termokupular yardımıyla sıcaklıkları elde etmek için sonlu elemanlar ve sayısal analiz tekniğini kullanmışlardır.

2.4. Literatür Araştırmasının Genel Değerlendirmesi

Literatür taramasının genel değerlendirmesi aşağıda maddeler halinde özetlenebilir.

- Süper alaşımın, sıcak sertlik, aşınmaya karşı gösterdiği direnç ve korozyon direncinin çok iyi olmasından dolayı askeri, ticari ve cerrahi uygulamalarda kullanıldığı vurgulanmıştır.
- Haynes 25 süper alaşımının işlenebilirliği üzerine kapsamlı bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Süper alaşımlar üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar genellikle Inconel alaşımları üzerine yoğunlaşmış ve genel kullanımı önemli ölçüde artan başta Haynes 25 süper alaşımı olmak üzere kobalt esaslı süper alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır.
- Kobalt esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklıklarda korozyon direnci nikel esaslı süper alaşımlara göre daha iyidir. Ancak kobalt alaşımlarının işlenebilirliğinin daha zor oluşu malzemenin kullanım alanlarını kısıtlamıştır.
- Literatürde genel olarak malzemenin işlenebilirliğinin zorluğu ve yüksek maliyeti hakkında değerlendirmeler yapılmış fakat çözüm önerileri çok sınırlı kalmıştır.
- Süper alaşım malzemelerin, yüksek sıcak sertlik, düşük termal iletkenlik, aşınma direnci gibi üstün niteliklerinden dolayı son yıllarda yeni projeler geliştiren ülkemiz savunma sanayinde kullanılmaya başlanmış, fakat malzemelerin işlenmesi sırasında yüzey kalitesi, takım ömrü ve işleme maliyeti gibi çözüm bekleyen soruların ortaya çıktığı görülmüştür.
- Farklı yöntemler uygulanarak süper alaşımın işlenebilirliği araştırılmış fakat işleme maliyetinin çok fazla arttırdığı belirlenmiştir.
- Kobalt esaslı süper alaşımlarda kesici takım ömrünün kısa oluşu ile iş parçasının yüzey kalitesinin işlemeye karşı çok hassas olduğu görülmüştür.
- Maliyet ve işleme zamanı sorunlarının temelinde, kesme bölgesinde meydana gelen sürtünmeler ve bunun neticesinde kesici uçta oluşan yüksek ısının olduğu belirlenmiştir.
- Kesici takım sıcaklığının tahmininde sonlu elemanlar yöntemiyle tersine ısı iletim modelinin birçok çalışmada kullanıldığı ve yapılan kıyaslamalar neticesinde takım sıcaklığının tahmininde doğruluk payının yüksek olduğu görülmüştür.

- Kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürüp takım ömrünü arttırmak ve yüksek kesme hızlarında çalışmaya imkân sağlamak için alternatif soğutma yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar aşağıda kısaca özetlenmiştir;

- a) İşlenmesi zor parçaların tornalanmasında, kriyojenik soğutma yöntemi, çevresel şartlar altında tehlikeye yol açmadan takım ömrünü birkaç kat arttırmıştır. Kriyojenik sıvı takım-talaş ara yüzeyine nüfuz ettiğinde hem soğutucu hem de yağlayıcı görevi görmüştür. Fakat soğutucu özelliği daha ön plana çıkmıştır. Ayrıca kriyojenik soğutma tekniğinin yüksek kesme hızında faydaları daha belirgin olarak görülmüştür.
- b) Nozul yardımıyla takım uç kısmına minimum oranda yağ uygulanması ile yapılan talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım maliyeti önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca madeni yağlara göre bitkisel yağ kullanımının daha ucuz, sağlıklı ve çevresel olduğu vurgulanmıştır.
- c) MMS yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda sonuca doğrudan etki edecek yağ cinsi, debi miktarı, nozul çıkış ölçüleri, nozul pozisyonu gibi parametrelerin işlenebilirlik üzerinde etkisini belirleyen kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır.
- d) Takım-talaş ara yüzeyine yüksek basınçlı hava veya soğutma sıvısı uygulanması ile kesme kuvveti azalmış ve daha iyi takım ömrü ve yüzey kalitesi sonuçları elde edilmiştir. Sert malzemelerin torna tezgâhında işlenebilirliğini kolaylaştırmak için bu yöntemin kullanımının önemli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yüksek basınçlı soğutma tekniğinde hava çıkışının sağlandığı nozul pozisyonuna dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.
- e) Hava, su buharı ve diğer çevresel gaz karışımlarının doğal soğutma şartları için iyi birer çözüm yolu olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra hava-yag, hava-su karışımının hem soğutma için hem de yağlama için daha etkili sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- f) Kater içerisine ısı borusu yerleştirilerek yapılan soğutma işleminin de maliyet ve çevre açısından alternatif bir diğer yöntem olduğu görülmüştür.
- g) Bütün soğutma teknikleri başta kaplamasız/kaplamalı karbür takımlar olmak üzere her takım malzemesi için iyi sonuçlar vermiştir.
- h) Kriyojenik soğutma ile ilgili yapılan çalışmalarda CO₂ ve N₂ gazı kullanıldığı fakat CO₂ gazı kullanımında büyük hacimli tankların bulunma zorunluluğu ve

soğutucu elemanın kontrolünün problemlili oluşu gibi nedenlerden dolayı N_2 kullanımı daha ön plana çıkmıştır.

- i) Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan soğutma sıvılarının, iyi yüzey kalitesi ve boyut tamlığında parça imalatı için büyük önemi vardır. Soğutma sıvılarının fiziksel ve kimyasal özellikleri; imalat işlemi sırasında ortaya çıkan ısı ve mekanik sebepli hasarların azaltılmasını veya önlenmesini sağlar. Soğutma/yağlama maddeleri, doğru kullanıldıkları takdirde, bir yandan iş parçasının boyutları ve biçiminde yüksek hassasiyet ve daha iyi yüzey kalitesi sağlarken, öte yandan takımlar için daha uzun kullanım ömrü elde edilir. Talaşlı imalat, kesme sıvıları soğutma, yağlama ve temizleme gibi olumlu etkileri nedeniyle hala çok önemli bir yer tutmaktadırlar. Ancak bunlar çevre ve insanlar için bir tehlike potansiyeli doğurmakta ve imha edilmeleri, devamlı artan masraflara neden olmaktadır. Dolayısıyla bu sıvıların kullanımını azaltmak için çalışmalar halen devam etmektedir.

Literatür araştırmasının genel değerlendirmesinden sonra yapılan bu çalışma ile kobalt esaslı Haynes 25 / L 605 süper alaşımının işlenebilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri, önceki çalışmalarda ayrı ayrı kullanılan ve verimlilik, maliyet ve çevresel şartlar açısından uygulanması tavsiye edilen dört farklı soğutma/yağlama yöntemi altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde işlenebilirliğin önemli bir göstergesi olan yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının belirlenmesinin yanı sıra tersine ısı iletim yöntemi kullanılarak kesici takım yüzeyinde meydana gelen sıcaklıklar da tespit edilmiştir.

3. SÜPER ALAŞIMLAR

Yüksek sıcaklıkta uzun süre yapı ve özelliklerini muhafaza eden malzemelere süper alaşım denir. Bu malzemeler metalik bir yapıda olup 0,8 Tm'ye (erime sıcaklığı) kadar bir sıcaklıkta dahi uzun süre kullanılabilir. II. Dünya Savaşı'ndan önce süper alaşımlar "ısıya dirençli alaşımlar" ya da "yüksek sıcaklık alaşımları" olarak adlandırılmaktaydı. II. Dünya Savaşı'ndan sonra yüksek sıcaklıklarda performans gerektiren jet motorlarının gelişimiyle birlikte "süper alaşım" terimi ilk kez kullanılmıştır [139].

Süper alaşım, şiddetli mekanik gerilmelerin ve yüzey dengesinin sıklıkla gerekli olduğu genellikle Grup VIII B elementlerine dayalı yüksek sıcaklıklarda hizmet vermesi için geliştirilmiş bir alaşımdır. Süper alaşımlar periyodik tablodaki VIII B grubu elementlerini temel alarak çoğunlukla Fe, Ni, Co ve Cr'nin çeşitli kombinasyonlarından ve az miktarda W, Mo, Ta, Nb, Ti, ve Al elementlerinin birleşimlerinden oluşmaktadır. Süper alaşım, yüksek sıcaklıklarda yüksek performans gerektiren uçak türbin motorlarında ve turbo şarjlarda kullanım için geliştirilmiş ve II. Dünya savaşı'ndan kısa bir süre sonra kullanılmıştır [140].

Süper alaşımların en önemli özellikleri; 650 °C'nin üstündeki sıcaklıklara uzun süre dayanmaları ve sıcaklığa bağlı korozyona dayanıklılıklarıdır. Nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda (1500-1650 °C) yüksek dayanıma sahiptirler. 1950'li yıllarda uçak gaz türbin motorlarında kullanılmaya başlanan ve çok üstün sıcaklık performansı ile hızla diğer sektörlerde yüksek sıcaklığa dayanıklılık gerektiren uygulamalarda da kullanım alanı bulan; Inconel (600, 625, 718, X750), Haynes (HR120, HR160, HR224), Rene 41 ve Nimonic 90 gibi süper alaşımlar günümüzde havacılık sanayi, ısıtım işleme sanayi, sanayi fırınları, nükleer santraller, gaz türbinleri, seramik sanayi, otomotiv ve metal işleme sanayi gibi; çok iyi yüksek sıcaklık mukavemeti ve yüksek sıcaklık oksidasyon direnci gerektiren pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Örneğin bir uçak turbo jet motorunun toplam ağırlığının %10'u süper alaşımlardan yapılırken bu oran 1985 yılında %50'ye, 1993 yılında %60'a ulaşmıştır [141]. Ayrıca bu alaşımlar sıcak iş takımları ve kalıpları olarak da kullanılmaktadır. Uzun süreli sürünme mukavemetleri, oksidasyon ve korozyon dirençleri ve değişik sıcaklıklardaki kararlı halleri bu alaşımların süper alaşımlar olarak adlandırılmasına öncülük etmektedir. Süper alaşımlar; Ni, Co, Cr,

Nb, Mg ve/veya Fe elementlerinden en az birinde yüzde miktar olarak zengin olup değişen çevre ve yüksek sıcaklık koşullarında yüksek gerilme altında yapısal kararlılık gösterir. Bu durum dikkate alındığında süper alaşımlar en karmaşık mühendislik malzemeleri arasında kendilerine kolayca yer bulabilmektedir [139]. Süper alaşımlarda bulunan elementlerin etkileri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Süper alaşımlardaki bazı elementlerin etkileri [142]

Fe esaslı	Co esaslı	Ni esaslı	Etki
Cr, Mo	Nb, Cr, Mo	Co, Cr, Fe, Mo	Katı çözelti güçlendiriciler
C, Ni, Co	Ni	Co	Yüzey merkezli kübik matris stabiller
Ti	Ti	W, Ta, Ti, Mo, Nb	MC
...	Cr	Cr	M_7C_3
Cr	Mo, W	Cr, Mo, W	$M_{23}C_6$
Mo		Mo, W	M_6C
C, N	C, N	C, N	M (CN) tipi
P	...	...	Karbürlerin genel içeriğinin ilerleyişi
Al, Ti, Ni	...	Al, Ti	Formlar $\gamma^1 Ni_3 (Al, Ti)$
Al, Zr	...	...	Hexagonal $\mu (Ni_3 Ti)$ yavaşlatma formasyonu
...	...	Co	γ^1 nin yükselen solvus sıcaklığı
...	...	Cr	γ^1 nin azalan solvus sıcaklığı
Al, Ti, Nb	Al, Mo, Ti, W, Ta	Al, Ti, Nb	Zorlanan ve / veya intermetaliklerin içeriği
Cr	Al, Cr, Ta	Al, Cr, Ta	Korozyon direnci
La, Y	La, Y, Th	La, Th	Sıcak korozyon mukavemetini arttıranlar
B	B, Zr	B, Zr	Sürünme-kopma morfolojisindeki değişikliklerle kanal sınır özelliklerini arttıranlar
...	...	Hf	Orta sıcaklık yumuşaklığını arttıranlar
...	...	B, C, Zr	Sınır ayarlamasına yol açanlar

Nikel esaslı süper alaşımlardan Udimet 700, 870 °C’ de 635 MPa akma dayanımına ve %27 uzama oranına, Rene 95 ise 760 °C’ de 1100 MPa akma dayanımına ayrıca %15 uzama oranına sahiptir. Kobalt esaslı S-816 süper alaşımı ise 870 °C’ de 240 MPa akma dayanımına ve %16 uzama oranına sahiptir. Bu özelliklerden dolayı süper alaşımlar birçok alaşım çeşidinin yerine geçmiştir. Bunların arasında krom ve nikel içeren demir esaslı alaşımlar, demir, nikel, krom, kobalt bileşikler, karbür takviyeli kobalt esaslı alaşımlar, katı çözelti takviyeli bazı alaşımlar, çökelti ve dağılım takviyeli nikel esaslı alaşımlar bulunmaktadır. Süper alaşımlar, işleyerek veya döküm yöntemiyle şekillendirilerek kullanılabilir. Genellikle demir esaslı alaşımların, demir, nikel, krom, kobalt bileşiklerin ve nikel esaslı katı çözelti takviyeli alaşımların 650 °C’nin üstündeki sıcaklıklardaki

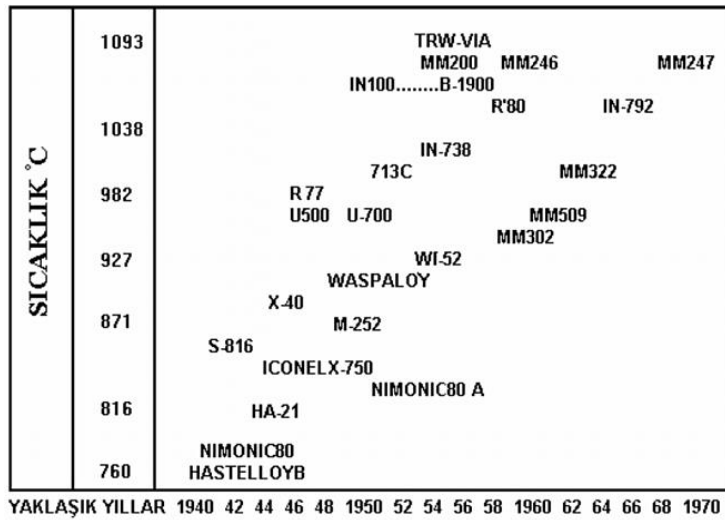
dayanımları, nikel esaslı ikinci safha takviyeli ve kobalt esaslı alaşımlardan önemli derecede daha düşüktür. %16 Cr, %25 Ni ve %6 Mo içeren 16-25-6 alaşımı gibi ilk demir esaslı süper alaşımlar ve küçük miktarlarda tungsten ile molibden içeren demir, nikel, krom, kobalt alaşımları (Fe - 20Ni - 20Cr - 20Co) esasen katı çözelti takviyelidir. Düşük miktarlarda (%2 ile %3) alüminyum ve titanyum içeren demir esaslı alaşımlar, bir alüminyum-titanyum mukavemet kazandırma safhasının çökeltilmesi yoluyla yüksek sıcaklıklara daha fazla dayanım gösterirler. Ergime noktası üstünlüğünden ötürü kobalt esaslı alaşımlar genellikle 1100 °C'den yüksek sıcaklıklarda nikel esaslı alaşımlardan daha fazla dayanım gösterirler. Karbür bileşikleri içeren ve bir yüzey merkezli kübik (f_{cc}) katı çözelti matris ile nitelendirilen döküm kobalt esaslı alaşımlar, gaz türbin motorlarında hava folyoları olarak kullanılmaktadır. Dağılımla kuvvetlendirilmiş nikel esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanıma sahiptirler. Fakat orta sıcaklıklarda orta dayanım gösterirler. İkinci safha, ergime gerçekleşinceye kadar katı bir sertleştirme mekanizması görevi de bu alaşımların yapısında bulunur. Aksine, çökelti ile mukavemetlendirilmiş alaşımlar, ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda katı çözelti olarak dayanım kaybederler. Dağılımla kuvvetlendirilmiş alaşımlar bazı gaz türbinli motorların yanma uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [142].

3.1. Süper Alaşımların Gelişim Süreci

Günümüzde kullanılan çoğu süper alaşımlar 1950-1970 yılları arasında geliştirilmiş olmasına rağmen ilk süper alaşımlar, östenitik paslanmaz çeliklerin bir modifikasyonu olarak üretilmeye başlanmıştır. 1900'lü yılların başlarında gaz türbinlerinde kullanım için geliştirilmiş olan süper alaşımlar artık denizcilik sanayi, uzay araçları, roket motorları, nükleer reaktörler, yüksek sıcaklık fırınları, denizaltı uygulamaları, buhar güç üniteleri ve petrokimyasal ekipmanlarda geniş olarak kullanılmaktadır. 1940'lı yıllarda yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlar üretilmeye başlanmıştır. Bu gelişmelere İngiliz Whittle Motorunun ilk uçak gaz türbininde yüksek sıcaklık alaşımı geliştirme ihtiyaçları etkili olmuştur. İlk nikel esaslı süper alaşım Nimonik 75'tir. İngiltere'de süper alaşım malzeme üretimi bundan sonra hızlı bir ilerleme göstererek Nimonik serileri üretilmeye başlanmıştır. Nimonik'ten sonra geliştirilen ilk süper alaşım Nimonik 80 A, 1940'lı yıllarda yüksek frekanslı eritme kullanılarak havada eritildi. 1950'lerde nikel esaslı süper alaşımların gelişiminde önemli bir ilerleme oldu ve vakum altında eritme ve inceltme yöntemi kullanılmaya başlandı. Böylece vakum ile eritme yöntemiyle inceltme sağlandı ve daha iyi

dövülebilien güçlü süper alaşımlar, Nimonik 115 ve Udimet 700 gibi malzemeler geliştirildi. 1950'lerin sonunda döküm teknikleri gelişip vakum ile eritme işlemi bulununcaya kadar döküm süper alaşımlar yeterince bir kabul görmedi. İlk vakum ile eritilen alaşım Inco 713 C idi. Bu alaşım yüksek karbonlu içeriği ile aşırı derecede karbür oluştuyordu ve düşük sıcaklıklarda zayıf akışa sebep oluyordu. Bu da disk bıçaklarının dökülmesine bir problem oluştuyordu. Düşük karbon versiyonu ile bu problem aşıldı ve malzeme türbin bıçaklarında kullanılmaya başlandı [143].

1960'ların ortalarında General Electric Rene 77'yi üretti. Daha sonra benzer titanyum ve alüminyum miktarları ile Rene 77'den daha yüksek sürünme gerilimi ve korozyon dayanımına sahip Rene 80'i geliştirdi. Martin Metals firması, Mar-M 200 süper alaşımında molibden yerine tungsten kullanarak piyasaya sürdü, ancak sıcak sürünme ve dökülme işlemlerinde bir problem ortaya çıktı. 1969'larda Martin Metals firması bu problemi aşan bir metot ile patent aldı. Bu gelişme %2 hafniyumun metal kompozisyonuna katılımından oluşuyordu ve bütün bir döküm boyunca hafniyumun belirgin bir etkisi görülmekteydi.



Şekil 3.1. Süper alaşımların gelişimi ve sıcaklık dayanımları [142]

1970'li yılların başlarında yüksek sıcaklık korozyonuna dayanıklı malzemeler üretildi. IN 100 bunlardan bir tanesidir. 1970'li yıllarda dağılmış oksitlerle güçlendirilmiş alaşımlar (ODS) mekanik alaşımlama (MA) ile üretimine başlandı. Bu metot süper alaşımların gelişiminde çok önemli bir gelişmedir. Bu metotta oksitlerin dağılımı ile veya γ çökteltileri ile güçlendirilmiş süper alaşımları üretmek mümkündür. Yeni ODS alaşımları Amerikan

Silahlı kuvvetlerinin jetlerinde ve General Electric'in motorlarında kullanılmıştır. Süper alaşımların gelişimi ve sıcaklık yönünden dayanımları Şekil 3.1' de gösterilmiştir.

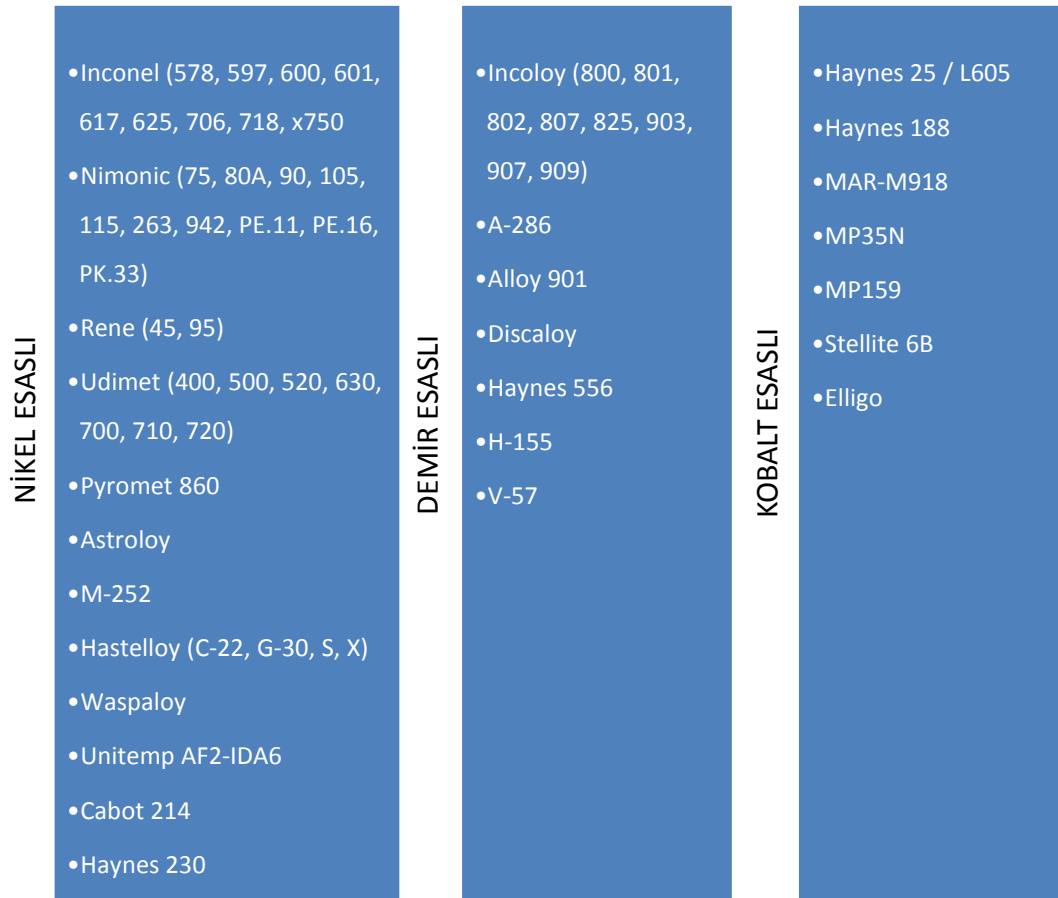
3.2. Süper Alaşımların Yapıları

Süper alaşımlar, büyük miktarlarda demir, krom, nikel ve kobalt bulundurmasına rağmen yapılarında bulunan 8-20 arasında değişen alaşım elementi nedeniyle son derece karmaşık bir mikro yapıya sahiptir. Meydana gelen fazlar kristal kafes yapılarına göre geometrik sıkı paket (GSP) veya topolojik sıkı paket (TSP) adları altında gruplaşırlar. Bu fazlarda GSP tipi (γ' , Ni_3Al ve Ni_3Ti) olanların süper alaşımlarda bulunması istenirken, TSP tipi olanlar (Mu , σ ve laves) ise alaşımın kopma dayanımını ve sünekliğini düşürdüklerinden kaçınılması gereken fazlardır. Bunların dışında rastlanılan diğer fazlar ise MC , M_{23}C_6 , M_6C gibi karbürler ve borürlerdir. Süper alaşımlarda yeterli miktarda karbon ve diğer karbür yapıcı alaşım elementleri varsa, karbürler matris içinde çökeltiler halinde ortaya çıkar. Karbür oluşabilirliği için gerekli karbon miktarı östenitik paslanmaz çeliklerde ağırlıkça %0,02-0,2 nikel esaslı süper alaşımlarda (döküm) ağırlıkça %0,05-0,2, kobalt esaslı süper alaşımlarda (döküm) ağırlıkça %0,25-1'dir. Karbür fazları çoğunlukla tane sınırlarında görülür. Reaktif veya refrakter elementler MC türü karbürler oluşturmalarına neden olur. Isıl işlem ve kullanım esnasında bu karbürler M_6C veya M_{23}C_6 türü karbürlere dönüşebilirler [140].

3.3. Süper Alaşımların Çeşitleri

Süper alaşımlar; uzay, türbin ve fırın parçaları, kimyasal taşıma donanımları ve petrol rafineri elemanları imalatı gibi bazı endüstrilerde daha iyi sonuçlar verdiği için tercih edilmektedir. Tüm bu uygulamalar farklı ısı ve basınç altında gerçekleştirilmekte olup bu şartlar altında özelliğini kaybetmeyecek malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Demir esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda dayanımlarını koruyamadıkları için işlenmesi en kolay süper alaşımlardır. Bu alaşımlar demir esaslı olup paslanmaz çeliklerden daha fazla miktarlarda nikel ve krom içerirler. Örneğin; A-286, Discaloy, Incolloy 801 ve ASTM A297 birer demir esaslı süper alaşımdır. Demir bazlı süper alaşımlar gaz türbini motorlarında kullanım alanı bulmaktadır [144].

Kobalt esaslı süper alaşımlar, yüksek kesme sıcaklıklarında, yüksek sıcak sertlik eğilimi gösterdiği için işlemede süper alaşımların en fazla ilgi, dikkat ve çaba gerektiren türüdür. Kobalt esaslı içerik yüksek kesme sıcaklıklarında en yüksek dayanımı sağlamaktadır. Bu alaşımlar içerik esası olarak anlamlı miktarlarda nikel, krom ve tungstene sahiptirler ve daha az miktarlarda molibden, niyobyum, tantalyum, titanyum ve duruma göre de demir içerirler. Stellite, Haynes 188, Haynes 25 ve AiResist 13 kobalt esaslı süper alaşımlardır. Nikel esaslı alaşımlar süper alaşımların en geniş grubunu oluşturmaktadır ve işlemesi oldukça zordur. Genel olarak nikel esaslı bir süper alaşımın kimyasal içeriğinde hacimsel olarak; %38–76 oranında nikel (Ni), %27'den fazla krom (Cr) ve %20 kobalt (Co) bulunmaktadır. Bu malzemeler yüksek korozyon dayanımı ya da yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımın gerekli olduğu uygulamalarda kullanılırlar. Nikel esaslı süper alaşımlar üç alt kategoriye ayrılabilirler; (i) Nikel-bakır, örneğin; Monel, (ii) Nikel-krom, örneğin; Inconel, Waspalloy, Astroloy ve (iii) Nikel-molibden-krom, örneğin; Hastelloy B, Hastelloy C [144].



Şekil 3.2. Süper alaşımların sınıflandırılması [145]

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek sıcaklık alaşımları olarak sınıflandırılabilirler ve bir önceki süper alaşım tiplerinin işlenebilirliğine sahiptirler. Titanyum yalnız başına oda sıcaklığında diğer metallerden daha iyi dayanım- ağırlık oranı verir. Dört farklı tipte titanyum alaşımı mevcuttur; saf (%99-100 Ti), alfa alaşımlar (%90-95 Ti), alfa-beta alaşımlar (%80-90 Ti) ve beta alaşımlar (%80 < Ti). Normalde, saf ya da alfa alaşımları işlemek en kolaydır. Titanyumla birlikte alaşım elementi olarak alüminyum, vanadyum, zirkonyum ve diğer elementler kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının yüksek dayanıma sahip olması sebebiyle uçak motor ve gövdelerinde kullanılan birçok parçanın imalatında kullanılmaktadır. Aynı zamanda, korozyon ve yorulma dayanımları oldukça yüksektir. Uçak motor ve gövdelerinde, uzay sektöründe ve askeri amaçlı projelerde üretilen parçaların imalatı döküm ya da talaş kaldırma şeklinde olduğundan dolayı titanyum alaşımlarının işlenebilirliği üzerine deneysel ve teorik anlamda çalışmalar devam etmektedir [144]. Süper alaşımlar, yapılarındaki oluşum elementlerine göre farklı isimler alırlar. Bu alaşımların genel sınıflandırılması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

3.3.1. Nikel esaslı süper alaşımlar

Süper alaşımlar içerisinde nikel esaslı süper alaşımlar günümüzde en yaygın kullanılan alaşımlardandır. Nikel esaslı süper alaşımlar, başta nikel olmak üzere, önemli miktarlarda krom içeren alaşımlar olarak tanımlanmıştır. Temel alaşım elemanı olarak kobalt, demir, molibden, tungsten ve tantal içerebilirler. Katı çözelti ve ikinci aşama intermetalik çökeltme ile kuvvetlendirilmişlerdir. Alüminyum, titanyum ve niyobyum intermetalik oluşum elementleridir. Nikel esaslı süper alaşımlar %30 ila %75 Ni ve %30’ a kadar Cr içerirler. 650-1100 °C sıcaklıkları arasında kullanılan malzemeler içinde yapısal özellikleri en iyi bilinen malzemelerdir. İleri teknoloji hava taşıt motorlarının yaklaşık %50’sini bu süper alaşımlar içermektedir. Birçok nikel esaslı alaşım, dayanım veya korozyon direncini arttırmak için küçük miktarlarda alüminyum, titanyum, niyobyum, molibden ve tungsten içerir. Nikel ve krom kombinasyonu, bu alaşımlara önemli derecede oksidasyon dayanımı verir. Nikel esaslı süper alaşımlar özellikle 650 °C’yi geçen sıcaklıklarda mekanik dayanım olarak paslanmaz çeliği geçerler. Nikel esaslı süper alaşımlar; oksidasyon ve korozyona, yüksek dayanım ve direnç gerektiren uygulama alanlarında genişçe kullanılırlar. Matris, yüzey merkezli kübik (YMK) östenit (γ) yapıdadır. İstenilen bileşime ulaşabilmek için 12-13 elementin çok iyi kontrol edilmesi gerekir [146]. Çizelge 3.2’de Ni esaslı süper alaşımların içerisinde bulunan elementlerin ağırlıkça oranları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Nikel esaslı süper alaşımların yaklaşık kimyasal bileşimleri

Element	Yaklaşık sınır değerler (%)
Ni	47-49
Cr	6-25
Fe	22' ye kadar
Co	10-28,5
Al	6,5' e kadar
Nb	6' ya kadar
Ta	8' e kadar
Ti	6' ya kadar
Mo	10' a kadar
W	12,5' e kadar
C	0,27' ye kadar
Diğer elementler	Az miktarda B, Zr, Hf, Mg, La, Ce, Y

Nikel esaslı süper alaşımlar; gaz türbinleri, nükleer reaktörler, fırınlar vb. yerlerde yüksek sıcaklık malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlar döküm, yönlendirilmiş katılaştırılmış (hem çok taneli hem de tek kristal olarak), dövme biçimlerinde ve bazı yeni alaşımlarda toz metalürjisi teknikleriyle üretilmiş halde ticari olarak elde edilebilir. Nikel esaslı süper alaşımların kullanım yerine uç örnek olarak uzay yolculuğu yapılan araçların (uzay mekiği gibi) ana motorunda -196 ile 871 °C arasındaki hidrojen ortamında Waspalloy, Inconel 718 ve yönlendirilmiş katılaştırılmış Mar-M-246 gibi alaşımların kullanılması verilebilir. Alaşım elementlerinin ilavesi ile yüksek sıcaklık özellikleri kazanan nikel esaslı süper alaşımlara iyi bir örnek Inconel 718 alaşımıdır. Inconel 718 süper alaşımı yüksek nikel içerikli (%52,5) bir alaşımdır. Sertleştirilme mekanizmalarında hacim merkezli tetragonal yapıdaki γ'' (Ni_3Nb) fazı önemli rol oynamaktadır. γ'' fazının oluşumunda demir elementi katalizör gibi davranır. Bu alaşım γ' (Ni_3Al , Ti) fazının oluşumuna yol açan alüminyum ve titanyum elementlerini de içerir [139]. Endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olan bu alaşımlar aşağıdaki özelliklere sahiptir [140];

- Yüksek ısıl gerilim
- Yüksek sertlik
- Yüksek kesme kuvvetine gerek duyan deformasyon sertleşmesi ve yüksek iş sertliği
- Yüksek ısılara sebebiyet veren düşük termal iletkenlik

- e) Yüksek oranda aşındırıcı karbür zerreciklerinin varlığı
- f) Takım üzerine güçlü kaynaklanma eğilimi ve yığıntı talaş (YT) oluşumu

Yukarıda sayılan bütün bu özellikler, işleme esnasında kesici takımların üzerinde yüksek aşınma oranı ve yüksek kesilme sıcaklığına sebebiyet vererek süper alaşımların aşırı derecede işlenmesini zorlaştırmaktadırlar [147]. Nikel esaslı alaşımlar; tatmin edici ve kaliteli bir yüzey elde etmede işlenebilirliği zayıf malzemelerdir ve bunların işlenebilirliğini zayıflatan bir kaç sebep vardır [140]. Bunlar;

- 1- Yüksek sıcaklık dayanımı, özelliğinden dolayı işlenmeleri zorlaşmaktadır.
- 2- İşleme esnasındaki malzemenin sertlik artışı, takım aşınmasına sebep olmaktadır.
- 3- Süper alaşımlardaki sert aşındırıcı karbürler, kesilme esnasında kesici takımı önemli derecede etkilemekte ve aşınmayı hızlandırmaktadır.
- 4- Yüksek sıcaklıklarda oluşan kimyasal reaksiyonlar, takım talaş arasında difüzyon aşınmasına sebep olmaktadır.
- 5- İşleme esnasında talaş ile kesici takım arasında yapışma ya da kaynaklanma oluşmakta, kesici takım yüzeyinde bozulmalar ve malzeme kaybına sebep olmaktadır.
- 6- İşleme esnasında çıkan sürekli ve sert talaşların varlığı, kontrolü sağlamayı güçleştirmekte talaşların takım yüzeyinde krater oluşturmaya sebebiyet vermektedir.
- 7- Zayıf termal iletkenliğinden dolayı, nikel esaslı süper alaşımlar, takımın yüzeyinde sık sık yüksek sıcaklıklar oluşturmakta, dolayısıyla kesici takımda yüksek radyal gradientlerin oluşmasına neden olmaktadır.

3.3.2. Demir esaslı süper alaşımlar

Temel olarak alaşım elementleri içerisinde en fazla demirin bulunduğu ve malzemedeki sertlik artışının karbürler veya metaller arası çökeltilerle sağlandığı süper alaşımlardır. Genellikle, demir esaslı, demir-nikel-krom-kobalt bileşikleri ve nikel esaslı katı çözelti takviyeli alaşımların yüksek sıcaklığa dayanımları, 650 °C'nin üstünde nikel esaslı çökeltilme takviyeli ve kobalt esaslı karbür safhası takviyeli alaşımlarından daha düşüktür. İlk demir esaslı süper alaşımlar %16 Cr, %25 Ni, %6 Mo ve denge demiri içeren 16-25-6 alaşımı ve %40 Fe, %20 Ni, %20 Cr, %20 Co ve küçük miktarda tungsten ve molibden içeren Multimet gibi demir-nikel-krom kobalt alaşımlar esasen katı çözelti takviyelidir. 540 °C'nin üstündeki uygulama sıcaklıkları için en büyük öneme sahip olan

demir esaslı alaşımlar yüzey merkezli kübik kafes (YMK) matrise sahiptir. Çünkü kapalı bir kafes, zamana bağlı deformasyon süreçlerine daha dayanıklıdır. İntermetalik bileşik çökeltmesi ile kuvvetlendirilmiş demir esaslı süper alaşımlar gaz türbinli motorlarda kullanım alanı bulmuştur. Örneğin, bazı gaz türbinli motorlarda, türbin disk ve mafsalları ile türbin yuvaları için A-286 kullanılmaktadır.

3.3.3. Kobalt esaslı süper alaşımlar

Kobalt eleman olarak sıkı paket hekzagonal yapıya sahip iken yaklaşık 370 °C’ de YMK yapıya dönüşür. Ni ilavesiyle matris dengeli YMK yapısındadır. Yüksek sıcaklık Co süper alaşımları; östenitik matrise karbürler şeklinde çökelti fazlar, metaller arası fazlar, geometrik sıkı paket ve topolojik sıkı paket içeren bir yapıya sahiptir. Katı ergiyik sertleşmesi bunu sağlayan elementlerin miktarına bağlıdır. Kobalt esaslı süper alaşımların mikro yapılarında 8 ila 20 arasında değişen sayıda element mevcuttur. 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. Kobalt esaslı süper alaşımların genel kimyasal bileşimleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kobalt esaslı süper alaşımların genel kimyasal bileşimleri

Element	Yaklaşık sınır değerler (%)
Ni	20’ ye kadar
Cr	20-27,5
Fe	Aritılamayan element olarak
Co	46-68
Al	3,5’ e kadar
Nb	4’ e kadar
Ta	9’ a kadar
Ti	1’ e kadar
Mo	5,5’ e kadar
W	15’ e kadar
C	1’ e kadar
Diğer elementler	Zr 2,25’ e kadar, B az miktarda, Y, Re

Normal olarak Co esaslı süper alaşımlar ısıtılma işlemine tabi tutulmazlar; ancak kaynak yapmak veya işlemek gerektiğinde bu kural bozulabilir. Co esaslı süper alaşımların son yıllarda en çok tercih edilen süper alaşımlar olmalarının başlıca sebepleri aşağıda verilmiştir.

- Ergime sıcaklıkları oldukça yüksektir ve düzgün bir kopma eğrisi gösterir. Yüksek sıcaklıklarda Fe ve Ni esaslı süper alaşımlardan daha çok yüksek dayanım gösterirler.
- Bileşimlerdeki yüksek krom nedeniyle mükemmel sıcak korozyon direncine sahiptir. Gaz türbin atmosferinde kullanım için ideal malzemelerdendir.
- Ni esaslı süper alaşımlara göre daha çok termal yorulma direnci ve kaynak edilebilirlik gösterir.

Kobalt esaslı süper alaşımlar, katı çözelti ve karbür safhaları ile kuvvetlendirilmişlerdir. Karbür safhası kuvvetlendirilmesine bağlı olarak %0,4 ila %0,85 karbon içerirler. Kobalt esaslı malzemelerin dayanımı genelde yapı içerisinde oluşan karbürlerden elde edilmektedir. Bu nedenle malzeme içerisindeki C miktarı oldukça yüksektir. $M_{23}C_6$ karbürleri en göze çarpan karbürlerdir. Ni haricindeki bütün elementler karbür yapımına yardımcı olur. Bazı elementlerin kobalt esaslı süper alaşımlara etkileri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Alaşım elementlerinin kobalt esaslı süper alaşımlara etkileri

Element	Etki
Cr	Oksitlenme ve sülfürlenme direncini artırır, $Cr_{23}C_6$ ve Cr_7C_3 türü karbür oluşturur.
Mo-W	Katı eriyik oluştururlar, M_6C karbürü ve Co_3 türü metaller arası bileşikler yaparlar.
Ta-Cb	Katı eriyik sertleştiricilerdir, MC ve M_6C karbürleri ve Co_3M metaller arası bileşikler yaparlar.
Al	Oksitlenme direncini artırır, CoAl metaller arası bileşiği yapar.
Ti	MC türü karbür oluşturur, Co_3Ti metaller arası bileşiği yapar, yeterince Ti varsa Ni_3Ti oluşturur.

Kobalt katı çözeltili alaşımlar kullanım alanına göre üç alt gruba ayrılırlar.

a) Haynes 25, Haynes 188, UMCo-50 ve S-816 dâhil olmak üzere 650 ila 1150 °C arasında kullanılan alaşımlar,

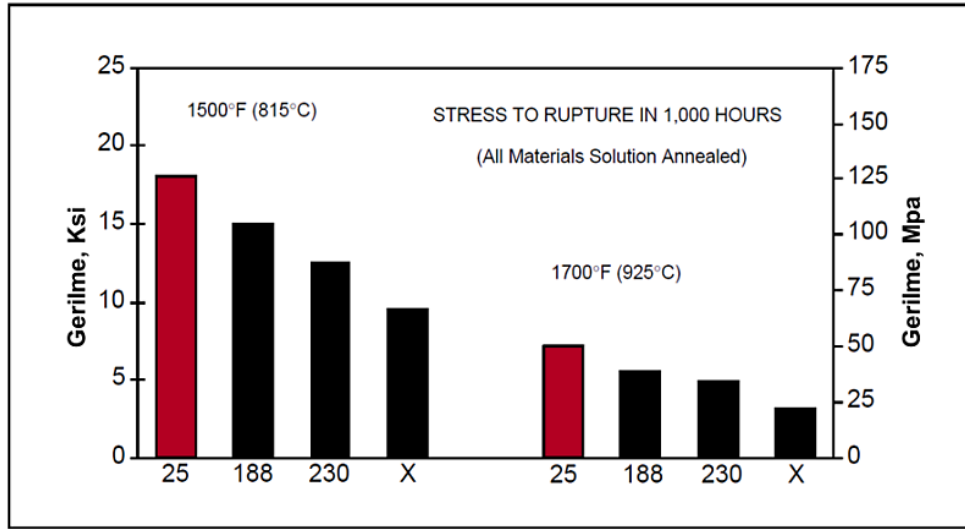
- b) 650 °C civarında kullanılan ve MP-35N ve MP-259 bağlayıcı alaşımlar,
- c) Aşınma dirençli Stellite 6B alaşımlardır.

Sıcak işlenmiş bütün alaşımlar YMK kristal yapısına sahiptir. Fakat MP-35N ve MP-159 alaşımları servis uygulamalarından önce tavsiye edilen termo mekanik işleme süresince kapalı hekzagonal yapılar geliştirirler. Kobalt esaslı süper alaşımların hiçbirisi tam bir katı çözelti alaşımı değildir. Çünkü hepsi ikinci karbür safhası veya intermetalik bileşikler içerirler. Yaşlanma, genellikle oda sıcaklığında kayba yol açan ilave ikinci safha çökeltisine neden olur [140].

Haynes 25 diğer adıyla L 605 süper alaşımı, kobalt-nikel-krom ve tungsten alaşımlarının bileşimiyle mükemmel bir yüksek sıcaklık dayanımı ve 980 °C'ye kadar iyi bir oksidasyon direnci sağlamaktadır. Bu süper alaşım geleneksel yöntemlerle üretilmekte ve döküm parçalarında kullanılmaktadır. Haynes 25 iyi bir kaynak özelliğine sahiptir. Haynes 25, yaygın olarak havacılık ve uzay sanayisi, ticari ve askeri alanda kullanılan gaz türbinli motorların sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, nükleer reaktör parçalarında ve soğuk çalışma şartlarında kullanılabilen işlenebilen kobalt esaslı bir alaşımdır. Ayrıca bu alaşım bilyalar için yatak malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Haynes 25 katı çözültüli güçlendirilmiş bir süper alaşımdır ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımı mükemmeldir. Özellikle 650 °C – 980 °C sıcaklıklarda uzun süreli uygulamalarda özelliğini kaybetmeden oldukça etkili kullanılmaktadır. Bu alaşım nikel esaslı katı çözültüli güçlendirilmiş alaşımlardan ve kobalt esaslı diğer süper alaşımlardan daha güçlüdür. Levha tipi kobalt esaslı süper alaşımların kopma direncinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 3.3'de verilmiştir. Soğuk çalışma şartlarında sertliğini ve dayanımını muhafaza etmektedir.

Haynes 188 ise özellikle gaz türbinlerindeki yaprak tabaka halindeki parçalar için tasarlanmış lantan, silikon, alüminyum ve manganez içeriklerini kontrol edebilen basit oluşumu ile 1100 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda oksidasyon dayanımı olarak mükemmel kalite sunar. MP-35N ve MP-159, özellikle sertleştirilmiş olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve her iki alaşım da, zor çalışma şartlarında yüksek dayanıma sahiptir. MP-35N ve MP-159 daha çok bağlar için kullanılmıştır; MP-159, 650 °C'lik üst çalışma sınırına sahiptir. Yüksek sıcaklığa ait son grup olan, katı çözültü takviyeli kobalt alaşımlar, Stellite 6B denilen tek bir alaşım içerir. Bu alaşım yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyona nispeten iyi dayanım gösterir. Sıcak sertliği, karmaşık karbür oluşumların sayesinde elde

edildiği yüksek krom içeriğinden bu özellik türetilmiştir. Stellite 6B, buhar türbinlerinde erozyon kalkanı, gaz türbinlerinde aşınma pedleri, yüksek sıcaklık ve yüksek hızlarda partikül taşıyan tüp sistemlerinde bağlantı parçası olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. X-40, WI-52, MAR-M 302 ve MAR-N509 gibi karbür safha takviyeli süper alaşımlar, öncelikle, statik pervane uygulamaları olmak üzere yoğun olarak türbin motor hava folyolarında kullanılmaktadır. Bu alaşımlar yeterli derecede yüksek sıcaklık dayanımına, oksidasyon ve kaynakla tamir edilebilme yeteneğine sahiptirler [142].



Şekil 3.3. Levha tipi kobalt esaslı süper alaşımların kopma direncinin karşılaştırılması

4. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

İmalat işlemi; teknolojik, ekonomik ve tarihsel olarak oldukça önemlidir. İmalat yöntemi bir hammaddeye şekil vermek için uygulanan fiziksel olay; takım, imalat işlemini gerçekleştiren araç; tezgâh ise ürünün şekillendirilebilmesi için gerekli mekanik hareketi sağlayan makinadır. Günümüzde kullanılan imalat yöntemleri, mekanik ve fiziksel-kimyasal olmak üzere iki büyük gruba ayrılabilir. Bunlardan en önemlisi olan mekanik imalat yöntemlerini talaşlı ve talaşsız olmak üzere iki başlık altında toplamak mümkündür. Talaşsız imalat, malzeme üzerinden talaş kaldırmadan yapılan şekillendirme işlemidir. Günümüzde kullanılan talaşsız imalat yöntemleri genel olarak, döküm, dövme, soğuk/sıcak çekme, ekstrüzyon ve sac metal işleme olarak ayrılabilir. Talaşsız imalat yöntemleri çok kısa bir sürede gerçekleşmesine rağmen yüzey, boyut ve kalite bakımından istenilen kaliteyi sağlayamamaktadır. Bu nedenle talaşlı imalat yöntemleri oldukça önemlidir. Talaşlı imalat yöntemleri, tornalama, frezeleme, matkapla delme ve taşlama olarak genelleştirilebilir. Talaşlı imalat işleminde iş parçasını istenilen geometriye getirmek için, hammadde formu ve istenilen geometriye bağlı olarak, üzerindeki fazlalıklar uygun takım tezgâhı, kesici takım ve kesme parametreleri kullanılarak alınır. Talaş kaldırmak suretiyle, istenilen ölçü, tolerans ve yüzey kalitesinde üretilirler. Uzay ve havacılık, otomotiv ve kalıp gibi endüstriyel alanlarda çoğu ürüne, son şekli talaşlı imalat işlemleriyle verilir [148]. Talaşlı imalat işleminde etkin olan kesme hareketi iş parçasının kesici takım önündeki plastik deformasyonunu ve deforme olan bu katmanın talaşa dönüşmesini gerektirir. Bu yöntem çoğunlukla metalleri şekillendirmek için uygulansa da diğer bazı malzemeler de aynı yöntemle şekillendirilebilir [149].

Talaşlı imalat işlemlerini önemli kılan nedenlerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Talaşlı imalat yönteminde birçok farklı iş parçası malzemesi kullanılabilir. Genel olarak bütün metaller işlenebilir.
- Talaşlı imalatla farklı geometriye sahip parçalar rahatlıkla elde edilebilir.
- Talaşlı imalat ile çok dar toleranslı ölçüler elde edilebilir. Bazı talaşlı imalat yöntemleri ile diğer imalat yöntemlerine göre daha dar toleranslarda ölçüler elde edilebilir.
- Talaşlı imalat ile çok iyi yüzey kalitesi elde edilebilir.

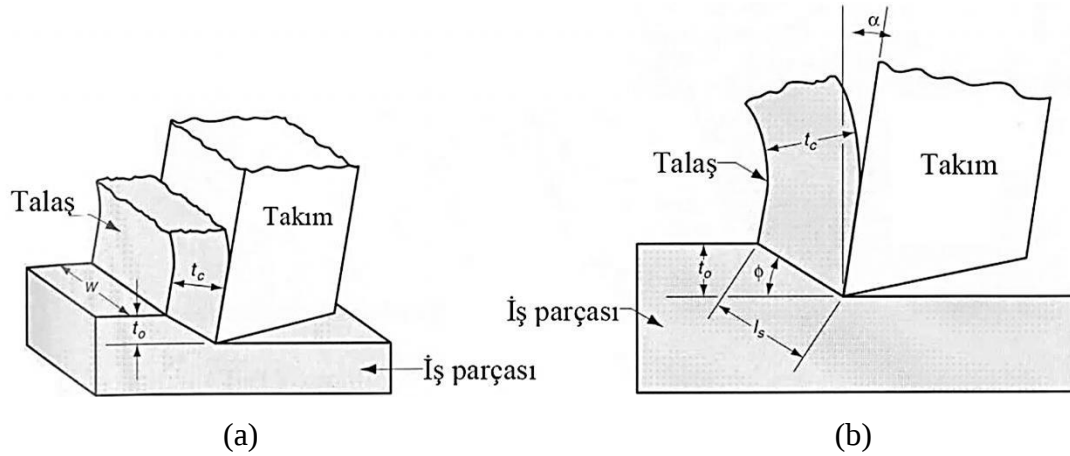
- Birden fazla işleme operasyonunun arda arda uygulanmasıyla birçok karmaşık biçim ve zorluktaki şekiller elde edilebilir.

Talaşlı imalat işlemlerinin çok önemli avantajları olmasına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Örneğin talaşlı imalat ile doğal olarak iş parçası malzemesi, kaldırılan talaşlar nedeniyle atık malzeme niteliği kazanır. Bu talaşlar geri dönüştürülebilir olmasına rağmen her bir operasyon için bir maliyet getirir ve ekonomik bir bakışla israfa neden olurlar. Ayrıca talaşlı imalat operasyonları verilen parça şekli için, dövme ve döküm gibi alternatif yöntemlere göre genellikle daha fazla üretim süresi gerektirirler.

4.1. Talaş Kaldırma Mekanîği

Talaş kaldırma işlemi, elastik, plastik ve şekil değiştirmeye dayanan sürtünme, ısı oluşumu, talaşın kırılması ve büzülmesi, işlenen parçanın yüzeyinin sertleşmesi, takım ucunun aşınması gibi olayların meydana geldiği karmaşık fiziksel bir işlemdir. Bir malzemenin üzerinden belirli bir malzeme tabakasının kaldırılması için, takımın o malzemeye nüfuz etmesi gerekir. Bu da, ancak takıma uygulanan kuvvetlerin yeterli ve takım malzemesinin parça malzemesinden daha sert olması halinde gerçekleşir [150]. Talaşlı imalat işlemi gerçekte üç boyutlu ve oldukça karmaşık olduğundan bu işlemin mekanîğinin tanımlanmasında iki boyutlu dik kesme modeli kullanılır (Şekil 4.1). Bu yaklaşım basit olmakla birlikte talaşlı imalat mekanîğini yeterli doğrulukta tanımlar. Dik kesme modeline göre, kesici takımın iş parçasına temas ettiği noktada önce elastik sonra plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Sonra kesme parametreleri ve kesici takım geometrisine bağlı olarak farklı açılarda kayma düzlemi oluşur. Daha sonra iş parçasını oluşturan tanelerin, elastikiyet modülüne bağlı olarak, taneler arası yer değiştirmesi ve kayma gerilmesinin aşılmasıyla talaş oluşumu gerçekleşir [151].

Talaşın iş parçasından ayrılması mekanik bir kopmadır; bu kopma burada kesme şeklinde gerçekleşmektedir. Bilindiği gibi genelde kopma sünek ve gevrek olmak üzere iki çeşittir. Sünek kopmada, kopma öncesi talaşta çok fazla plastik şekil değiştirmeler görülmektedir. Gevrek kopmada ise, kopmadan öncesi talaşta çok az plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Talaş oluşumu plastik deformasyonun önemli derecede rol oynadığı bir işlemdir. Dik kesme işlemi sırasında oluşan işleme sürecinde üç deformasyon bölgesi oluşmakta olup bunlar Şekil 4.2’de görülmektedir.

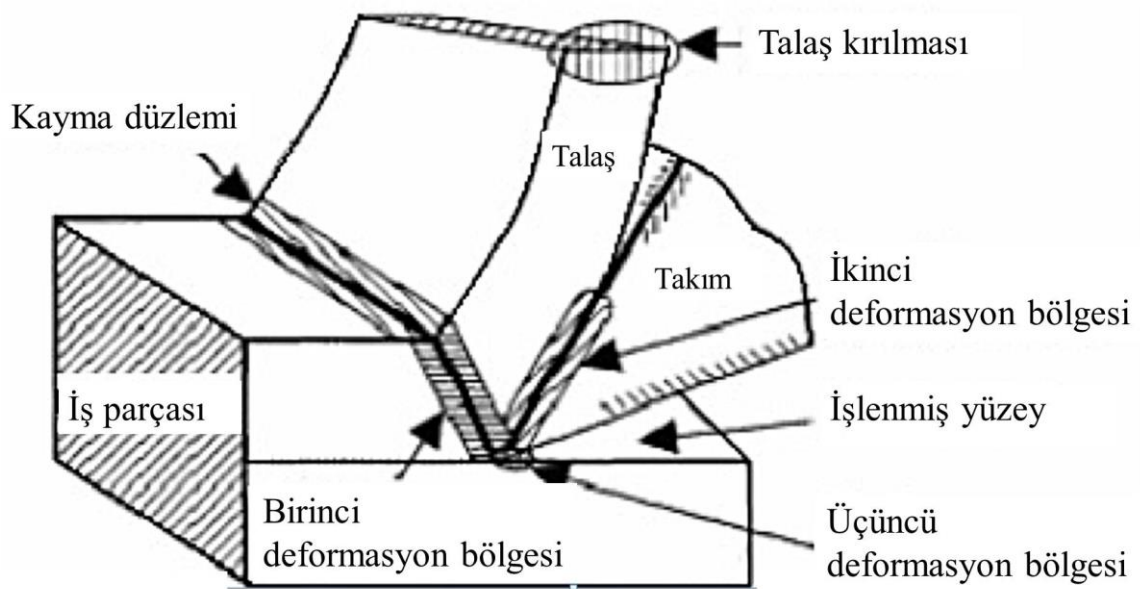


t_o : deforme olmamış talaş kalınlığı
 t_c : deforme olmuş talaş kalınlığı
 w : iş parçası genişliği

l_s : kayma düzlemi uzunluğu
 ϕ : kayma düzlemi açısı
 α : kesici takım talaş açısı

Şekil 4.1. Dik kesme modeli [152] a) İzometrik görünüş b) Önden görünüş

Birinci deformasyon bölgesi, iş parçasının kesici takım önündeki hareketiyle oluşan ve kayma düzleminde meydana gelen bölgedir. İş parçası ve kesici takım arasındaki bağıl hareket sonucu iş parçasında oluşan gerilme, iş parçasını birinci deformasyon bölgesinde plastik deformasyona uğratarak talaş oluşumunu gerçekleştirir [149].



Şekil 4.2. Plastik deformasyon bölgeleri [153]

Üçüncü deformasyon bölgesi ise, işlenen yüzey ile kesici takım yan yüzeyinin teması sonucunda oluşan sürtünmenin etkisiyle meydana gelen bölgedir. Bu bölge, yüzey

pürüzlülüğünün olduğu ve işlenen yüzey üzerinde yüzey kalitesinin etkilendiği bölgedir. Birinci deformasyon bölgesindeki kayma düzleminde oluşmaya başlayan talaş, kesici takımın talaş yüzeyi üzerinden geçerken kayma veya yapışma sonucu ikinci defa deformasyona uğrar. Bu bölgeye, ikinci deformasyon bölgesi adı verilir ve talaş kesme bölgesinden atılır. İkinci deformasyon bölgesinin kalınlığı gerilme, gerinim ve sıcaklıktan çok fazla etkilenir. Bu nedenle ikinci deformasyon bölgesi, en fazla kayma gerilmesi, en fazla kayma gerinim oranı ve talaştaki sıcaklığın en yüksek olduğu yer olarak varsayılmaktadır.

4.2. Takım Talaş Ara Yüzeyi ve Yığıntı Talaş Oluşumu

Talaş kaldırma işlemi esnasında birinci deformasyon bölgesinden ayrılan talaş, kesici takımın talaş yüzeyinden geçerek kesme bölgesinden atılır. Talaşın takım yüzeyi bölgesinden geçerken etkileşimi talaş kaldırma performansını önemli derecede etkiler. Bazı analizler de kesici takım ve talaş arasında klasik sürtünme olduğu kabul edilse de, yapılan metalürjik incelemeler neticesinde durumun böyle olmadığı ve takım ile talaş arasında bir yapışma olduğu görülmüştür [154]. Takım-talaş ara yüzeyinde yapışma sonucu akma bölgesi daima kesici takım yüzeyinde oluşmaz. Alternatif bir özellik olan yığıntı talaş, talaşlı imalat işlemlerinde sıkça görülür. Yığıntı talaş dinamik bir yapıya sahiptir. Metal kesme işlemi esnasındaki zor şartlarda sertleşen katmanların kümelenmesiyle oluşur ve belirli bir yüksekliğe ulaştıktan sonra talaş akışının neden olduğu kayma kuvvetlerine daha fazla dayanmayacağı için talaş veya iş parçası vasıtasıyla kesici uçtan uzaklaşır. Yığıntı talaş, kesici uçtan uzaklaştırıldıktan sonra tekrar oluşmaya başlar, bu şekilde periyodik olarak oluşum ve kırılma devam eder, bu kararsız (unstable) yığıntı talaştır. Çoğunlukla orta ve düşük seviyedeki kesme hızlarında görülen kararlı (stable) yığıntı talaş ise, yapılarında birden fazla faz bulunduran alaşımların işlenmesinde, pekleşen iş parçası malzemesinin kesici takım talaş yüzeyinde ve kesici uç etrafında kümelenerek talaşın kesici takımla doğrudan temasını engeller. Yığıntı talaş oluşumu ile yoğun ve hızlı kayma deformasyonu takım yüzeyinden yığıntı talaş yüzeyine taşınır. Yığıntı talaş oluşumunun gerçekleştiği sıcaklık iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının altındadır. Yığıntı talaşın yapısı yeniden kristalleşmeye maruz kalmış akma bölgesinin yapısından tamamen farklıdır. Yığıntı talaşın kesici takım yüzeyinden atılması esnasında bir kısım kesici takım malzemesi veya kesici takım üzerinde yer alan kaplama malzemesi de yığıntı talaşla birlikte kopup gidebilir. Bazı durumlarda yığıntı talaş kesici uç üzerinden iş parçası

malzemesine doğru çıkıntı oluşturarak talaş derinliğini artırır ve bu çıkıntı düzensiz bir yapıya sahip olacağı için yüzey pürüzlülüğünü artırır. Yığıntı talaşın şekli, özellikle kesici takım talaş açısını ve talaş derinliğini etkiler. Yığıntı talaş, talaşlı imalat işleminde çeşitli durum ve biçimlerde görülen ve genelde olumsuz kabul edilen bir faktördür ve oluştuğu kesme şartları değiştirilerek çoğunlukla oluşumu engellenebilir [151].

4.3. Talaş Şekilleri

Talaş, tabakanın parçadan ayrılma şekline, iş parçasının malzeme özelliklerine ve işleme parametrelerine bağlı olarak farklı şekillerde gerçekleşir. Talaş kaldırma işlemlerinde oluşan talaşlar çok çeşitli olmasına rağmen genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

- Kesintili (süreksiz) talaş
- Akma (sürekli) talaş
- Yığıntı (BUE) talaş
- Yarı kesintili (parçalı) talaş

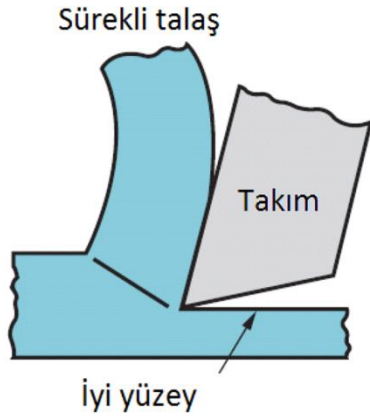
Kesintili talaş; dökme demir gibi diğer malzemelere göre gevrekliği yüksek malzemeler düşük kesme hızlarında işlendiğinde talaşın bölüm bölüm oluştuğu tiptir. Bu durum işlenmiş malzeme yüzeyinde düzensiz doku oluşmasına sebep olur. Takım ile talaş arasında oluşan yüksek sürtünme, ilerleme ve pasonun fazla oluşu talaşın kesintili talaş (Şekil 4.3) şeklinde oluşmasına katkı sağlar [149, 155].



Şekil 4.3. Kesintili talaş [149, 155]

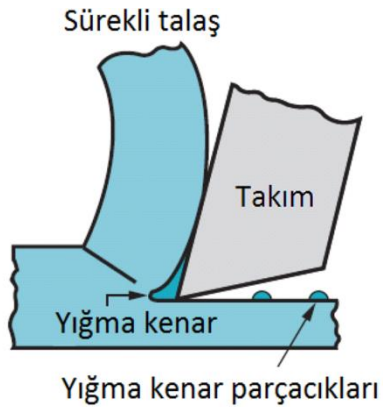
Sürekli talaş; sünek malzemeler yüksek kesme hızlarında, düşük ilerleme ve talaş derinliklerinde işlendiğinde meydana gelen talaş formudur (Şekil 4.4). Bu talaş tipiyle iyi

bir yüzey kalitesi elde edilir. Kesme kenarının keskin olması ve talaş ile talaş yüzeyi arasındaki sürtünmenin az olması bu tip talaş oluşmasını destekler. Uzun talaş oluşumu, tornalama operasyonunda olduğu gibi talaşın tahliye edilmesi ve talaşın takıma sarılması gibi problemlere sebep olur. Bu problemi ortadan kaldırmak için tornalama takımları genellikle talaş kırıcılı olarak tasarlanırlar.



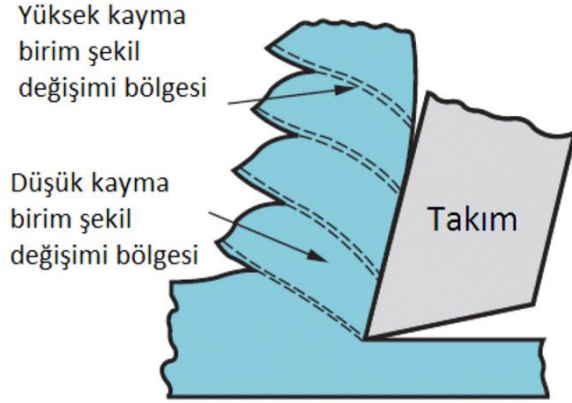
Şekil 4.4. Sürekli talaş [149, 155]

Yığıntı talaş; sünek malzemeler orta veya düşük kesme hızlarında işlendiğinde, takım ile talaş arasındaki sürtünmeden dolayı iş parçası malzemesinin bir kısmının kesme kenarı yakınındaki talaş yüzeyi üzerine bağlanması ile oluşur. Yığıntı kenar oluşumu periyodik olarak devam eder (büyür ve kopar). Birçok durumda yığıntı kenar oluşumu, talaş ile uzaklaştırılır. Bazen, takımın talaş yüzeyinin bir kısmının da aşınmasına neden olur. Bu durum takım ömrünün kısılmasına yol açar. Talaş ile uzaklaştırılamayan yığıntı talaş parçacıkları yeni oluşturulan yüzey üzerine tutunarak yüzey kalitesini düşürür (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Yığıntı talaş [149, 155]

Yarı kesintili talaşlar; yüksek kayma birim şekil değişiminin ardından düşük kayma birim şekil değişiminin periyodik olarak etkimesiyle oluşur (Şekil 4.6). Bu talaş tipi, talaşlı imalatı zor olan titanyum alaşımları, nikel esaslı süper alaşımlar ve östenitik paslanmaz çelikler gibi metallerin yüksek kesme hızlarında işlenmesinde ortaya çıkar.



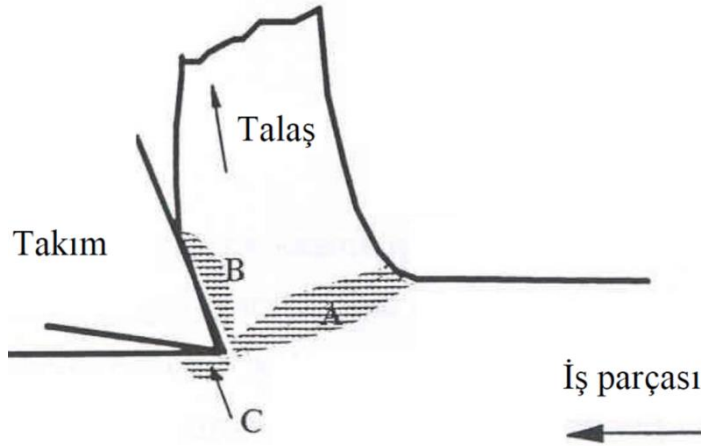
Şekil 4.6. Yarı kesintili talaş [149, 155]

4.4. Talaşlı İmalat İşleminde Isı ve Sıcaklık

Talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan mekanik yüklerin ve sürtünmenin hemen hemen tamamı ısı enerjisine dönüşür. Bu nedenle talaşlı imalat işlemlerinde dikkat edilmesi gereken en önemli faktörlerden biri de ısı oluşumu ve kesme bölgesindeki sıcaklıklardır. Oluşan ısı sonucu sıcaklık artışı kesici takım performansını ve iş parçası kalitesini etkiler [151, 156]. Kesme bölgesinde ısı üretme kapasitesine göre ısı oluşturan üç bölge vardır (Şekil 4.7).

Bu bölgeler:

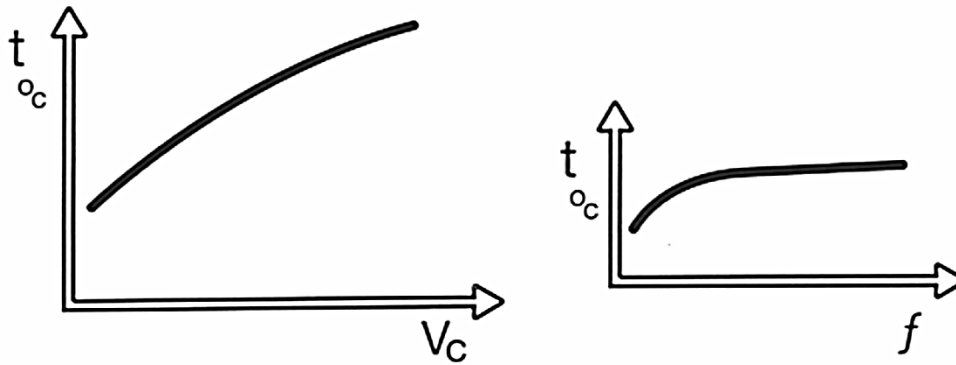
- A - Kayma düzlemi; buradaki plastik deformasyon önemli bir ısı kaynağı olup oluşan ısıнын çoğu talaşta kalır.
- B - Takım-talaş ara yüzeyi temas bölgesi; oluşan ilave plastik deformasyon ve kayma hareketinden dolayı ısı oluşumunda önemli derecede etkili bir bölgedir.
- C - Takım yan yüzeyi, burada yeni oluşan iş parçası yüzeyinin takım yüzeyine sürtünmesiyle ısı oluşur. Özellikle bu sürtünme yan yüzey aşınması ile artar.



- A - Esas ısı bölgesi (I. deformasyon bölgesi)
 B - İkinci ısı bölgesi (II. deformasyon bölgesi)
 C - Boşluk yüzeyi ısı bölgesi (III. Deformasyon bölgesi)

Şekil 4.7. Kesme bölgesinde ısı oluşumu [151]

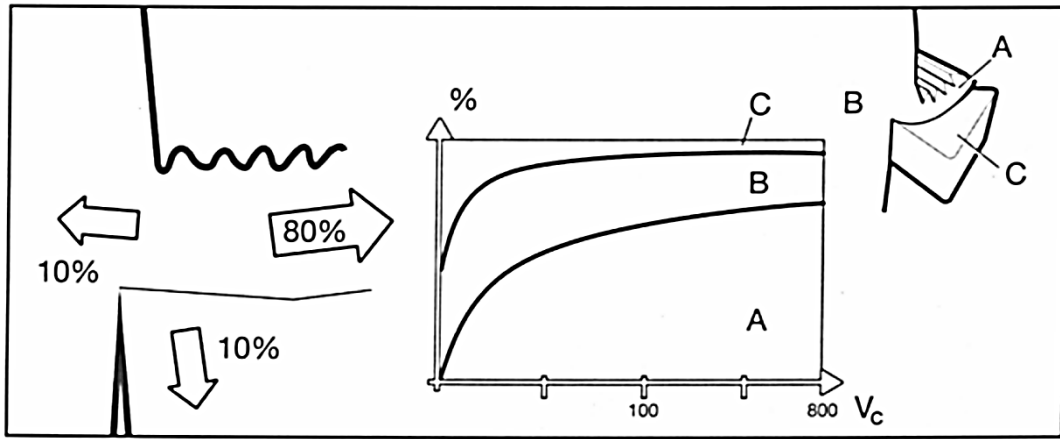
İşleme esnasında ortaya çıkan ısı kesme kuvvetleri gibi işlenen iş parçası malzemesine göre farklılık gösterir. Kesme hızı ısı oluşumu üzerinde çok önemli bir rol oynar. Kesme hızının artmasıyla metal kesme işlemindeki deformasyon ve sürtünme için kullanılan birim zamandaki enerji artar ve bu da ısıyı ve dolayısıyla sıcaklığı artırır. İlerlemenin, kesme hızına nazaran ısı oluşumuna etkisi daha azdır (Şekil 4.8) [151, 156].



Şekil 4.8. Kesme hızı-sıcaklık ile ilerleme-sıcaklık ilişkisi [156]

Takım ömrünün kısılmasına sebep olan yüksek işleme sıcaklıkları yüksek kesme hızlarında çalışmaya da engel olmaktadır. Kesici takım malzemelerinin geliştirilmesi, büyük bir oranda yüksek sıcaklık etkilerine dayanabilmeleri etrafında odaklanmıştır. Kesme bölgesindeki sıcaklık büyük oranda takım ile talaş arasındaki temasa, kesme kuvvetlerinin büyüklüğüne ve iş parçası ve kesici takım arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Bu durumda düşük kesme hızları, iş parçasına iletilen ısıyı ve dolayısıyla sıcaklığı artırabilir.

İşleme esnasında oluşan ısının büyük bir bölümü talaş ile kesme bölgesinden uzaklaştırılır (Şekil 4.9). Talaştaki ısı kesici takım ile temasta olduğu sürece sadece kesici takımı etkileyecektir. Oluşan ısının büyük bir çoğunluğu kayma bölgesinde oluşur, dolayısıyla talaş ile kesici arasındaki temas uzunluğu takımın performansını etkiler. Küçük talaş açılarından kaynaklanabilen küçük kayma açıları iş parçasına iletilen ısı miktarını artırabilir. Akış bölgesi boyunca ısıya dönüşen enerji daha azdır. Takım ile talaş arasındaki erimiş haldeki ince tabaka, yeni oluşmuş talaşın sürekli akışı ve kayma işleminden etkilenir. Üçüncü ısı kaynağını teşkil eden, takım ile işlenmiş yüzey arasında oluşan ısının mümkün olduğunca düşük tutulması gerekir ki bu yeterli boşluk açısı bırakılarak ve serbest yüzeydeki aşırı aşınmanın önüne geçilerek sağlanabilir. Eğer bu sağlanmazsa yüksek sıcaklıklar ve bunun sonucunda ani takım kırılmaları meydana gelecektir [151, 156].

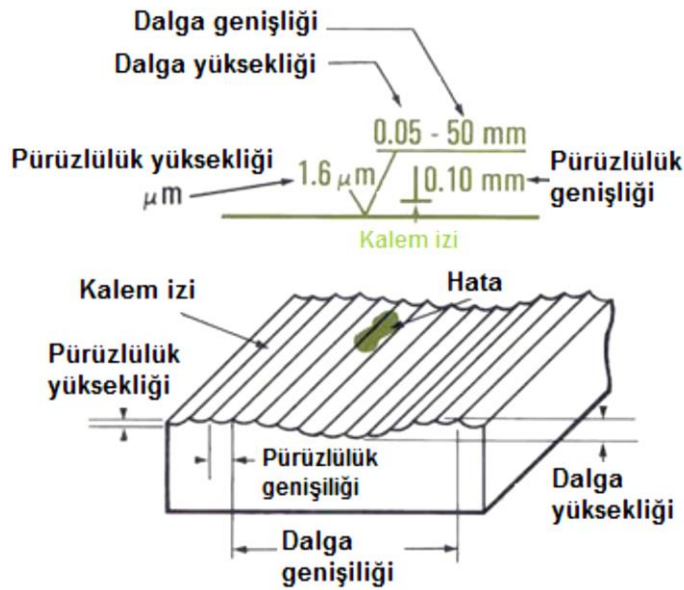


Şekil 4.9. Talaşlı imalat işleminde ısı dağılımı [156]

4.5. Yüzey Pürüzlülüğü

İşlenmiş parçaların yüzey kalitesinin asıl göstergesi yüzey pürüzlülüğüdür ve işlenebilirlik değerlendirmelerindeki en önemli kriterlerden birisidir. Kesici bir takımın, iş parçası yüzeyinin bir ucundan diğer ucuna gitmesiyle oluşan pek çok çizikli, düzensiz kısa dalga boyu uzunluklarına pürüzlülük adı verilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü temelde takım geometrisi (uç radyüsü, kesme kenar geometrisi, boşluk açısı vs.) ve kesme şartları (ilerleme hızı, kesme hızı, kesme derinliği vs.) gibi işleme parametrelerinin yanında malzemenin özelliklerine de bağlıdır [149]. Parçanın kullanım amacı, malzemesi, önceki imalat işlemleri (ısıl işlem vb.) son yüzey kalitesine etki eder. Her talaş kaldırma yönteminde elde edilebilecek yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü değeri farklıdır. Yüzey

pürüzlülük değerinin doğru seçimi, malzeme, enerji ve işçilik maliyetlerine doğrudan etki eder. Hatalı seçilen bir yüzey pürüzlülük değeri, çoğu kez parçanın reddedilme gerekçesi olabilir. Yüzey pürüzlülüğü; yaygın olarak aritmetik ortalama değeri (R_a) ve kareköklerin ortalaması (R_q) olmak üzere iki metotla belirlenir. R_q pürüzlülük ölçmede büyük sapmaları hesaba kattığı için gerçeğe daha yakın olmakla beraber, R_a daha pratiktir. Yüzey pürüzlülüğü ölçmekte kullanılan en yaygın cihaz, profilometre adı verilen yüzey pürüzlülük ölçme aletidir. Cihaz bir izleyici kafa ve bir sinyal yükseltici/kuvvetlendiriciden oluşur. İzleyici kafada uç yarıçapı 0,013 mm olan bir elmas iğne vardır. Yüzeyde izleyici kafa otomatik olarak gezdirilir. Yüzeydeki pürüzlülüğün kaynaklanan iğne hareketleri izleyici kafa tarafından elektrik dalgalarına çevrilir. Bu sinyaller yükseltici tarafından büyütülür ve cihaza kaydedilir. Göstergedeki değerler referans çizgisine göre yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalamasını (R_a) veya düzeltilmiş yüzey pürüzlülük değerlerini (R_q) (ortalamanın karekökü) verir. Yüzey pürüzlülüğü karakteristikleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



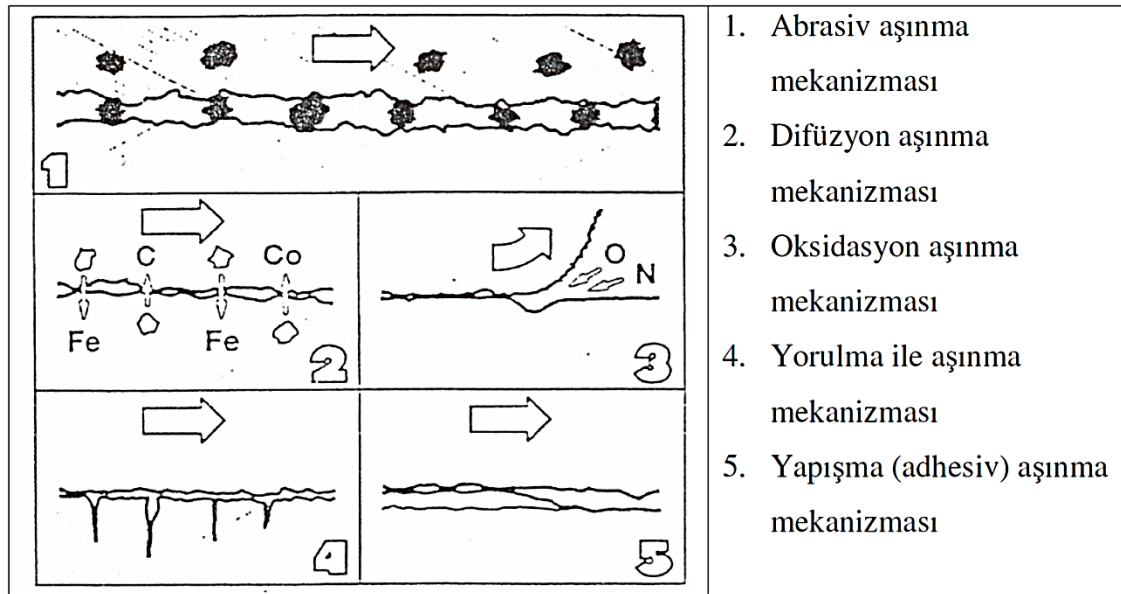
Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü karakteristikleri [149]

4.6. Kesici Takım Aşınması

Talaş kaldırma işlemleri sırasında, kesici takımların, belli bir süre çalıştıktan sonra, kesme işlemini gerçekleştiren yüzey veya kenarlarında meydana gelen malzeme kaybından dolayı kesme yetenekleri azalır veya ortadan kalkar. Bu durum kesici takım aşınması olarak ifade

edilir. Talaş kaldırma işlemi esnasında kesici takımın aşınması aşağıdakilerden biri veya birkaçının aynı anda gözlenmesiyle anlaşılır [157]:

- Kesme kuvvetlerindeki aşırı yükselme
- Sıcaklık artışı
- Aşırı titreşim
- Yüksek gürültü
- İşlenen malzeme boyutlarındaki değişim
- İşlenen yüzeyin bozulması



Şekil 4.11. Temel aşınma mekanizmalarının şematik olarak gösterilmesi [157]

Takım aşınması, kesici kenar üzerine gelen çeşitli yüklerin etkisi ile meydana gelen malzeme kaybı ve kesicide ortaya çıkan geometrik değişikliktir. Aşınmaya sebep olan yük faktörleri kesici kenar ömrünü ve kenar geometrisini değiştirmeye çalışır. Bu faktörler; mekanik, termal (ısı), kimyasal ve aşındırıcı faktörlerdir. Talaş kaldırma sırasında kesici kenar üzerinde etkili olan yük faktörlerinin etkisiyle bazı temel aşınma mekanizmaları talaş kaldırma işlemini etkilemektedir. Temel aşınma mekanizmalarının davranışları Şekil 4.11’de verilmiştir.

4.6.1. Aşınma mekanizmaları

Abrasiv aşınma mekanizması: En çok görülen aşınma mekanizmalarındandır. Genelde iş parçası içinde bulunan sert parçacıklar abrasiv aşınmaya sebep olur. Sert parçacıklar iş parçası ile kesici kenar arasına geldiğinde taşlama benzeri bir durum olur ve kenarda aşınmalar başlar [154, 157].

Difüzyon aşınma mekanizması: Çıkan talaşın takım talaş yüzeyi ile teması sürecinde sıcaklık artar ve difüzyona sebep olur. Bu sebeple takım-talaş ara yüzeyinde her iki yöne gerçekleşen atomik düzeydeki yayılım ile takım malzemesi mikro yapısal değişime uğrar. Bu değişim çoğunlukla sıcaklığa bağlıdır. Bu durum yüksek kesme hızında daha fazla görülür. Yayılım; çelikten takım içine demir transferi ve karbonun talaşa difüzyonu şeklinde olmaktadır [154, 157].

Oksidasyon aşınma mekanizması: Genelde metal malzemeler için yüksek sıcaklık ve havanın varlığı oksidasyonu artırır. Oksidasyon, tungsten ve kobaltta talaş tarafından daha kolay kazanıp uzaklaştırılabilen gözenekli oksit filmi şeklinde oluşur. Kesici kenarla parçanın ara yüzeyinde, talaş genişliğinin bittiği yerde hava talaş sürecine katılma imkânı bulur ve bu bölgede tipik çentiklerin oluşmasına neden olur [154, 157].

Yorulma ile aşınma mekanizması: Isıl-mekanik bir olaydır. Kesme bölgesinde sıcaklıktaki düzensiz değişimler ve kesme kuvvetlerindeki dinamik değişimler kesici kenarda çatlama ve kırılmalara sebep olur. Yetersiz tokluk sebebiyle talaş kaldırma sırasında kesiciden küçük parçaların kopmasıyla oluşan bir aşınma mekanizmasıdır. Aralıklı kesme işlemi kesici ucun sürekli olarak ısınıp soğumasına ve kesme bölgesinde kesici kenarda şok etkilerine sebep olur. Yapışık talaşın altında kaldığından tespiti zordur [154, 157].

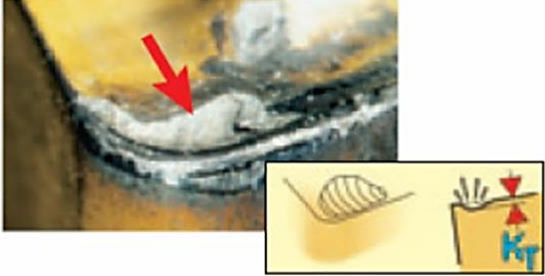
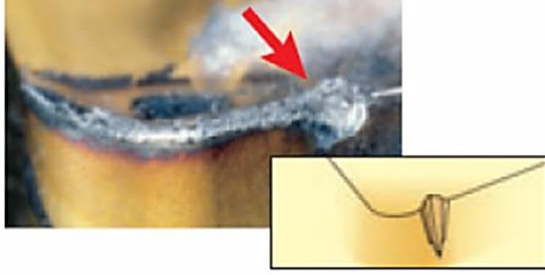
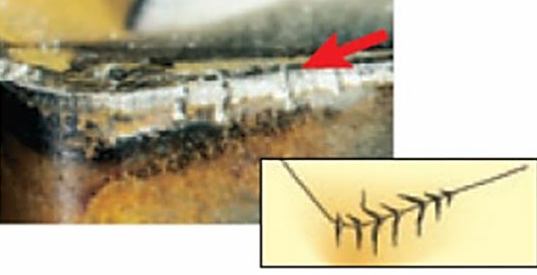
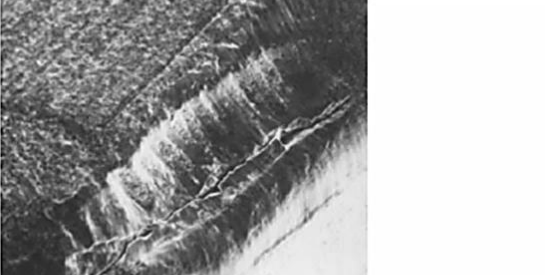
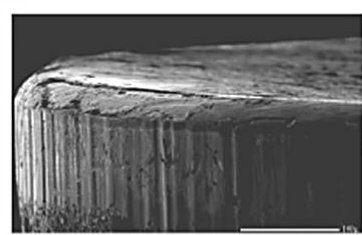
Yapışma (adesiv) aşınma mekanizması: Takım-talaş ara yüzeyinde düşük sıcaklıklarda oluşur. Akma veya kısa talaş veren malzemelerin tamamında görülebilir. Bu mekanizma genellikle kesici kenar ile talaş arasında, kenar üzerinde yığılmış talaş (BUE) oluşmasına yol açar. Dinamik bir yapısı vardır. Birbirini takip eden talaş katmanları talaş yüzeyine kaynaklanarak sertleşir ve kesici kenarın bir parçası halini alır. Oluşan BUE tabakası yırtılıp kopar ve yenisi oluşur. Bu kopmalar sırasında kesici kenardan parçalar da kopmaya

başlar. Yüksek sıcaklıklarda yapışma olayı önemli ölçüde ortadan kalkar. Yapışan tabaka takım geometrisini değiştirdiğinden kesme kuvvetlerini de değiştirir [154, 157].

4.6.2. Aşınma tipleri

Belirtilen aşınma mekanizmaları sebebiyle meydana gelen aşınma tiplerinin sınıflandırılması, işleme tipi, malzeme için doğru işleme şartları ile takım sınıfının belirlenmesinde ve dolayısıyla kesme işleminin optimizasyonu için önemlidir [149]. Aşağıda kesici takımlarda görülebilen aşınma tipleri verilmiştir.

- Yanak aşınması: Abrasiv, adheziv ve yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
- Krater aşınması: Abrasiv ve difüzyon aşınma mekanizmasıyla oluşur.
- Plastik deformasyon: Yüksek sıcaklıkta takımın plastik şekil değişimi ile oluşur.
- Çentik aşınması: Oksidasyon ve yapışma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
- Termal çatlaklar: Isıl yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
- Mekanik yorulma çatlakları: Mekanik yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
- Çıtlama (Çentiklenme) : Yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
- Kırılma (Kesici uç kırılması) : Plastik deformasyondan sonra oluşur.
- Yığılma-sıvanma (BUE) : Yapışma (adheziv) aşınma mekanizmasıyla oluşur.

	
Yanak Aşınması	Krater Aşınması
	
Plastik Deformasyon	Çentik Aşınması
	
Termal Çatlaklar	Mekanik yorulma çatlakları
	
Çıtlama	Kırılma
	
Yapışma	Talaş vurması

Şekil 4.12. Kesici takımlardaki aşınma tipleri [158]

4.7. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, seçilen hammadde üzerinden kesici takımla talaş kaldırmak suretiyle istenilen imalat işleminin mümkün olan en iyi verimlilikte yapılabilmesi olarak tanımlanabilir. İşleme araştırmalarının genel amacı, en iyi ürün kalitesi ve en düşük işleme maliyetinin oluşmasını sağlayan optimum kesme şartları için iş parçası-kesici takım etkileşimini araştırmaktır. Bir işleme operasyonunda işlenebilirliği ölçmek için talaşların biçiminin yanı sıra ulaşılan takım ömrü, talaş kaldırma oranı, kuvvet bileşenleri, güç tüketimi ve işlenmiş parçaların yüzey kalitesi ve yüzey bütünlüğü kullanılabilir. İşlenebilirlik, seçilen kesme şartları, kesici takım geometrisi ve özellikleri, işlenen malzemenin özellikleri ile kesme ortamı, takım tezgâhının rijitliği gibi muhtelif faktörler işleme süreci verimliliğini optimize edebilir. İşleme verimliliği, işlenen parçaların toleranslar dâhilinde ve bütünlüğünü bozmadan yüksek hızda işlenmesini sağlayacak kesici takım, kesme şartları ve takım tezgâhı kombinasyonunun doğru seçilmesiyle önemli oranda iyileştirilebilir [149]. İşlenebilirlik, ekseriyetle malzemenin özgül bir özelliği olarak algılanır. Bir iş parçasının talaşlı işleme verimini etkileyen ana faktörler, işleme süresince plastik deformasyonun değerlendirilmesi açısından önemli olup aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

İşleme şartları

- Kesme hızı,
- İlerleme miktarı,
- Talaş derinliği,

Kesici takım

- Kesici takım malzemelerinin özellikleri ve mikroyapıları,
- Takım geometrisi,
- Takım kırılma direnci,

İş parçası

- Mekanik, fiziksel ve ısı özellikler,
- Yüksek gerilme ve yüksek gerinim oranlarında mikro yapısal değişimler,
- Kesme parametreleri kadar iş parçasının mikro yapısı ve özelliklerinden etkilenen kayma düzlemi açısı ve talaş kalınlığı,
- Mekanik enerjinin dağılması süresince oluşan sıcaklık artışı.

Malzemelerin işlenebilirliklerini etkileyen malzeme özellikleri sertlik, süneklik, ısı iletkenlik, pekleşme, malzeme içindeki yapılar ve malzemenin kimyasal bileşimidir. Örnek olarak, sertlik arttıkça kesici takımda abrasiv aşınma artar ve dolayısıyla takım ömrü kısalır. Düşük sertlik ve dayanım genelde iyi işlenebilirlik anlamına gelmekle birlikte sertliği az olan çok sünek malzemelerde yıgıntılı talaş (YT; built-up edge - BUE) oluşumu gerçekleştiği için yüzey kalitesi kötüleşir ve takım ömrü kısalır. Çok düşük sertlik talaşlı imalat işleminin performansını kötü yönde etkileyebilir. Örnek olarak, nispeten düşük sertliğe sahip düşük karbonlu çeliğin işlenmesinde kötü yüzey kalitesi oluşur ve talaşın uzaklaştırılması ile ilgili problemlerle karşılaşılır. Bu nedenle, düşük karbonlu çeliklerde yüzey sertliğini artırmak ve talaş kırılmasını sağlamak için ekseriyetle soğuk çekme işlemi uygulanır. Düşük süneklik, metal kesme işleminde genelde olumlu bir etki yaparak iyi talaş oluşumuna katkıda bulunur ve metal kesme işlemi için daha az güç gerektirir. Artan iş parçası dayanımı da kesme kuvvetleri, özgül enerji ve kesme sıcaklığını artıracığı için, artan dayanımla metal kesme işlemi zorlaşır. Bununla birlikte, yüksek ısı iletkenlik kesme bölgesinden oluşan ısının hızlı olarak uzaklaştırılması demektir. Bu sebeple, yüksek ısı iletkenlik işlenebilirlik yönünden genelde faydalıdır [151].

5. MALZEME VE METOT

Bu bölüm deneysel çalışmada kullanılan iş parçasını, kesici takımı, takım tezgâhını, soğutma/yağlama sistemlerini, ölçme araçlarını ve araştırmada izlenen strateji ve yöntemleri tanımlamaktadır.

5.1. Malzeme

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme AMS 5759 spesifikasyonuna sahip kobalt esaslı Haynes 25 diğer bir adıyla L 605 süper alaşımıdır (Resim 5.1). Bu alaşımlar muhteva olarak anlamlı miktarlarda kobalt, nikel, krom ve tungstene sahiptirler ve daha az miktarda molibden, niyobyum, tantalyum, titanyum ve duruma göre de demir içerirler. Haynes 25, kobalt-nikel-krom-tungsten alaşımlarının birleşimi ile mükemmel bir yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve 980 °C'ye kadar iyi bir oksidasyon direncine sahiptir. Malzemeye ait kimyasal bileşim Çizelge 5.1'de, malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 5.2'de ve fiziksel özellikleri ise Çizelge 5.3'de verilmiştir.



Resim 5.1. Deneylerde işlenecek Haynes 25 süper alaşımından numune

Çizelge 5.1. Malzemenin kimyasal bileşimi

% Ağırlık								
C	Co	Cr	Fe	Ni	P	S	Si	W
0,10	Kalan	20,3	1,58	10,20	>0,005	0,0008	0,01	14,7

Çizelge 5.2. Malzemenin mekanik özellikleri

Ortam (°C)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama %	Gerilim (MPa)	Sertlik (HB)
Oda sıcaklığı	943	444	50		207
815 °C			36	180	

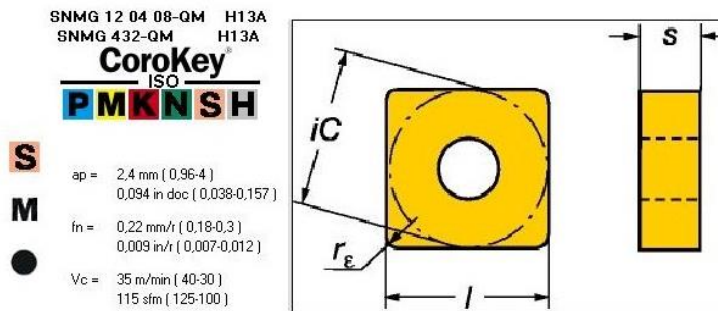
Çizelge 5.3. Malzemenin fiziksel özellikleri

Ortam sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül ısı kapasitesi (J/ kg.°C)	Isı kapasitesi (J/°C)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
20	9,13	384	400	9,8

5.2. Kesici Takım ve Takım Tutucu

5.2.1. Kesici takım

İşlenebilirlik deneylerinde, SANDVIK COROMANT firması tarafından üretilen H13A kalitesine sahip ve ISO tarafından SNMG 120408 - QM kodu ile tanımlanan kaplamasız karbür kesici uçlar kullanılmıştır (Şekil 5.1). H13 A kaplamasız bir karbür sınıfıdır. İyi abrasif aşınma direnci ve tokluğu bir araya getirir. Isıl dirençli süper alaşımların (kobalt alaşımları, titanyum alaşımları, dökme demirler ve alüminyum alaşımları) orta ve kaba tornalama işlemlerinde kullanılmaktadır. Kesici uca ait teknik özellikler Çizelge 5.4’de verilmiştir.



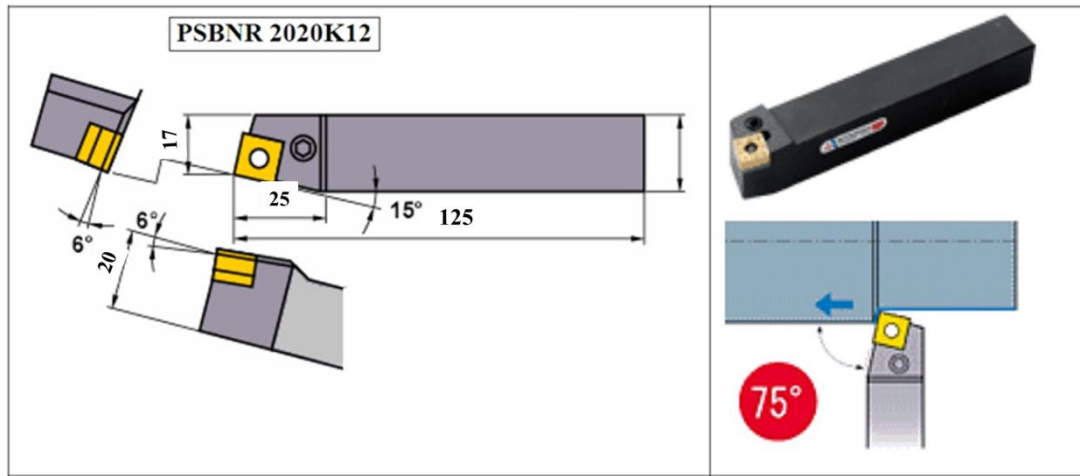
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan kaplamasız karbür kesici uç

Çizelge 5.4. Kesici uç geometrisinin teknik özellikleri

Uç açısı	Boşluk açısı	Eğim	Talaş açısı	Tolerans	Kenar uzunluğu	Uç kalınlığı	Radyüs
90°	0°	6°	-6°	0,05 mm	12 mm	4,76 mm	0,8 mm

5.2.2. Takım tutucu

İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan takım tutucu ISO 3685’te tanımlanan özelliklere ve deneylerin yapılacağı CNC tezgâhının kesici takım bağlama başlığı yuvasına uygun olarak seçilmiştir. Bu kapsamda işleme deneylerinde kullanılmak üzere “PSBNR 2020 K12” kodlu takım tutucu Sandvik Coromant firmasından tedarik edilmiştir. Tutucunun giriş açısı 75° ’dir. Kesici takım tutucunun özellikleri Şekil 5.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Takım tutucunun özellikleri [159]

5.3. Takım Tezgâhı

Deneylerde talaş kaldırma işlemleri, endüstriyel tip Falco FI-8 CNC torna tezgâhında yapılmıştır. Tezgahın teknik özellikleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. CNC torna tezgahının teknik özellikleri

Maksimum işleme boyu	560 mm
Maksimum işleme çapı	320 mm
Ayna çapı	8 "
Motor gücü	15 KW
Kızak yolu	Lineer
Hassasiyet	0,001
Takım sayısı	12
Maksimum devir sayısı	4800 rev/min

5.4. Deneylerin Yapılışı ve Strateji

Çalışmada, deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada kullanılan bütün yağlama/soğutma koşullarının (kuru, emülsiyon sıvı, MMS ve kriyojenik) ve kesme parametrelerinin ileme sürecine etkileri ve soğutma/yağlama performansları araştırılmıştır. İkinci aşamada ise kullanılan işleme parametrelerinin (soğutma yöntemi, kesme hızı ve ilerleme) işlenebilirliğe etkileri istatistiksel analizlerle araştırılmıştır.

5.5. Kesme Parametreleri ve Soğutma/Yağlama Performansı Deneyleri

Bu aşamada, işlenebilirlik deneyleri, ilk olarak kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deneyler geleneksel soğutma (emülsiyon sıvı), basınçlı hava, minimum miktarda kesme yağı ve sıvı azot ile kriyojenik soğutma şartları altında tekrarlanmıştır. Kesme derinliği ve ilerleme hızı ISO 3685'te belirtildiği üzere kesici takım uç yarıçapına bağlı olarak, verilmesi gereken değer aralığında olacak şekilde seçilmiştir. Her bir deney sabit kesme derinliğinde (1 mm) yapılmıştır.

Çizelge 5.6. Deney girdi parametreleri

Soğutma/yağlama	Kesme derinliği, a (mm)	Kesme hızı, V (m/min)	İlerleme, f (mm/rev)
Kuru	1	15	0,08 0,12 0,16
Islak (Emülsiyon)		30	
Basınçlı hava		45	
MMS (Mineral yağ)		60	
Kriyojenik			

Çizelge 5.7. Araştırmada çıktı parametrelerinin özeti

Sıcaklık	Takım aşınması	Yüzey kalitesi	Matematiksel modeller
T _c (°C)	VB (mm) VB _{max} (mm)	Ortalama yüzey pürüzlüğü Ra (µm)	T _c VB VB _{max} Ra

Kesme hızları ise üretici firma önerileri ve örnek literatür çalışmalarına bağlı olarak tespit edilmiş ve pilot deneyler neticesinde nihai hız aralıkları belirlenmiştir. Çalışmada tam faktöriyel deney tasarımı tercih edilmiştir. Deney girdi parametreleri Çizelge 5.6'da görülmektedir. Deneyler sonucunda işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğü, kesici uç aşınması ve sıcaklıklar ölçülmüştür. Deney çıktı parametreleri ise Çizelge 5.7'de verilmiştir.

5.6. Deneylerde Kullanılan Soğutma/Yağlama Yöntemleri

İşleme deneylerinde deneyler ilk olarak kuru kesme şartları altında yapılmıştır. Daha sonra Haynes 25 süper alaşımının işleme performansını arttırmak için aşağıda belirtilen soğutma/yağlama yöntemleri denemiştir.

5.6.1. Yağ + su emülsiyonu (Geleneksel soğutma) yöntemi

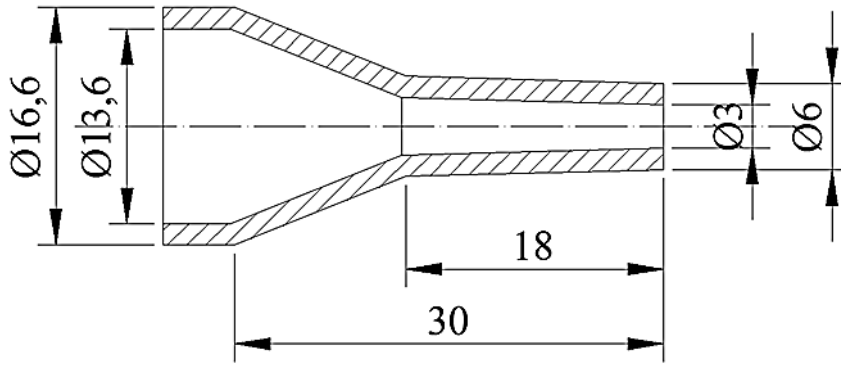
Sulu soğutma yöntemi olarak da bilinen bu yöntem de yağ+su emülsiyonu soğutma sıvısı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntem halen imalat sanayisinde en yaygın kullanılan soğutma metodu olmayı sürdürmektedir. Bu yöntemle yapılan talaş kaldırma işlemlerinde 1/20 oranında bor yağı katkılı yağ-su emülsiyonu hazırlanmıştır. Geleneksel soğutmada, tezgâhın kendi soğutma sistemi ile deneyler yapılmıştır.

5.6.2. Basınçlı hava ile soğutma yöntemi

Basınçlı hava altında yapılan soğutma düzeneği ve tornalama işleminin gösterimi Şekil 5.3'de verilmiştir. Basınçlı hava ile soğutma sisteminde kullanılan kompresör 250 litre hacimli ve en yüksek 10 bar basınçlı hava kapasiteli olarak kurulmuştur. Deneylerde kompresör hava çıkışı regülatör basıncı 6 bar'a ayarlanmış ve bu basınçtaki hava, hortum vasıtasıyla nozula iletilmiştir. Nozul ucunun kesici uç kesme kenarına uzaklığı 9,2 mm olarak sabit tutulmuştur. Bu mesafe, basınçlı hava kullanmaksızın yapılan tornalama işlemlerinde dahi çıkan talaşın nozul ucuyla temasını önleyecek uzaklıktır. Basınçlı hava, sert plastikten hazırlanmış ve Şekil 5.4'de ağız ölçüleri gösterilen nozul vasıtasıyla, bu mesafeden takım/talaş ara yüzeyine püskürtülmüştür.



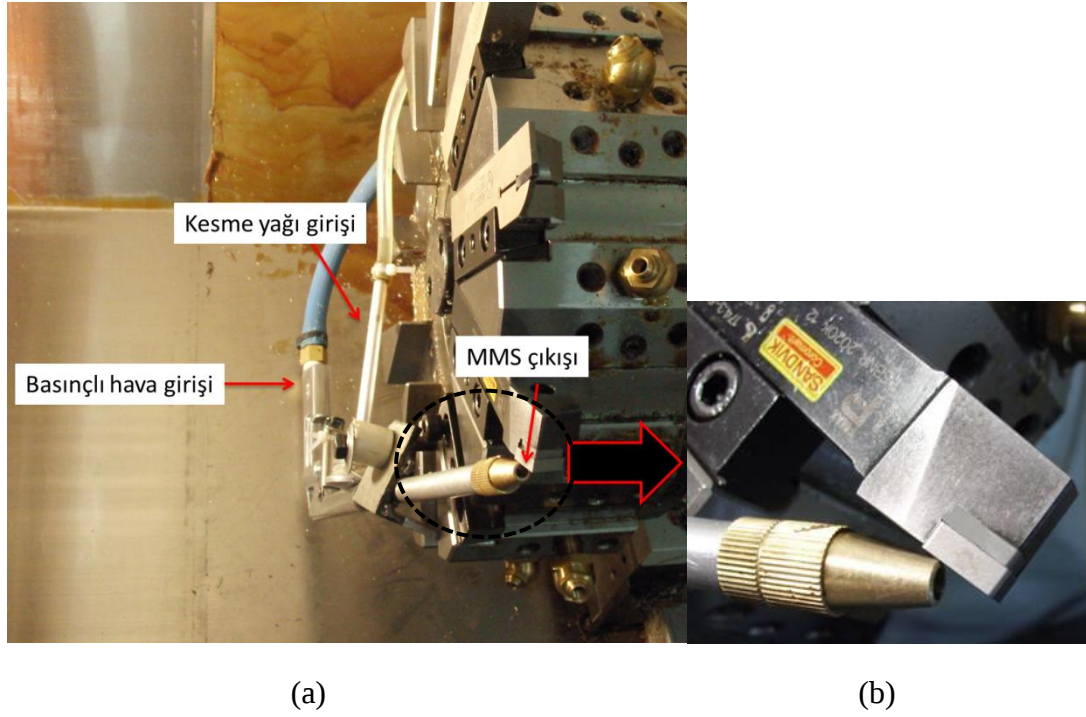
Şekil 5.3. Basınçlı hava ile soğutma düzeneği



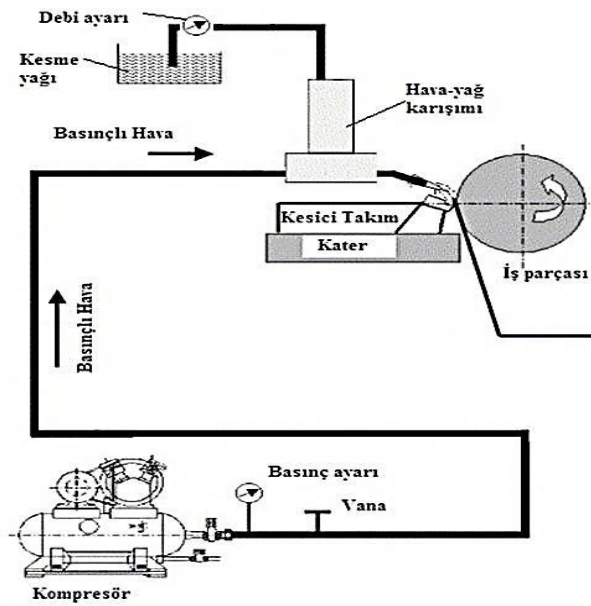
Şekil 5.4. Nozul ağız geometrisi

5.6.3. Minimum miktarda kesme sıvısı (MMS) ile soğutma/yağlama yöntemi

Minimum miktarda yağlama sisteminde (MMS) çok az kesme yağı ihtiva eden hava-yağ karışımıyla çalışılmaktadır. MMS kesme koşulları altında yapılan işlenebilirlik deneylerinde, az miktarda kesme yağı, 6 bar basınçlı hava ile beraber pulverize bir şekilde nozul yardımıyla kesme bölgesine püskürtülmüştür. Pulverizasyon işlemi ve debi ayarı mazot tabancası ve hava kompresörü kullanılarak sağlanmıştır. Deney sisteminin fotoğrafı Resim 5.2’de görülmektedir. Soğutma/yağlama performanslarının karşılaştırıldığı deneylerde MMS yönteminde 100 ml/h debide ticari bir mineral yağ kullanılmıştır. Mineral yağın teknik özellikleri Çizelge 5.8’de verilmiştir. MMS deney düzeneğinin şematik gösterimi de Şekil 5.5’de görülmektedir.



Resim 5.2. MMS ile soğutma/yağlama deney düzeneği
a) Sistemin genel görünümü b) Nozul pozisyonu



Şekil 5.5. MMS soğutma/yağlama deney düzeneğinin şematik gösterimi

Çizelge 5.8. Mineral esaslı yağa ait teknik özellikler

Parametreler	Değer
Yoğunluk (15 °C), g/cm ³	0,870
Kinematik viskozite (40 °C), mm ² /sn	30
Parlama noktası, °C	200

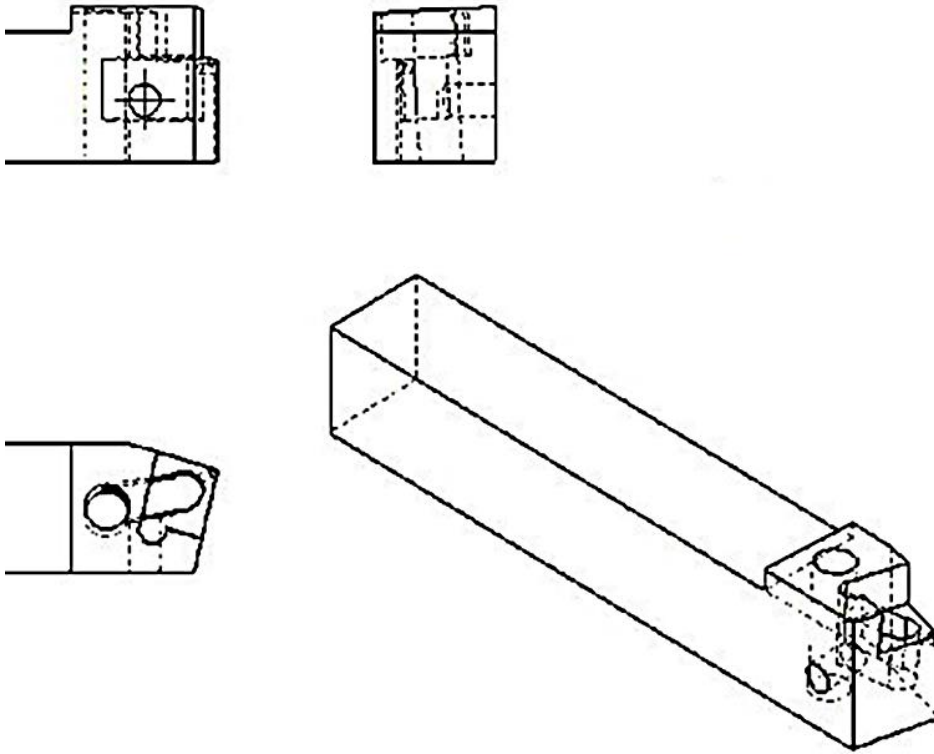
5.6.4. Kriyojenik soğutma yöntemi

Haynes 25 süper alaşımının tornalaması işlemlerinde takım-talaş ara yüzeyinde oluşan ısının azaltılıp takım ömrünü arttırmak için sıvı azot kullanılarak kriyojenik soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıvı azot endüstriyel anlamda ve büyük miktarlarda sıvılaştırılmış havadan destilasyon yoluyla üretilir ve LN_2 şeklinde tanımlanırsa da doğru yazılış şekli $N_2(I)$ 'dir. Dondurucu bir sıvı olup canlı dokuyla temas etmesi halinde ani donmaya neden olur. Ortam sıcaklığından uygun şekilde izole edilmesi durumunda, basınç uygulaması gerektirmeyen bir azot gazı kaynağı oluşturur. Suyun donma noktasının çok altındaki sıcaklıklarda kalabilme özelliği (77 K, $-196^{\circ}C$ veya $-320^{\circ}F$), sıvı azotun çok değişik alanlarda kullanımını mümkün kılmıştır. Kriyojenik soğutma şartları altında yapılan işlenebilirlik deneylerinde sıvı azotun depolanması için TAYLOR WHARTON XL-70 marka kriyojenik tank kullanılmıştır. TAYLOR WHARTON XL-70 tankının teknik özellikleri Çizelge 5.9'da verilmiştir. Deneylerde, tanktaki sıvı azotun iş parçasına aktarılması için 1,8 metre boyunda RS331 L12 tipi özel transfer hortumundan faydalanılmıştır.

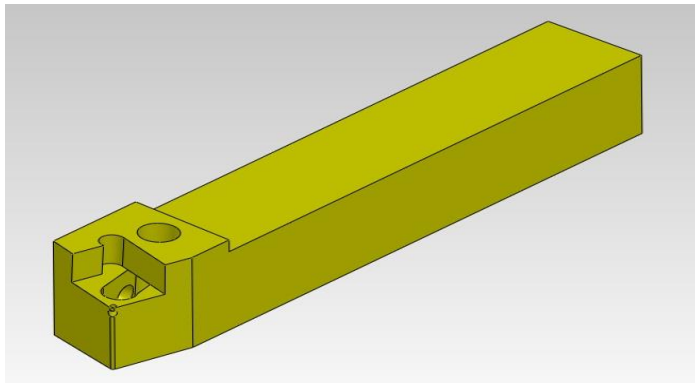
Literatür de kriyojenik soğutma şartları altında yapılan talaş kaldırma işlemlerinde sıvı azotun takım içinden (dâhili) ve takım dışında (harici) olmak üzere iki farklı yöntemle uygulandığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise, kriyojenik soğutma işlemi takım içinden uygulanmıştır. Takım içinden kriyojenik soğutma için tutucuya açılan sıvı azot geçiş kanalları, kesici takımın üç görünüşü ve perspektif görüntüsü Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de sırasıyla görülmektedir.

Çizelge 5.9. TAYLOR WHARTON XL-70 tipi sıvı azot tankı özellikleri

Marka	TAYLOR WHARTON
Toplam kapasite	70 litre
Çalışma basıncı	1,5 bar
Günlük buharlaşma	%5
Basınçlandırma ünitesi	Mevcut
Sıvı azot silindirisinin çapı	500 mm
Relief valf set değeri	1,5 bar
Brusting disk set değeri	12 bar



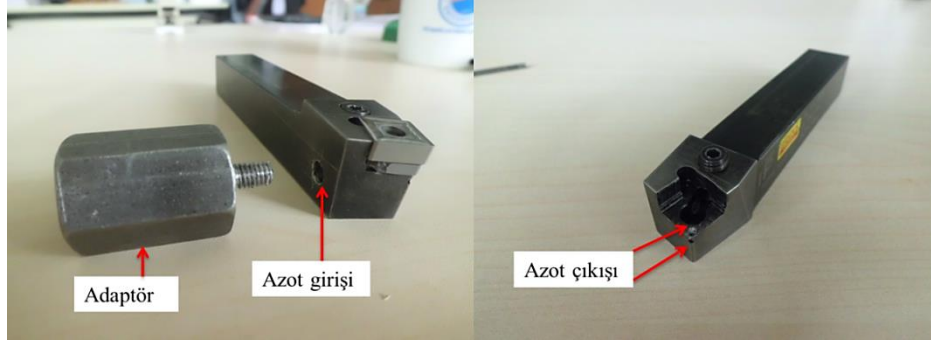
Şekil 5.6. Kriyojenik soğutma için sıvı kanalları açılan takım tutucunun detay resmi görüntüleri



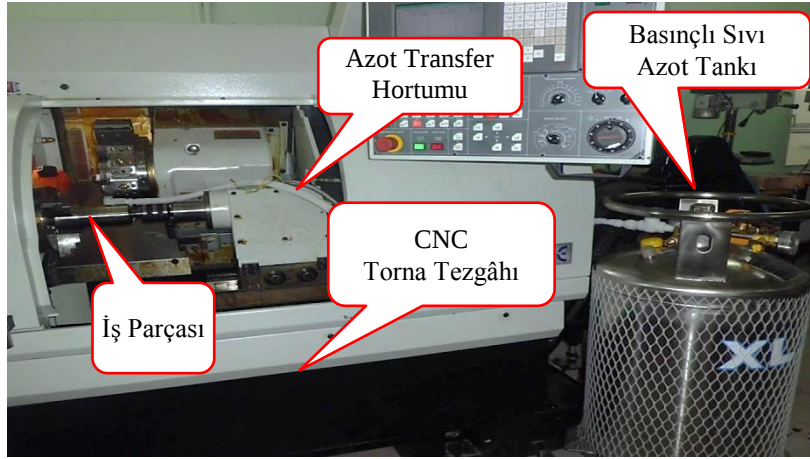
Şekil 5.7. Kriyojenik soğutma için sıvı geçiş kanalları açılan takım tutucunun katı model görüntüleri

Kriyojenik soğutma ile işlenebilirlik deneylerinde sıvı azot, basınçlı tank ile bağlantısı yapılan özel transfer hortumu ve bir adaptör vasıtasıyla kesici takıma aktarılmıştır. Talaş kaldırma esnasında takım içinden açılan kanallardan geçen azot ısıyı çekerek buharlaşmış ve takım soğutma işlemi gerçekleşmiştir. Takım üzerinde oluşan ısıyı çeken azotun bir kısmı buharlaşarak geçiş kanallarından tahliye olmuştur. Deneylerde kullanılan adaptör ve kesici takımın görüntüsü Resim 5.3’de verilmiştir. Ayrıca deney düzeneğinin ve kriyojenik

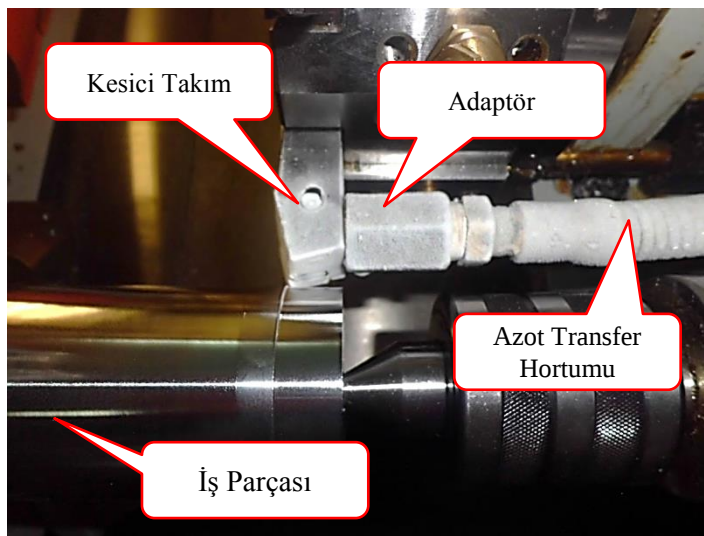
soğutma şartlarında gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminin bir görüntüsü sırasıyla Resim 5.4’de ve Resim 5.5’de görülmektedir.



Resim 5.3. Adaptör ve kesici takımın fotoğraf görüntüsü



Resim 5.4. Kriyojenik soğutma deney düzeneğinin görüntüsü



Resim 5.5. Kriyojenik soğutma koşullarında yapılan tornalama işleminin görüntüsü

5.7. MMS Performans Deneyleri

Haynes 25 süper alaşımının tornalama parametrelerini optimize etmek ve kesme performansını arttırmak için öncelikli olarak yukarıdaki bölümde bahsedilen soğutma/yağlama yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler içerisinde kesme bölgesine minimum miktarda kesme sıvısı gönderilmek suretiyle yapılan deneylerde 100 ml/h oranında madeni yağ kullanılmıştır. Fakat literatürde minimum miktarda kesme sıvısı kullanılarak yapılan talaş kaldırma işlemlerinde seçilen MMS parametrelerinin işleme performansını önemli derecede etkilediği vurgulanmıştır [42, 53, 63, 97]. Bu bölümde ki deneylerde kesme yağı cinsi, yağ akış oranı ve kesme hızının Haynes 25 süper alaşımının işlenebilirliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde, mineral esaslı kesme yağı, sentetik esaslı madeni kesme yağı ve bitkisel kesme yağı olmak üzere 3 farklı tipte yağ seçilmiştir. Sentetik esaslı madeni kesme yağı ve bitkisel kesme yağına ait özellikler Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5.10. Sentetik esaslı madeni yağa ait teknik özellikler

Parametreler	Değer
Yoğunluk , g/cm ³	0,835
Kinematik viskozite (40 °C), mm ² /s	25
Parlama noktası, °C	170

Çizelge 5.11. Bitkisel esaslı yağa ait teknik özellikler

Parametreler	Değer
Yoğunluk (20 °C) , g/cm ³	0,85
Kinematik viskozite (40 °C), mm ² /s	32
Parlama noktası, °C	201

Yağ akış oranı ise 60, 120, 180 ml/h’a ayarlanmıştır. İşleme deneylerinde, 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme ve 1 mm sabit talaş derinliği kesme parametreleri olarak seçilmiştir. Çizelge 5.12’de gösterildiği gibi deneylerde Taguchi L₉ (3³) ortogonal dizi deney tasarım yöntemi tercih edilmiştir. Bu bölümde kullanılan deney girdi parametreleri Çizelge 5.13’de görülmektedir.

Çizelge 5.12. Taguchi L₉ (3³) orthogonal deney tasarımı

Deney No	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Çizelge 5.13. Deney girdi parametreleri (MMS deneyleri için)

Deney No	Kesme yağı cinsi	Yağ akış oranı (ml/h)	Kesme Hızı (m/min)
1	Mineral	60	30
2	Mineral	120	40
3	Mineral	180	50
4	Sentetik	60	40
5	Sentetik	120	50
6	Sentetik	180	30
7	Bitkisel	60	50
8	Bitkisel	120	30
9	Bitkisel	180	40

5.8. Kesici Takım Sıcaklığının Belirlenmesi

5.8.1. Termokupul ile sıcaklıkların ölçülmesi

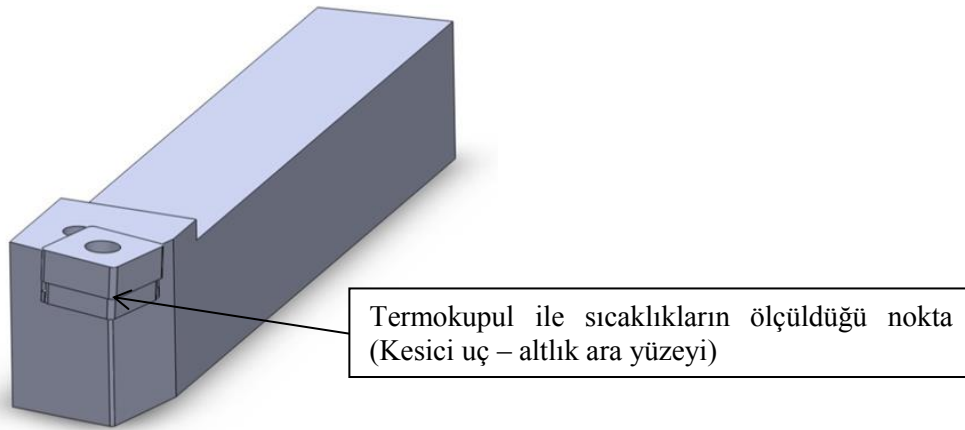
İşleme deneylerinde, kesici takımında oluşan sıcaklığı ölçmek için ilk olarak temassız kızılötesi (infrared) ölçüm yapabilen DT-8835 tipi lazerli temassız termometre kullanılmıştır. Fakat bazı deneylerde çıkan talaş kesme bölgesini kapattığı için kızılötesi ışık takım-talaş ara yüzeyine ulaşamamıştır. Bu yüzden, sağlıklı sonuçlar alınamamış ve bu deneylerde temassız sıcaklık ölçme yönteminden vazgeçilmiştir. Bu yönetime alternatif olarak kesme bölgesine en yakın noktadan talaş kaldırma sıcaklıklarını ölçmek için RAM marka DT – 8891A tipi temaslı termometre kullanılmıştır. 8891/8891A serisi K tipi çift girişli ve IR problu termometrede, kısa tepki süresi ve doğruluğu tercih sebebi olmuştur.

Bu termometreler K-tipi termokupulları kullanırlar ve tüm ölçme aralıkları üzerinden 0,1 °C / 0,1 °F hassasiyette çalışırlar. Bu cihazın teknik özellikleri Çizelge 5.14’de verilmiştir.

Çizelge 5.14. DT 8891A temaslı termometre cihazının özellikleri

Ölçme aralığı	-200 ile +1372 °C
Doğruluk	± (%2 ±2 °C)
Sensör tipi	K tipi (NiCr-Ni)
Kanal sayısı	2
Ölçme birimi seçimi	°C / °F / °K
Maks. ve min. hafıza	Var
Ortalama ölçüm	Var
Boyutları (YxGxD)	201 mm x 75 mm x 50 mm
Ağırlık:	280 g

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi, termokupul, altlık ile kesici ucun alt noktasının birleştiği bölgeye sabitlenmiş ve her bir deneyde aynı noktadan sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ölçülen bu sıcaklıklar takım yüzeyi sıcaklığının tahmininde kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Sıcaklık ölçme noktası

5.8.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile sıcaklıkların tahmini

Sonlu elemanlar analizi; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak ve her birinin kendi içinde çözümlenerek tam çözümün bulunduğu bir analizdir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok makina elemanının kolayca incelenebilmesi, tasarım esnasında mukavemet analizlerinin

yapılarak en uygun tasarımın gerçekleşmesi mümkün olabilmektedir. Belirli kesme şartlarında kesici takımında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin zamana göre değişimlerini belirlemek için sonlu elemanlar simülasyonu (FEM) yapılmıştır. Kesici takım yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarının tahmin edilmesi için üç boyutlu bir tersine ısı model algoritması geliştirilmiştir. Homojen olmayan örgü yardımıyla problemin sayısal olarak çözümü için ise ANSYS R14.5 ticari paket programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

5.8.3. Tersine ısı iletim modeli

Kesicinin 3-D termal modeli

Sürekli talaş kaldırma işlemlerinde kesici üzerindeki sıcaklıkların dağılımını tanımlamak için üç boyutlu (3-D) bir termal model geliştirilmiştir. Montaj görüntüsü Şekil 5.9’da verilen kesici uç ve tutucunun 3-D ısı dağılımı modeli Eş. 5.1’de verilmiştir. Kesici uç, kater, iş parçası ve altlığın termal özellikleri dikkate alındığında bu eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = (pC_p)_i \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.1)$$

Aşağıdaki sınır koşullarında kullanılan eşitlikler:

- Başlangıç şartları:

$$T(x, y, z, 0) = T_{\infty} \quad (5.2)$$

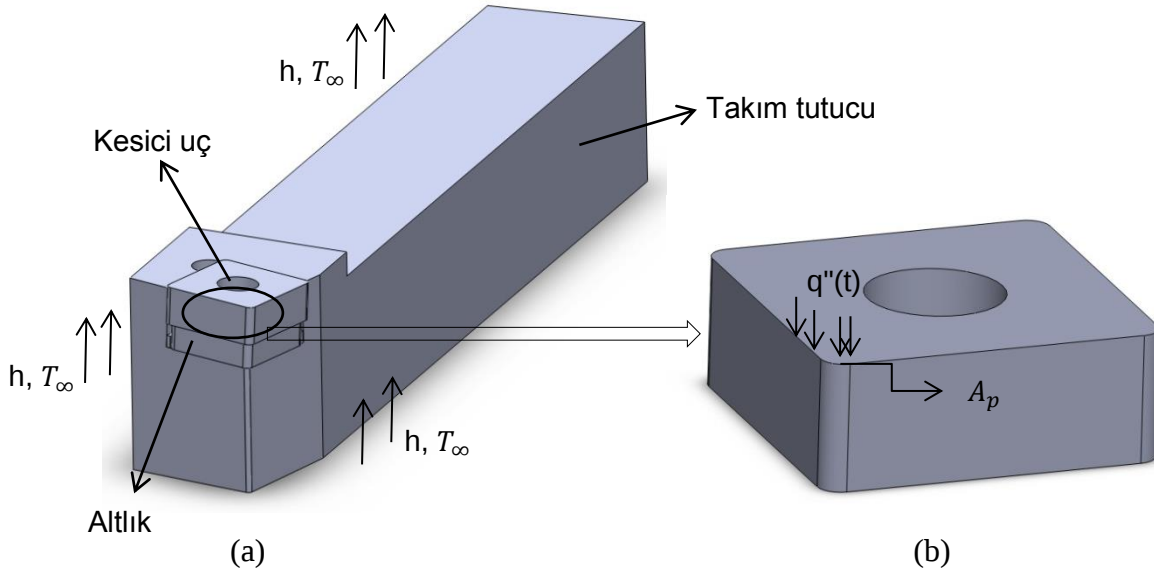
- Çevreye açık bölgelerde sınır şartı:

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\infty}) \quad (5.3)$$

- Takım-talaş-iş parçası ara yüzeyi için sınır şartı:

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial n} = q''(t) \quad (5.4)$$

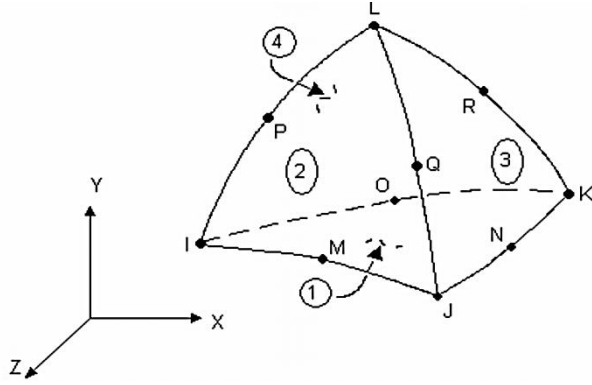
Eşitliklerde, T : sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), k : termal iletkenlik katsayısı ($\text{W} / \text{m} \text{K}$), ρ : yoğunluk (kg / m^3), C_p : ısı kapasitesi (J / K), α : ısı yayınma katsayısı (m^2 / s), h : ısı transfer katsayısı ($\text{W} / \text{m}^2 \text{K}$), t : süre (s), T_{∞} : ortalama sıcaklık, montaj konumu i olarak belirtilen indeks: $i = 1$: kesici ucu, $i = 2$: altlığı ve $i = 3$: kateri tanımlamaktadır.



Şekil 5.9. 3-D ısı dağılım görüntüsü a) Montaj görüntüsü b) Kesici uç

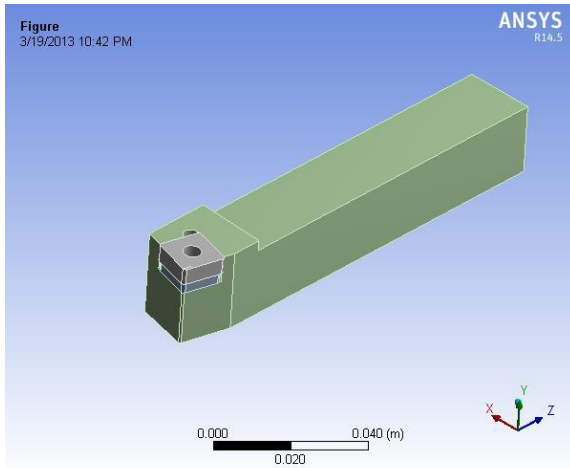
Şekil 5.9’da görüldüğü gibi takım-talaş temas alanı (A_p) hariç tüm montaj yüzeyleri çevre ile temas halindedir. Bu alan iş parçası-takım ve talaş ile temas halinde olduğu için kesici takımda dağılan ısı akışı ($q''(t)$) burada meydana gelir (Şekil 5.9. b). Şayet ısı akışı ($q''(t)$) bilinirse Eş. 5.1’de problemin doğrudan çözümü tersine yaklaşım metodu ile ilgilidir.

Sonlu elemanlar yönteminde (Finite Elements Method (FEM)) modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır ve bu noktalara düğüm (node) denir. Eleman özellikleri belirlendikten sonra, model küçük elemanlara bölünmüştür. Yani model mesh edilmiştir. 3 boyutlu modeli oluşturulan kesici takımın sonlu elemanlara bölünmesinde temel eleman olarak on düğümlü grid tetrahedral mesh kullanılmıştır (Şekil 5.10). Modellenme üç boyutlu olarak yapılmıştır ve ANSYS paket programının malzeme tablosundan uygun olarak SOLID 92 – 10 düğüm (nod) seçilmiştir.

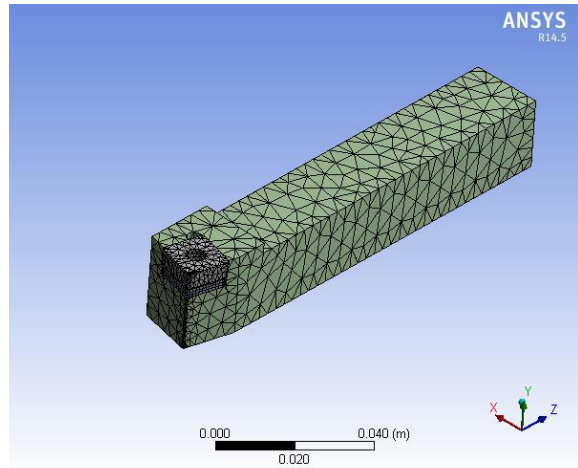


Şekil 5.10. Solid 92 - 10 Döğüm tetrahedral yapı

SOLID 92 quadratik deplasman davranışlarına sahiptir ve düzensiz ağ örgü (mesh) modeline uyum sağlar. Malzeme 10 döğüme sahiptir ve her bir döğüm x, y ve z eksenlerine göre üç serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 5.11’de kesici takım modeli ve örgü yapısı gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil. 5.11. ANSYS program görüntüsü

a) Kesici takım b) Sonlu elemanlar analizi ile örgü yapısı

Problemin sayısal çözümü

Eş. 5.1 kontrol hacmindeki hesaplama alanları enerjinin korunumu prensibi dikkate alınarak sonlu elemanlar tekniği ile çözülmüştür. Bu çalışmada, termokupul yardımıyla kesici ucun alt noktasından ölçülen sıcaklıklar üzerinden ısı akışını hesaplayarak takım-talaş ara yüzünün sıcaklığını tespit etmek için tersine ısı iletim yöntemi kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ısı modelin çözümü için Eş. 5.1’de verilen denklem ayrıştırılmış ve aşağıdaki denklem türetilmiştir [160].

$$a_0 T_{i,j,k}^{p+1} + a_w T_{i-1,j,k}^{p+1} + a_e T_{i+1,j,k}^{p+1} + a_s T_{i,j-1,k}^{p+1} + a_n T_{i,j+1,k}^{p+1} + a_b T_{i,j,k-1}^{p+1} + a_f T_{i,j,k+1}^{p+1} = b \quad (5.5)$$

Eşitlikte; i,j ve k indisleri hücre konumunu, T^{p+1} : p düğümünün sıcaklığını, katsayılar $a_0, a_w, a_e, a_s, a_n, a_b, a_f$ ve b kaynak terimi ise fiziksel ve geometrik katkıları ile katsayıyı ifade eder. Eş. 5.5’de verilen matris içerisinde düğüm noktalarına karşılık gelen kesicinin sıcaklık bölgeleri Gauss-seidel iterasyonu kullanılarak çözülmüştür [160]. Bu ısı modelin çözümü ANSYS 14.5 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Modelin çözümünde kullanılan işlenen malzeme, altlık ve kesici uca ve takım tutucuya ait fiziksel özellikler Çizelge 5.15-5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.15. Kesici ucun fiziksel özellikleri [46, 161]

Ortam sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g / cm ³)	Özgül ısı kapasitesi (J/ kg . °C)	Isı kapasitesi (J/°C)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
20	14,8	150	220	110

Çizelge 5.16. Altlığın fiziksel özellikleri [46, 161]

Ortam sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g / cm ³)	Özgül ısı kapasitesi (J/ kg . °C)	Isı kapasitesi (J/°C)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
20	8,2	400	500	43,1

Çizelge 5.17. Katerin fiziksel özellikleri [162, 163]

Ortam sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül ısı kapasitesi (J/kg . °C)	Isı kapasitesi (J/°C)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
20	7,82	470	500	50

Çizelge 5.18. Malzemenin fiziksel özellikleri [164]

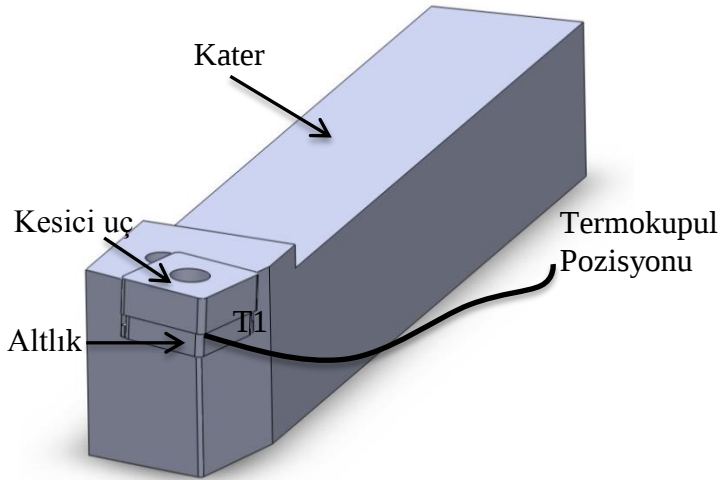
Ortam sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül ısı kapasitesi (J/kg . °C)	Isı kapasitesi (J/°C)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
20	9,13	384	400	9,8

Q(t) ısı akışının tahmini için tersine işlem prosedürü

Isıl modellerin çözümü kesme sürecinde takım-talaş ara yüzeyi üzerine ısı akışı yükü önceden tanımlanmış olması gereken doğrudan bir problemi temsil eder. Maalesef, tornalama işlemlerinde takım-talaş ara yüzeyi üzerindeki ısı akışını doğrudan elde etmek zordur. Bu çalışmada, kesmenin belli bir süresinde ölçülen sıcaklığa bağlı olarak takım-talaş ara yüzeyinden bilinmeyen etkili ısı akışı $q(t)$ tersinir yöntem ile çözülmüştür. Takım-talaş ara yüzeyi üzerinden düzenli ısı akışı dağılımı varsayılarak, tersine yöntemin amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F_{qm} = \sum_{n=1}^N (Y(x_n, y_n, z_n, t_m) - T(x_n, y_n, z_n, t_m, q_m))^2 \quad (5.6)$$

Verilen eşitlikte F_{qm} hesaplanan sıcaklık T_i ile ölçülen sıcaklık Y_i arasındaki hatadır. Eşitlikte F_{qm} bilinmeyen ısı akışı miktarı $q(t)$ ye göre en aza indirilir. x_n, y_n, z_n koordinat sistemi üzerinde (x, y, z) termokupul pozisyonunu (Şekil 5.12); m ise sıcaklık ölçme süresini ifade eder. Takım yüzeyi sıcaklığının tahmininde kullanılan bilinmeyen ısı akışının optimizasyonu için Eş. 5.1 - Eş. 5.6 arasında verilen denklemler ANSYS paket programının “Transient Termal Analiz” modülünde çözülmüştür.

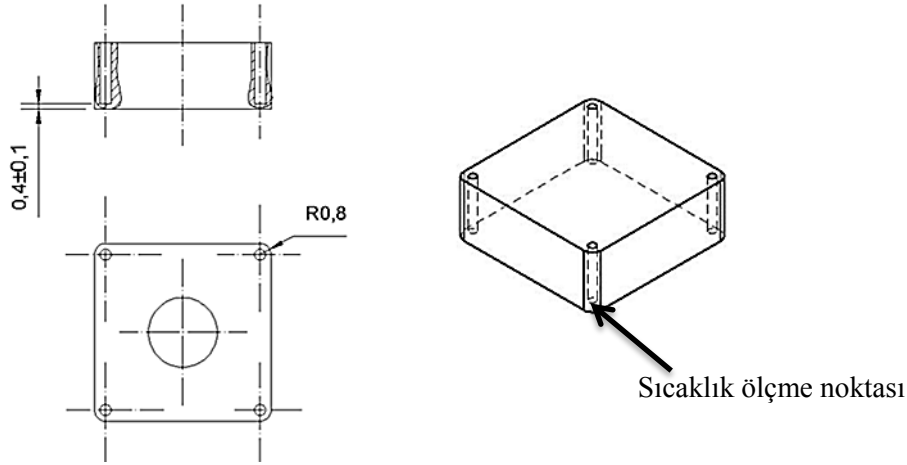


Şekil 5.12. Kesici takım üzerinde termokupul pozisyonu

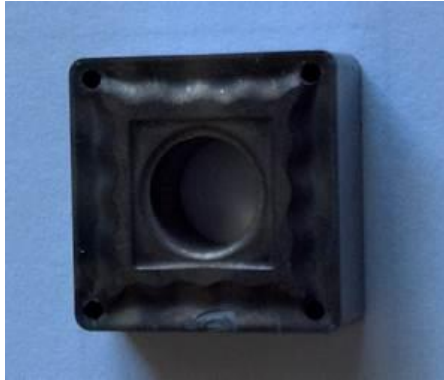
5.8.4. Sıcaklık doğrulama deneyleri

Kesici takım üzerinden ölçülen sıcaklıklar ANSYS programı kullanılarak tersine ısı iletim yöntemi ile tahmin edilmiştir. Tahmin edilen sıcaklıkların doğrulanması için kesici uç

Resim 5.6’de ve Şekil 5.13’de görüldüğü gibi kesme bölgesinin en yakın noktasına kadar tel erozyonla delinmiştir. Delik delinen noktanın en üst konumundan sıcaklıkların ölçülmesi suretiyle doğrulama deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5.13. Kesici uç üzerindeki sıcaklıkların ölçüldüğü delik pozisyonu



Resim 5.6. Delik delinmiş uç görüntüsü

Sıcaklıkların Şekil 5.13’de gösterilen noktadan ölçülmesi için K tipi Termokupul kullanılmıştır. Ölçülen sıcaklıklar 8 kanallı Pico TC-08 marka veri kaydedici yardımıyla anlık olarak bilgisayara aktarılmıştır.

5.9. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Yüzey pürüzlülüklerinin ölçümünde, yüzeydeki girinti ve çıkıntıların toplam alanlarının eşit olduğu düzlemi referans kabul ederek bu düzleme göre üstte ve altta kalan alanların eşit olduğu ikinci bir düzleme olan uzaklığın ölçüldüğü ortalama yüzey pürüzlülük değeri

olan (Ra) ölçüme esas alınmıştır. Pürüzlülük ölçümünde profil metodu kullanılmıştır. Bu amaçla profil değişimini Ra ve Rz cinsinden okuyabilen ve özellikleri Çizelge 5.19’da verilen TIME TR-100 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Cihazla 15 µm’ye kadar yüzey pürüzlülükleri ölçülmektedir. Ölçme işlemine geçmeden önce yüzey pürüzlülük cihazı, yüzey pürüzlülük değeri önceden bilinen kalibrasyon blokları ile kalibre edilmiştir. Örnekleme uzunluğu (lc) 0,8 mm alınmıştır. Ölçülecek yüzey uzunluğu (L) örnekleme uzunluğunun en az 5 katı olacak şekilde seçilmiştir. Her yüzey yeni bir takım ile işlenmiştir. İş parçası üzerinde yapılan her bir deney bittikten sonra ölçümler yapılmıştır. Ölçüm yapılacak yüzeylerin oksitlenmemesi ve ölçüm değerlerini etkilememesi amacıyla ölçme bekletilmeden yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, işlenen yüzey üzerinden işleme yönünde çevresel olarak rastgele üç farklı noktadan üçer kez ölçülmüş ve ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

Çizelge 5.19. TIME TR yüzey pürüzlülük ölçme cihazının teknik özellikleri

Model	TR 100
Tarama hızı (mm/s)	1,00
Ölçüm aralığı (µm)	Ra: 0,05-15, Rz: 0,1-50
Örnekleme uzunluğu (mm)	0,08 – 0,25 -0,8 – 2,5
Tarama uzunlukları (mm)	1,75 – 5,6 – 17,5
Dedektör ucu (µm)	Elmas, radyüs: 10 +/-2,5
Çalışma sıcaklığı (°C)	0-40
Hareket mesafesi (mm)	6
Boyutlar (mm)	125x73x26
Ağırlık (gr)	200
Ölçülen parametreler	Ra, Rz

5.10. Takım Aşınmasının Ölçülmesi

5.10.1. Takım aşınması ön deneyleri

Esas takım ömrü deneylerinde belirlenen malzeme ve metodu belirlemek amacıyla kesici takım firmasının ve literatürdeki araştırmacıların önermiş olduğu parametre değerlerine yakın değerler alınarak belirli sayıda ön deneyler yapılmıştır. Bu deneyleri yapmaktaki amaç;

- a) Tezgâhtan, istenilen talaş kaldırma parametrelerinin alınıp alınamayacağını ve kaldırabileceği en büyük ilerleme ve kesme derinliğini belirlemek,
- b) Verilen bir kesme hızı değeri sonrası tezgâhın harcamış olduğu gücü tespit etmek,
- c) Kesici takımlar için işlenen malzeme cinsine bağlı olarak kataloglarda önerilen değerlerin geçerliliğini test etmek ve buna göre uygun değerleri belirlemek,
- d) Tezgâhta çalışırken en uygun kesme stratejilerini belirlemek
- e) Takım aşınması ve kesme süresinin ölçülmesi konusunda gerekli beceri ve alışkanlıkları kazanmak,
- f) Kesici takımların göstermiş olduğu aşınma tiplerini belirlemektir.

Bu amaçlar için yapılan ön deneyler değerlendirildiğinde seçilen kesme şartları bazı düzeltmeler yapılarak tamamlanmış ve ölçme hassasiyetlerinin de uygunluğu tespit edildikten sonra esas takım ömrü deneylerine başlanmıştır.

5.10.2. Esas takım ömrü deneyleri ve takım aşınmasının ölçülmesi

Her işleme şartı altında takım ömrü hesaplanmıştır. Her deney öncesi yeni bir kesici uç kullanılmıştır. Kesici takım aşınmalarının değerlendirilmesinde kesici takımlarla kaldırılan toplam talaş hacmi $10\,000\text{ mm}^3$ olarak sabitlenmiştir. Toplamda Haynes 25 malzemeden aynı tipteki kesicilerle aynı talaş hacminde talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiş ve kesici takımlarda meydana gelen aşınma izlerinin genişlik değerlerinin ISO 3685'te önerdiği takım ömrü bitimi $0,3\text{ mm}$ aşınma kıstasına yaklaşma ya da geçme ölçütleri değerlendirilmiştir. Kesici takım yan yüzey aşınma ölçümlerinde, “Novex binocular zoom stereo microscope RZB-SF 65.550” marka, mikroskop kullanılmıştır. Takım aşınma fotoğrafları, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan “INSTRUMENT JSM-6060” marka taramalı elektron mikroskopunda (SEM) ve Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan “LEO-440” marka taramalı elektron mikroskopunda çekilmiştir.

5.11. İstatistiksel Analiz

Her deney grubu için tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Deneyler için soğutma/yağlama şartı, kesme hızı ve ilerleme değişken parametreler (kontrol faktörleri) olarak belirlenmiştir. Buradan yola çıkılarak, takım aşınması, pürüzlülük ve sıcaklık

üzerine bu üç kontrol parametresinin etkisi incelenmiştir. İşleme parametrelerinin takım aşınması, pürüzlülük ve takım-talaş ara yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerini çizgi grafiklerde büyük oranda görmek mümkündür. Ancak daha detaylı bir bilgiye ulaşmak için MINITAB 16.0 yazılımı kullanılarak ANOVA testi (varyans analizi) uygulanmıştır. ANOVA tabloları, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık üzerinde her bir işleme parametresinin etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. ANOVA tablolarına ek olarak çıkarılan etki grafikleri her bir parametre grubundaki seviye etkilerinin belirlenmesinde ve birbiri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında yardımcı olmaktadır. ANOVA testleri özellikle deneysel sonuçların doğru bir şekilde yorumlanmasında yardımcı olmuştur. Ayrıca matematiksel tahmin denklemleri elde etmek için çoklu regresyon analizi yapılmıştır.

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular; işlenebilirlik deney sonuçları ve deney sonuçlarının istatistiksel analizi olmak üzere iki başlık altında verilmiştir.

6.1. Deney Sonuçları ve Tartışma

İşlenebilirlik; bir saatte üretilen parça sayısı, her bir parça için işleme maliyeti veya üretilen parçanın son yüzey kalitesi olarak ifade edilir. Mühendislik malzemelerinin işlenebilirliği malzemelerin mekaniksel ve fiziksel özelliklerini belirleyen mikro yapılarına bağlıdır. Malzemelerin işlenebilirliği üzerinde etkili olan; takım ömrü, kesme kuvveti, talaş oluşumu, kesici takım malzemesi, kesme parametreleri, malzemelerin mikro yapısı, malzemelerin fiziksel özellikleri, kimyasal özellikleri (ısı iletimi, darbe sönümleme) araştırılması gereken çok önemli konulardır. Talaşlı imalat sektöründe tornalama işlemleri en önemli talaş kaldırma tekniklerinden biridir ve talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık %30'unu içermektedir. Ayrıca kesici takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemlerinde harcanan toplam zamanın %40'ı tornalama işlemi esnasında meydana gelmektedir. Bu çalışma ile kobalt esaslı Haynes 25 süper alaşım numunelerin tornalanması sürecinde farklı kesme parametrelerinin kesici takım aşınması, takım-talaş ara yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve işleme verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca süper alaşımın karbür kesici uçlarla işlenmesi sırasında kurulan soğutma/yağlama düzeneklerinin deney sonuçları üzerindeki olumlu ya da olumsuz etkisi olup olmadığı araştırılmıştır.

6.1.1. Aşınma

Kesici takımlarla yapılan işleme deneylerinden sonra kesici takımlardaki aşınma oranları ve aşınma davranışları irdelenmiştir. Kesici takımlarla toplamda kaldırılan talaş hacmi sabitlenerek işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön deneyler neticesinde bu değer sementit karbür (SK) kesici takımlar için $10\,000\text{ mm}^3$ olarak seçilmiştir. Dört farklı kesme hızı (15, 30, 45, 60 m/min), üç farklı ilerleme oranı (0,08; 0,12 ve 0,16 mm/rev), beş farklı soğutma/yağlama ortamı ile sabit kesme derinliğinde (1 mm) yapılan deneyler sonucunda, kesici takımlar takım mikroskobunda incelenmiştir. İncelemeler sonucunda kesici takımların çoğunda yanak aşınması, çentik aşınması, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı

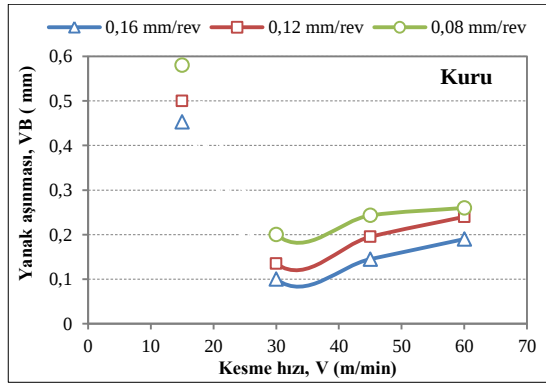
oluşumu gözlemlenmiştir. Kesici takım ömrü değerlendirmelerinde ISO 3685’te önerilen, esas kesme kenarı yanak yüzeyinde oluşmuş yüzey aşınma ölçüsü 0,3 mm değeri dikkate alınmıştır. Talaş hacminin sabit tutulması nedeniyle, bu kıstas değerine kesici takımların yaklaşma ya da geçme ölçütleri, kesme hızı ve ilerleme hızının değişimi soğutma/yağlama koşullarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Kesici takım ömrü ve aşınma izlerinin değerlendirilmesinde, iki farklı kaynak kullanılmıştır. Bunlardan ilki, işleme deneyleri sonrasında kesici takımlarda meydana gelen aşınma izleri genişliklerinin takım mikroskobu ile ölçülen genişlik değerlerinin çizelge ve grafikler haline dönüştürülerek değerlendirilmesidir. Diğeri ise SEM ile çekilmiş üç boyutlu kesici takım fotoğraflarının incelenmesi şeklindedir. Değerlendirmeler sırasıyla her bir soğutma/yağlama koşullarında yapılan talaş kaldırma işlemleri için yapılmıştır. Deneylerde kaplamasız SK kesici takım kullanılmıştır. Sabit kesme derinliği, üç farklı ilerleme hızı ve dört farklı kesme hızında toplamda her bir soğutma/yağlama koşulu için 12 adet işleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda elde edilen sabit talaş hacmine bağlı esas kesme kenarı ve burun kısmında oluşan aşınma değerleri, kesici takım talaş yüzeyi referans alınarak takım mikroskobunda (0,005 mm hassasiyetli) ölçülmüştür. SK takım ile kesme şartları altında kesme hızı ve ilerleme hızının değişimine göre, 10 000 mm³ sabit talaş hacminde işleme deneyleri sonrasındaki ölçme sonuçları Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Yan yüzey (yanak) aşınması (VB) sonuçları

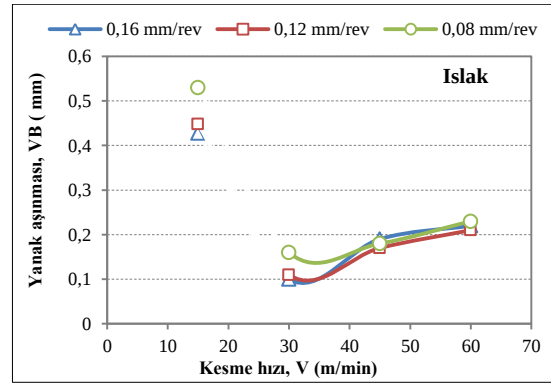
Kesme hızı (m/min)	İlerleme (mm/rev)	Yanak aşınması, VB (mm)				
		Kuru	Islak	BH	MMS	Kriyojenik
15	0,08	0,58	0,53	0,521	0,512	0,572
15	0,12	0,5	0,448	0,466	0,480	0,440
15	0,16	0,453	0,428	0,422	0,400	0,412
30	0,08	0,2	0,16	0,110	0,090	0,070
30	0,12	0,135	0,11	0,105	0,084	0,050
30	0,16	0,1	0,1	0,080	0,056	0,020
45	0,08	0,243	0,18	0,130	0,120	0,098
45	0,12	0,195	0,17	0,120	0,110	0,090
45	0,16	0,145	0,19	0,085	0,088	0,075
60	0,08	0,26	0,23	0,175	0,135	0,110
60	0,12	0,24	0,21	0,139	0,110	0,100
60	0,16	0,19	0,22	0,127	0,090	0,080

Çizelge 6.2. Maksimum yan yüzey (yanak) aşınması ($VB_{\max}$) sonuçları

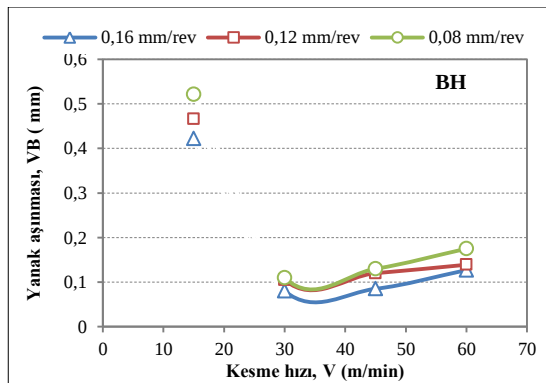
Kesme hızı (m/min)	İlerleme mm/rev	Maksimum yanak aşınması, $VB_{\max}$ (mm)				
		Kuru	Islak	BH	MMS	Kriyojenik
15	0,08	-	-	-	-	-
15	0,12	-	-	-	-	-
15	0,16	-	-	-	-	-
30	0,08	0,32	0,274	0,223	0,200	0,187
30	0,12	0,2	0,16	0,200	0,155	0,120
30	0,16	0,19	0,15	0,193	0,138	0,100
45	0,08	0,585	0,563	0,453	0,350	0,315
45	0,12	0,4	0,41	0,383	0,312	0,257
45	0,16	0,35	0,33	0,367	0,280	0,200
60	0,08	0,625	0,6	0,495	0,410	0,330
60	0,12	0,558	0,5	0,469	0,380	0,320
60	0,16	0,46	0,44	0,420	0,360	0,300



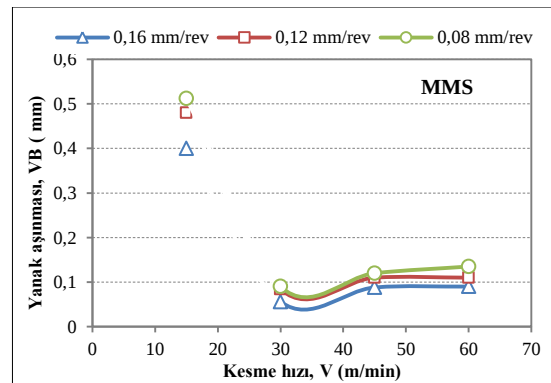
(a)



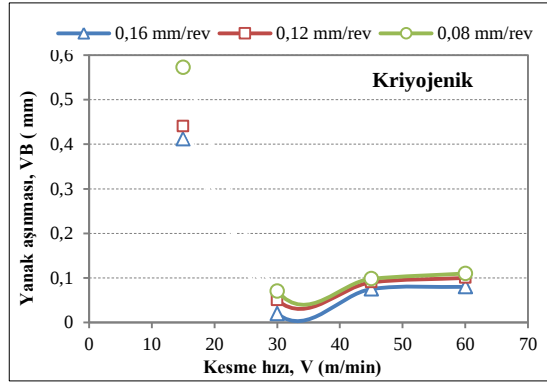
(b)



(c)



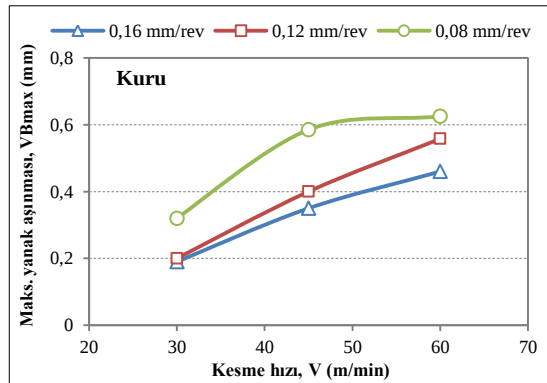
(d)



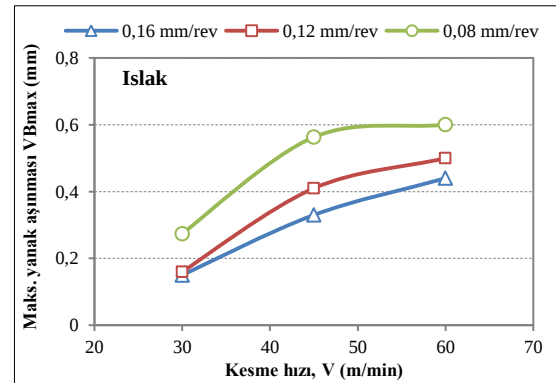
(e)

Şekil 6.1. İlerleme oranı ve kesme hızına bağlı takımın yanak aşınması
a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik

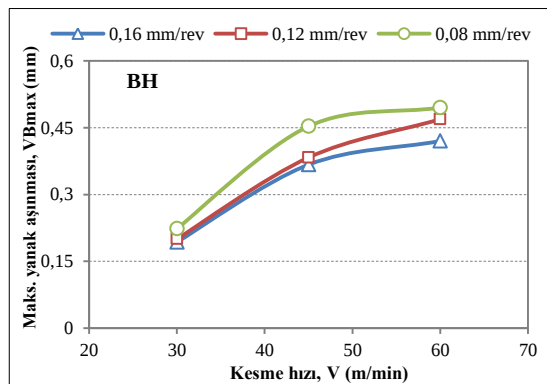
Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de görüleceği üzere, süper alaşım malzemenin işleme deneylerinde kullanılan tüm kesici takımlarda önemli aşınmalar gözlemlenmiştir. Çizelgedeki ölçme değerleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de grafik halinde sunulmuştur.



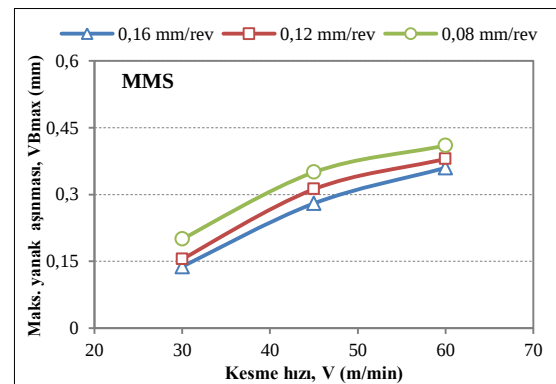
(a)



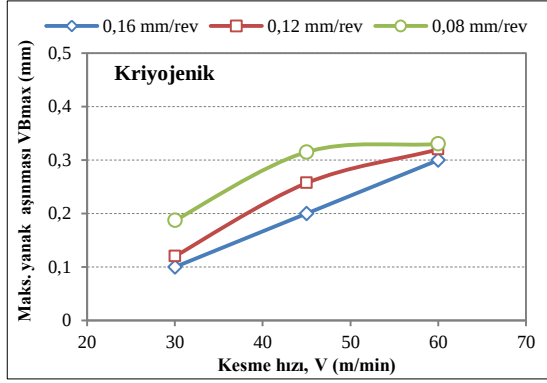
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 6.2. İlerleme oranı ve kesme hızına bağlı takımın maksimum yanak aşınması
a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik

Bu malzemelerde bulunan bazı elementler (Ni, Co, Cr, Ti) işlemeye karşı yüksek dayanım ve korozyon direnci oluşturmaktadır. Tipik olarak daha yüksek kobalt - nikel içeriğinde işlemek daha zordur. Çünkü nikel ya da kobalt içeriği ya da titanyum bileşenleri parçaya sıcak sertlik eğilimi sağlamaktadır. Kobalt esaslı süper alaşımların mikro yapısının içinde hâlihazırda bulunan sert aşındırıcı karbürler takım aşınmasının oluşmasına sebep olan abrasiv aşınma oluşumunu sağlarlar. Literatürde ısıl dirençli süper alaşımların işlenmesinde karbür takımlar için önerilen kesme hızı aralıkları 10-30 m/min'dir [165]. Ancak bu durum yapılan bu çalışmada farklılık arz etmiş ve 15 m/min'lik kesme hızında kesici uç burun bölgesinde yüksek değerlerde yanak aşınması (VB) ortaya çıkmıştır (Şekil 6.1.a). Bu durumun sebebinin düşük kesme hızı ve düşük kesme sıcaklıklarında oluşan adheziv aşınma mekanizmasının olduğu düşünülmektedir. Bu aşınma mekanizması genellikle kenar ile talaş arasında yığılma kenar oluşumuna neden olur. Önemli ölçüde sıcaklığa dolayısıyla kesme hızına bağlı bir durumdur. Yığılma kenar oluşumuna iş parçası ve takım arasındaki afinite de etkiye bulunur. Afinite, düşük sıcaklık ve yüksek basınç da iş parçası malzemesinin takım yüzeyine kaynak olmasına neden olup kesici kenarın bir parçası haline gelmesi işlemdir. Bu kenarın çok fazla büyümesi ve bir noktada kopması, kesici kenar üzerinden bir kısım malzemenin de yığılma kenar ile uzaklaşmasına sebep olur [156]. Birçok modern talaş kaldırma işleminde kesme hızları yığılma kenar oluşum alanının çok üzerindedir ve birçok kalite yığılma kenar oluşumuna engel olacak şekilde seçilir. Yığılma kenar oluşumuna sebebiyet veren sıcaklık kesme hızları bilindiğinden bu tip aşınmanın kolaylıkla önüne geçilebilir. Nitekim bu çalışmada da kesme hızının 15 m/min'den 30 m/min'e yükselmesiyle yığılma kenar oluşumu ortadan kalkmış ve adheziv aşınma mekanizması sonucu ortaya çıkan yanak aşınması önemli ölçüde azalmıştır. Kesici

takımların 15 m/min’lik kesme hızında ortaya çıkan aşınma davranışları Bölüm 6.1.2’de SEM resimleri ile incelendiğinde kesici ucun burun bölgesine iş parçası malzemesinin yapışarak kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bütün soğutma koşulları altında 15 m/min’lik kesme hızında kesici uç burun bölgesine kaynak olan iş parçası malzemesinin mikroskop yardımıyla tespit edilen aşınma değerlerinin hatasız bir şekilde okunmasına engel olacağı düşünülerek Şekil 6.1’deki grafiklerde 15 m/min’lik kesme hızındaki aşınmalar noktasal olarak verilmiştir.

Şekil 6.1 incelendiğinde, 30 m/min’lik kesme hızında oluşan yanak aşınmasının 15 m/min’lik kesme hızında oluşan yanak aşınmasına göre daha az olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebi düşük kesme hızı ve ilerlemede oluşan yığıntı talaş ve yığıntı talaş katmanlarının azalmasıyla ilişkilendirilmiştir. Kesme hızının artmasıyla kesici uçta oluşan yanak aşınması türü abrasiv tip bir aşınma mekanizmasından kaynaklanır ve kesici kenarın serbest yüzeyinde meydana gelir. Talaşın oluşumu sırasında ve sonrasında ana kesici kenar, yardımcı kesici kenar ve köşe radyüsü veya paralel kenar iş parçası ile temastadır. Bu temas nedeniyle oluşan serbest yüzey aşınması en yaygın aşınma tiplerinden biridir [156, 166]. Şekil 6.1.a-e arasında verilen grafiklerde tüm işleme şartları altında kesme hızının 30 m/min’den sonra artmasıyla birlikte yanak aşınmasındaki değişimler görülmektedir. Grafiklerden görüleceği üzere kesme hızındaki artışa paralel olarak bütün işleme koşullarında yanak aşınması artmıştır. Kesme hızının artmasıyla akan talaş hacmi ve sürtünme artacağından aşınma da artar. Ayrıca kesme hızı arttıkça aynı oranda sıcaklık da artar. Sıcaklığın artması takımın aşınmaya karşı mukavemetinin de azalmasına neden olacaktır. Bu durum yanak aşınmasını arttıran sebepler olarak düşünülmektedir.

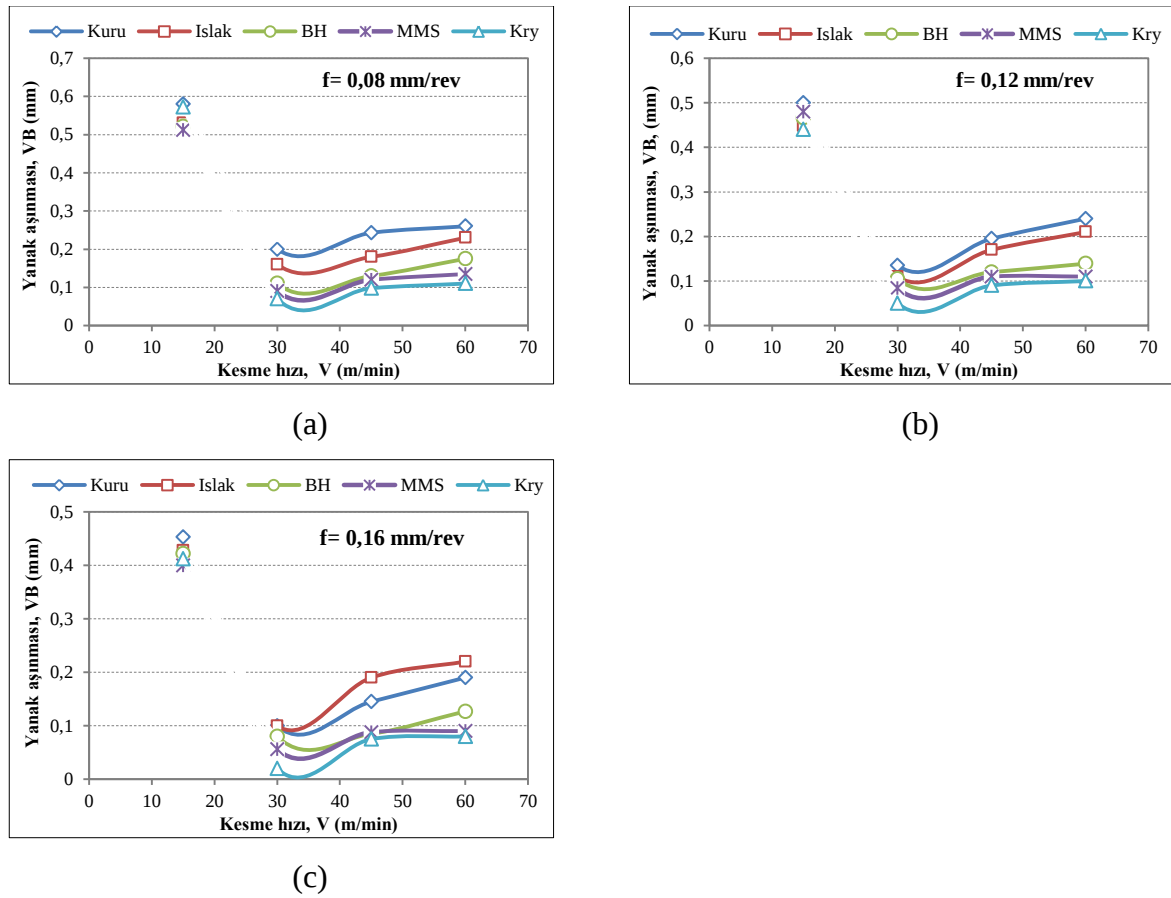
Şekil 6.2’de kesme hızının 30 m/min’e yükselmesiyle yan yüzeyde çentik ortaya çıkmıştır. Çentik aşınması tipik bir adheziv aşınmasıdır. Ancak oksidasyon aşınmasının da bu tip aşınmanın oluşumuna katkısı vardır. Belirli bir sıcaklık aralığında takım ve iş parçası malzemeleri arasındaki çekim gücü ve kesme kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkan yük adheziv aşınmayı oluşturan nedenlerdir. Malzemenin işlenmesi sırasında bu aşınma türü talaş derinliğinin maksimum değerinde hızlı bir bölgesel aşınmaya neden olur. Bu durum çentik aşınmasının en yaygın şeklidir ve takım ile iş parçası malzemeleri arasındaki aktivasyon ile doğrudan ilişkilidir [156, 166]. Literatürdeki bulgulara, "Konig", düşük kesme hızlarında oluşan aşınmanın, esasen karbür uçlarda görülen bir durum olduğunu ve karbürün yapısından kaynaklandığını ifade etmektedir [167]. Şekil 6.2’de 45 m/min ve 60

m/min’lik kesme hızlarında çentik aşınmasının 30 m/min’lik kesme hızına göre hızla arttığı görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak işleme sırasında oluşan yüksek ısı, iş parçasının yüksek dayanımı ve aşındırıcı talaşların olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.2’ye bakıldığında, tüm ilerleme değerlerinde kesme hızının artması ile birlikte aşınma değeri de artmaktadır. Aşınmadaki artış kesme hızındaki yükselme ile kesme bölgesinde takım-talaş ara yüzeyinde artan sıcaklık ile ilişkilendirilmiştir [157, 168, 169]. Bu malzemelerde bulunan bazı elementler (Co, Ni, Cr) işlemeye karşı yüksek dayanım ve korozyon direnci oluşturmaktadır. Tipik olarak daha yüksek kobalt ve nikel içeriğinde işlemek daha zordur. Çünkü nikel ya da kobalt içeriği ya da titanyum bileşenleri parçaya sıcak sertlik eğilimi sağlamaktadır. Kobalt esaslı süper alaşımların mikro yapısının içinde bulunan sert aşındırıcı karbürler (örneğin; MC, $M_{23}C_6$) takım aşınmasının oluşmasına sebep olan abrasiv aşınma oluşumunu sağlarlar [144]. Literatürde de işlenmesi zor malzemelerin veya süper alaşımların karbür kesici takımlarla işlenmesinde en çok karşılaşılan problemlerin yanak aşınması ve çentik oluşumu olduğu belirtilmiştir [170-172]. Yuvarlak kesici uçların kullanımı, mümkün olan her yerde en küçük giriş açısının kullanılması, açılı tornalama, kesici uç yarıçapı ve talaş derinliği arasındaki ilişkinin yanı sıra verimli soğutma/yağlama yöntemleri çentik aşınmasının azaltılması için kullanılmaktadır [173]. Ancak literatürde ısıl dirençli süper alaşımların işlenmesi esnasında oluşan çentik aşınmasının hiç bir zaman yok edilemeyeceği fakat iyi bir planlama ile minimum seviyeye indirilebileceği vurgulanmıştır [174]. Çentik aşınmasını oluşturan sebeplerin arasında yüksek sıcaklık, malzemenin yüksek mukavemeti, pekleşme etkisi ve aşındırıcı talaşlar gibi birden fazla faktörün bulunması bu durumun nedeni olarak gösterilmiştir [175]. Kesme parametrelerinin çentik aşınması üzerindeki etkisi araştırıldığında kesme hızının en etkili parametre olduğu literatürde de görülmektedir [173]. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de görüldüğü gibi bütün soğutma/yağlama koşulları altında 30 m/min kesme hızında ISO 3685 sınırları içerisinde yer alan takım aşınması elde edilmiştir. Literatür bulgularında, 30 m/min’i aşan kesme hızlarında süper alaşımların, sementit karbür takımlar ile işlenmesinde kobalt fazındaki termal yumuşaklıktan dolayı takımın bozulduğu belirtilmiştir [176]. Nitekim bu çalışmada da 30 m/min’lik kesme hızından sonra takım aşınmasındaki artış belirgin bir şekilde olmuştur. Kuru, ıslak, BH ve MMS soğutma/yağlama koşulları altında kesme hızının 45 m/min’e ulaşmasıyla VB_{max} değerinin 0,3 mm sınırını aşarak kullanılamaz hale geldiği görülmüştür. Bu kesme hızı sınırı kriyojenik soğutma altında yapılan talaş kaldırma işleminde 60 m/min’e kadar çıkmıştır. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 incelendiğinde, 30 m/min’lik kesme hızında geleneksel soğutma, BH, MMS ve kriyojenik soğutma altında yapılan

tornalama işleminde elde edilen aşınma değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızının artmasıyla kriyojenik soğutmanın performansı diğer işleme şartlarına göre daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Bu durumun nedeni literatürde geçen “kriyojenik soğutma yöntemi yüksek işleme hızlarında daha ekonomik ve verimlidir” ifadesine atfedilmiştir [29, 31-33, 35].

Soğutma/yağlama yöntemlerinin takım aşınması üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

Son yıllarda, tornalama operasyonlarında, kesici takım, makina kontrolü ve soğutma/yağlama kimyasallarının gelişimi; havacılık, savunma sanayi, türbin motorları ve uzay araçlarında kullanılan süper alaşımların işlenebilirliğine katkı sağlamıştır. Fakat bu malzemelerin tornalanmasında kesme bölgesinde oluşan sürtünme ve ısı oluşumundan dolayı takım ömrü ve yüzey kalitesi problemleri ön plana çıkmıştır.

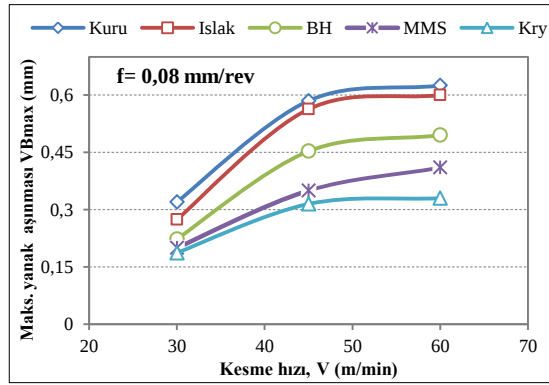


Şekil 6.3. Soğutma/yağlama yöntemlerinin yanak aşınması üzerindeki etkisi
a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme

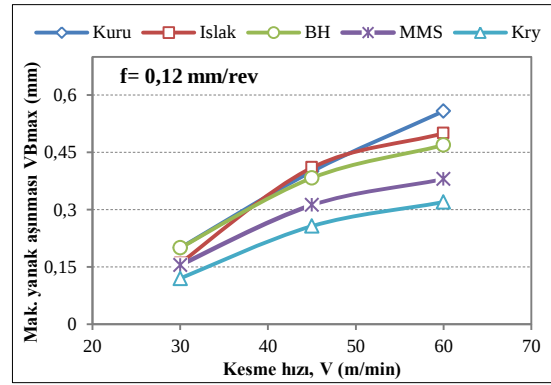
Sharma “soğutma/yağlama yöntemlerinin iyi analiz edilmesiyle kesme bölgesinde oluşan sürtünme ve ısı oluşumunun azaltılarak ekonomik işleme süreçlerinin arttırılacağını” ifade etmiştir [52]. Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi esnasında kullanılan dört farklı soğuma/yağlama yönteminin takım aşınması üzerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 incelendiğinde, en düşük yanak aşınması ve maksimum yanak aşınmasının kriyojenik soğutma koşullarında 30 m/min’lik kesme hızı ve 0,16 mm/rev ilerleme oranında meydana geldiği görülmüştür. Haynes 25 süper alaşımının tornalanmasında kullanılabilecek soğutma/yağlama yöntemleri içerisinde kriyojenik soğutma yönteminin diğer süper alaşımların işlenmesinde olduğu gibi en verimli yöntem olduğu bu çalışmada ortaya koymuştur. Özel tasarlanmış ya da içerisine sıvı azot geçiş kanalları açılmış kesici takımlardan sıvılaştırılmış azot geçirilerek yapılan işlemlerde, sıvı azotun birinci kayma bölgesindeki kesme sıcaklığını kontrol altına alarak takım aşınmasının azalmasına olumlu bir katkı yaptığı düşünülmektedir. Ayrıca bazı kaynaklarda sıvı azotun yağlayıcılık özelliğinin bulunduğu ve bu özellik iş parçası-takım arasındaki sürtünmenin azalmasına yardımcı olarak takım aşınmasını azalttığı rapor edilmiştir [51, 52]. Şekil 6.3 incelendiğinde, malzemenin tornalanmasında kullanılan kesici uçta oluşan yanak aşınması kuru işlemeye göre; geleneksel soğutma yöntemiyle %26’ya kadar, basınçlı hava ile %46,5’e kadar, MMS kullanımı ile %54,1’e kadar ve kriyonenik soğutma yöntemi kullanılması ile %80’e kadar azaltılmıştır.

Kesici uçta oluşan maksimum yanak aşınması ise, kuru işlemeye göre; geleneksel soğutma yöntemiyle %21’e kadar, basınçlı hava kullanılması ile %30,3’e kadar, MMS kullanımı ile %40’a kadar ve kriyonenik soğutma yöntemi kullanılması ile %47,3’e kadar azaltılmıştır (Şekil 6.4). Hem Şekil 6.3 hem de Şekil 6.4 incelendiğinde, geleneksel soğutma, basınçlı hava ve MMS soğutma/yağlama yöntemlerine göre kriyojenik soğutmanın yüksek işleme hızlarındaki performansı daha belirgin görülecektir. Bu durumun nedeni literatürde geçen “kriyojenik soğutma yöntemi yüksek işleme hızlarında daha ekonomik ve verimlidir” ifadesine atfedilmiştir [29, 31-33, 35]. Bu çalışmada kullanılan basınçlı hava ile soğutmanın; kuru işleme ve geleneksel soğutmaya göre daha etkili ve verimli olduğu bulunmuştur. Bu durumun sebebi olarak kesme bölgesine ve takım/talaş ara yüzeyine püskürtülen basınçlı havanın soğutucu etkisiyle talaş kaldırma sıcaklığını düşürdüğü ve bununla birlikte, püskürtülen yüksek basınçlı hava sayesinde talaşın takımla temas alanını azalttığı ve ısı oluşumunda büyük etkisi olan sürtünme alanının önemli ölçüde küçülttüğü ve böylece takım ömrüne önemli katkılar sağladığı rapor edilmiştir [30]. MMS yöntemiyle

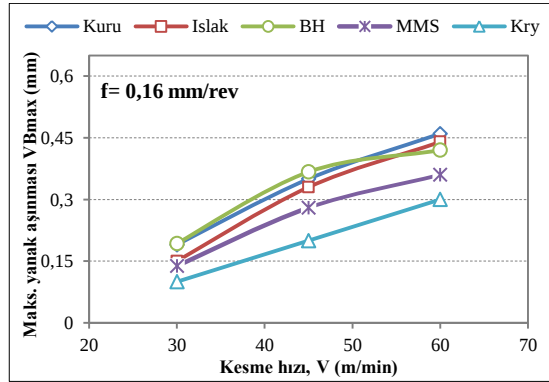
yağlama/soğutma yönteminin de kuru işleme, geleneksel soğutma ve basınçlı hava ile soğutma yöntemlerine göre daha etkili ve verimli olduğu bulunmuştur. Bu durum literatürde geçen, “tornalama işlemlerinde geleneksel ya da düşük basınçlı soğutma yöntemlerinin yerine takım-talaş temas yüzeyine düşük oranlarda kesme yağı ilavesi ile yüksek basınçta soğutma yöntemi talaş formu, talaşın kırılabilirliği, kesme kuvveti, yüzey kalitesi, sürtünme katsayısı ve takım ömrü üzerinde olumlu gelişmeler gösterir” ifadesiyle paralellik arz etmiştir [37-39].



(a)



(b)



(c)

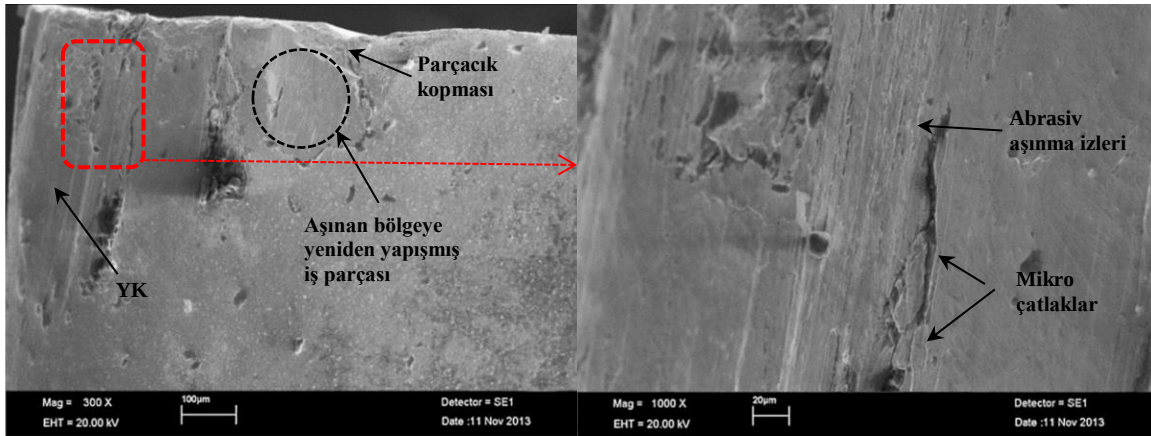
Şekil 6.4. Soğutma/yağlama yöntemlerinin maksimum yanak aşınması üzerindeki etkisi
a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme

6.1.2. SEM fotoğraflarıyla aşınma mekanizmalarının analizi

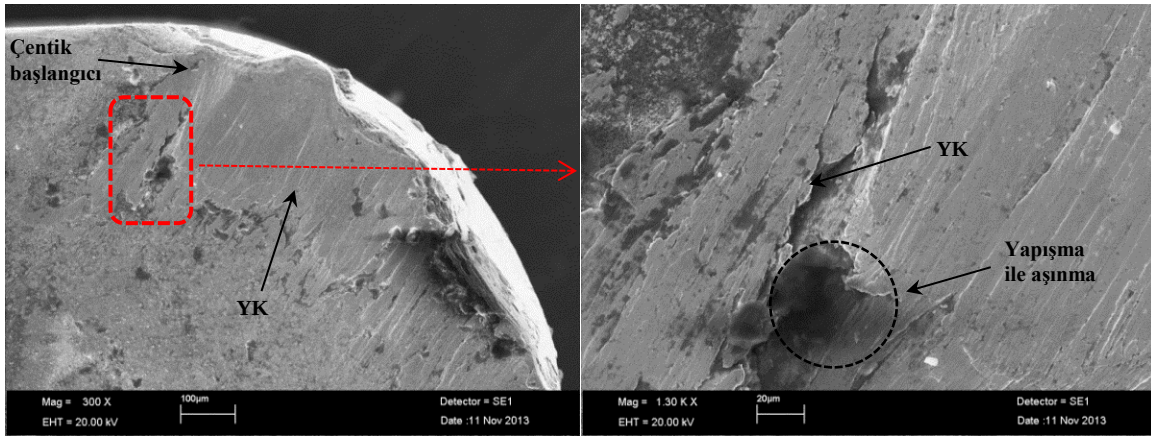
İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan kesici takımlarla yapılan işleme deneylerinden sonra kesici takımlardaki aşınma davranışlarını incelemek üzere SEM görüntüleri alınmıştır.

Kuru kesme altında yapılan deneylerde kesicide oluşan aşınma davranışlarının incelenmesi

Kesici uç radyüsünün 0,8 mm ve talaş derinliğinin 1 mm olmasından dolayı yan kenar aşınması burun yarıçapında veya burun yarıçapına yakın bölgede oluşmuştur. Resim 6.1’de ilk resme bakıldığında kesme yapan takımın burun bölgesine iş parçası malzemesinin sıvanmak suretiyle etkili bir şekilde yapıştığı ve bu bölgelerde yığıntı katmanı (YK ya da BUL: Built up layer) oluştuğu görülmektedir.



(a)

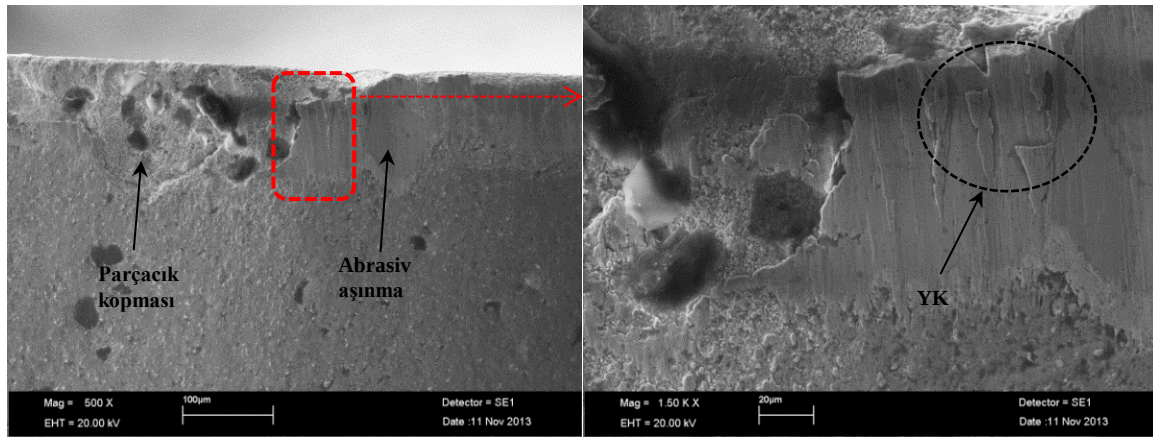


(b)

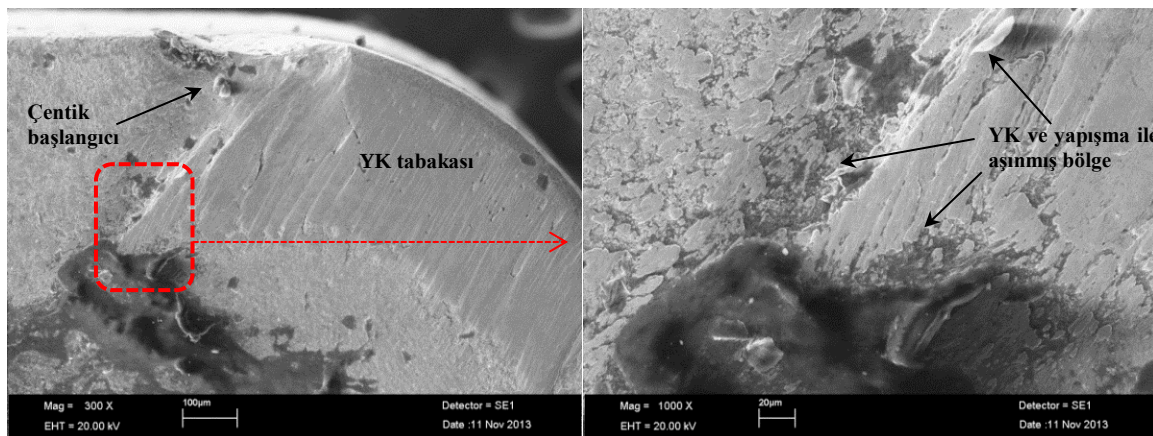
Resim 6.1. Kuru kesme altında $V=15$ m/min, $f=0,16$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Resim 6.1.a’da adheziv (yapışma) aşınma mekanizmasının etkisi ile yapışan ince malzeme tabakasının yer yer kalktığı görülmektedir. Ayrıca takım yüzeyinde aşınan bölgelere iş parçası malzemesinin tekrardan yapışarak bu bölgeleri doldurduğu görülmektedir. Kopma sonrası açıkta kalan bölgeye, kesme devam ettiği için, adheziv etkiyle birlikte daha fazla yapışma olmaktadır. Her defasında yapışmanın arttığı düşünülürse kopmayla birlikte

takımdan ayrılan parçaların miktarı da artacaktır. Yapışan tabakaların katman katman kalktığı görülebilmektedir. Yapışan malzeme katmanları üzerinde kesme sırasında oluşan abrasiv aşınma izleri açıkça görülmektedir. Ancak bu izlerin henüz takım malzemesi üzerine etki etmediği belirgindir. Ayrıca bu resimde yapışmış tabakanın kopmasıyla ortaya çıkan bölgede mikro-çatlaklar görülmektedir. Bu mikro çatlakların mekanik yorulmaların etkisiyle ortaya çıktığı söylenebilir. Resim 6.1.b’de, adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle takım-talaş yüzeyinde yığıntı katmanlarının oluştuğu açıkça görülmektedir. Ayrıca Resim 6.1.b’de, çentik başlangıcının oluştuğu tespit edilmiştir. Yapışan malzemenin bir süre sonra gerek altında oluşan difüzyon gerekse mekanik yorulmanın etkisi ile takım malzemesi ile birlikte küçük parçalar halinde takımdan uzaklaştığı görülmektedir.



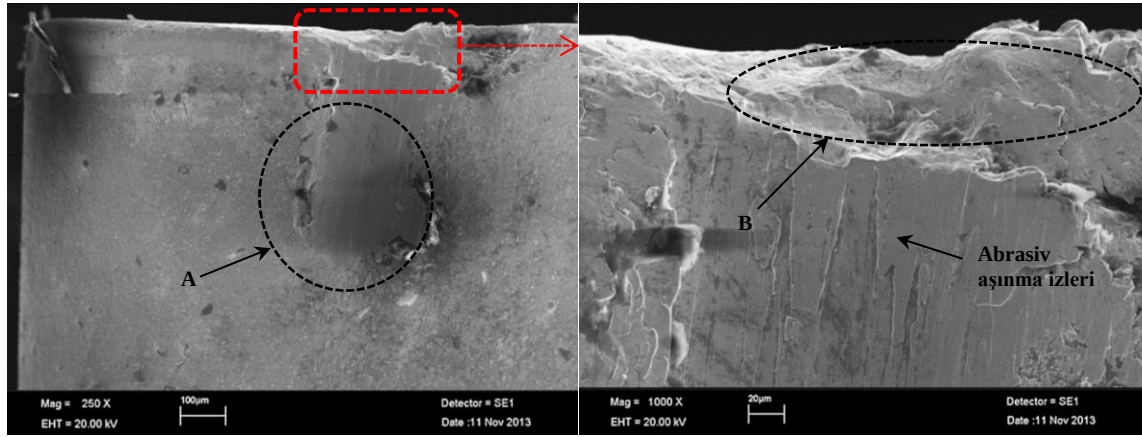
(a)



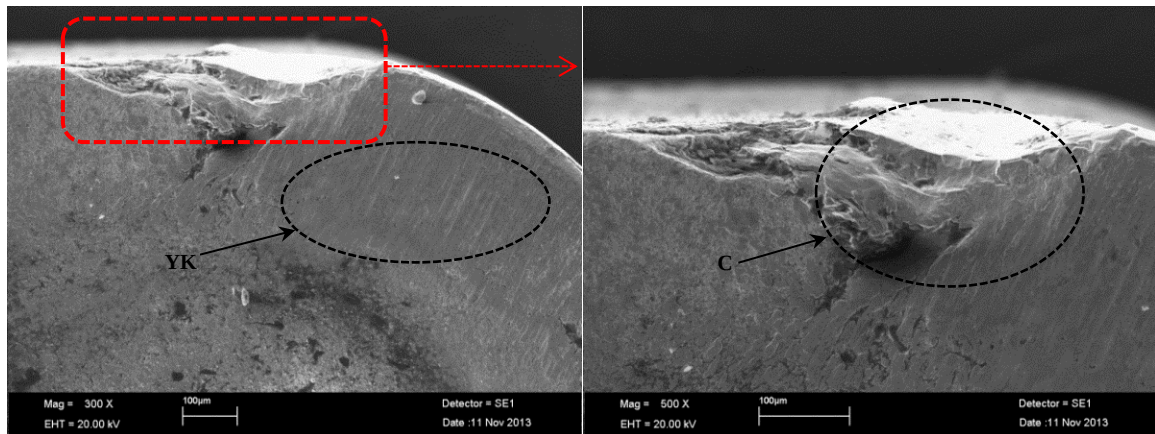
(b)

Resim 6.2. Kuru kesme altında $V=30$ m/min, $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Resim 6.2’de malzemenin kuru kesme altında $V=30$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev kesme parametreleriyle işlenmesinde, kesici uçta oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir. Resim 6.2.a’da, adheziv aşınma mekanizmasının etkisi ile yapışan ince malzeme tabakasının, takım malzemesi ile birlikte kalkarak parçacık kopmasına neden olduğu ve kesici kenar yüzeyinde düzenli bir abrasiv aşınmanın olduğu görülmektedir. Bu aşınma tipi kesici kenarın serbest yüzeyinde oluşan ve iş parçası malzemesinde bulunan sert parçacıkların neden olduğu tipik bir aşınma türüdür. Bu resimde kesici kenarın yan yüzeyine yapışan yığıntı katmanlarının varlığı açıkça görülmektedir. Resim 6.2.b incelendiğinde, takım-talaş yüzeyi boyunca sıvanmış talaş katmanı ve çentik oluşumu tespit edilmiştir. Adheziv aşınma mekanizmasıyla yapışan malzemenin kopup gittiği yerde tekrar yapışma başlamış ve yığıntı katmanı (YK) tabakaları oluşmuştur.



(a)



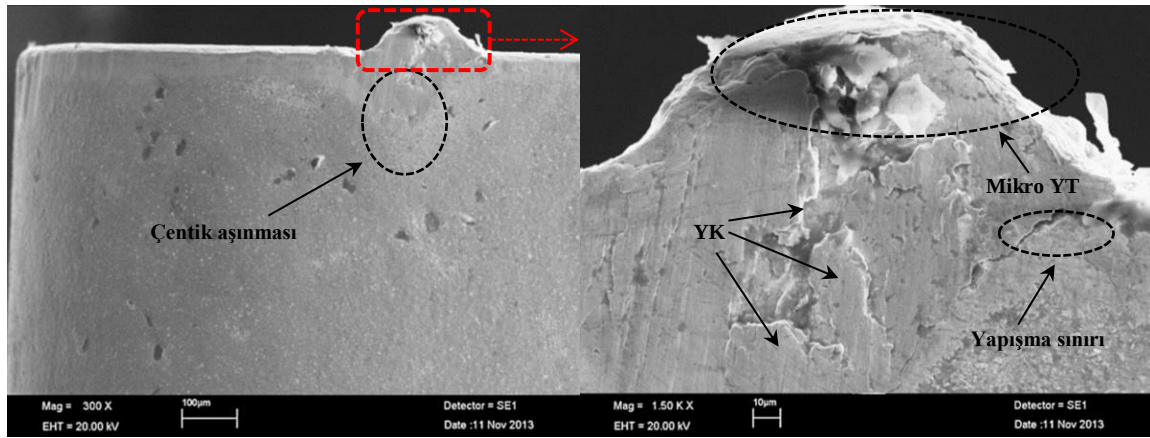
(b)

Resim 6.3. Kuru kesme altında, $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

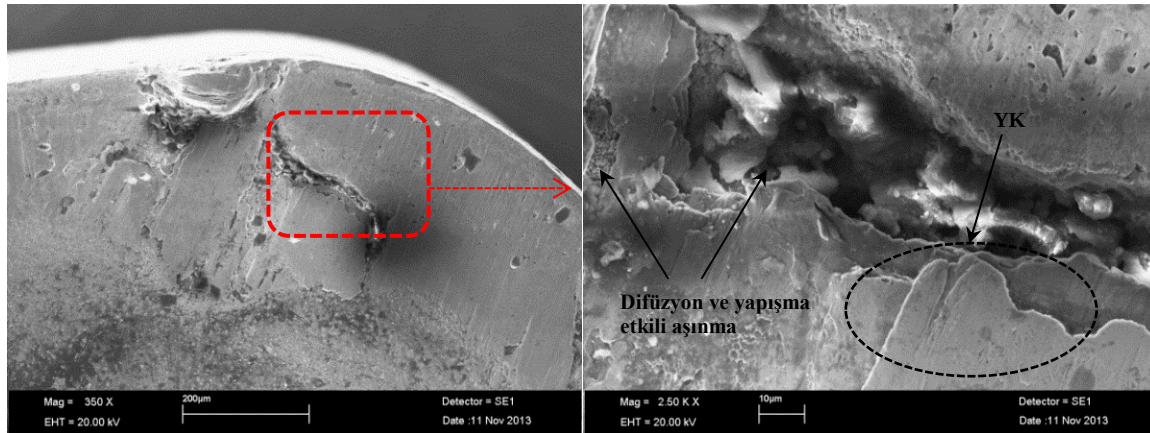
Resim 6.3’de kuru kesme altında $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev kesme parametreleriyle işlenmesinde, kesici uçta oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir. Resim 6.3.a’da “A” harfi ile belirtilmiş kısımda iş parçası malzemesinden kopan parçalar kesici uca yapışarak adheziv aşınması meydana getirmiş devamında kesici uç üzerinden koparak etkin kesici kenar üzerinde çentik aşınması oluşturmuştur. Literatüre göre de sementit karbür takımlar ile işlemede en çok karşılaşılan aşınma şekli, şiddetli yanak aşınması ile talaş derinliğinde çentik oluşumudur [140]. Nitekim bu çalışmada da özellikle kesme hızının 30 m/min’i aştığı deneylerde çentik aşınması oluşmaya başlamıştır. Kesme hızının artmasıyla kesicinin kesmeye katılan en son bölgesinde talaş derinliğinde oluşan çentikler daha da belirginleşmiştir. Çentik aşınması tipik bir adheziv aşınmasıdır ve oksidasyon aşınmasının da bu tip aşınmanın oluşumuna katkısı vardır. Resim 6.3.a’da da görüleceği üzere aşınma kesmenin sonunda, havanın kesme bölgesine temas ettiği bölgede oluşması nedeniyle bölgeseldir [156, 166]. Kesme işleminin devamında çentik aşınması sonucu oluşan oluklara iş parçası malzemesi yeniden kaynak olarak kesici ucun bir parçası haline gelmiştir. Aşınan bölgeye yeniden yapışan bu parçacıklar kesme işleminin devamında pekleşme noktasına ulaştığında takım malzemesiyle birlikte yeniden kopacak ve kesici uca daha büyük tahribatlar verecektir. Resim 6.3.a’da “B” harfi ile belirtilmiş kısımda kesicinin keskin kenarına yapışan ve geometrisini değiştirerek daha hızlı aşınmasına neden olan talaş yapışmaları, adheziv aşınması sonucu takım malzemesine yapışarak kopan parçacıklar ve termal/mechanik gerilmeler sonucunda oluşan mikro-kırılmalar ve takım malzemesi üzerine sıvıyan iş parçası üzerindeki abrasiv aşınma izleri görülmektedir. Resim 6.3.b’de takım-talaş yüzeyinde adheziv aşınma mekanizması sonucunda oluşan yığıntı katmanı açıkça görülmektedir. Resim 6.3.b’de “C” harfi ile belirtilmiş kısımda difüzyon ve yapışma etkisi ile aşınmış bölge tespit edilmiştir. Difüzyon aşınma mekanizması kesme işlemi esnasında daha çok kimyasal yükten etkilenir. Takım malzemesinin kimyasal özellikleri ile takım-iş parçası malzemesi arasındaki afinite difüzyon aşınma mekanizmasının ortaya çıkmasına sebep olur. Takım malzemesi sertliğinin bu tip aşınma üzerinde etkisi yoktur. Malzemeler arasındaki metalürjik ilişkiler aşınma miktarını belirler [156, 166]. Nitekim tornalama işlemlerinde kullanılan kesici takım malzemesi bağlayıcısı kobalt olan tungsten karbürden oluşmaktadır. Takım içerisinde bulunan karbon kesme süreci boyunca üzerine yapışan talaş ile difüze olmaktadır. Zaman içerisinde difüze olan karbon miktarı arttıkça bozulan matris yapısından dolayı takım malzemesinin yapısında bulunan çeşitli karbür partikülleri açığa çıkmaktadır.

Islak kesme şartlarında yapılan deneylerde kesicide oluşan aşınma davranışlarının incelenmesi

Resim 6.4’de iş parçası malzemesinin ıslak kesme altında $V=30$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev kesme parametreleriyle işlenmesinde, kesici uçta oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir.



(a)



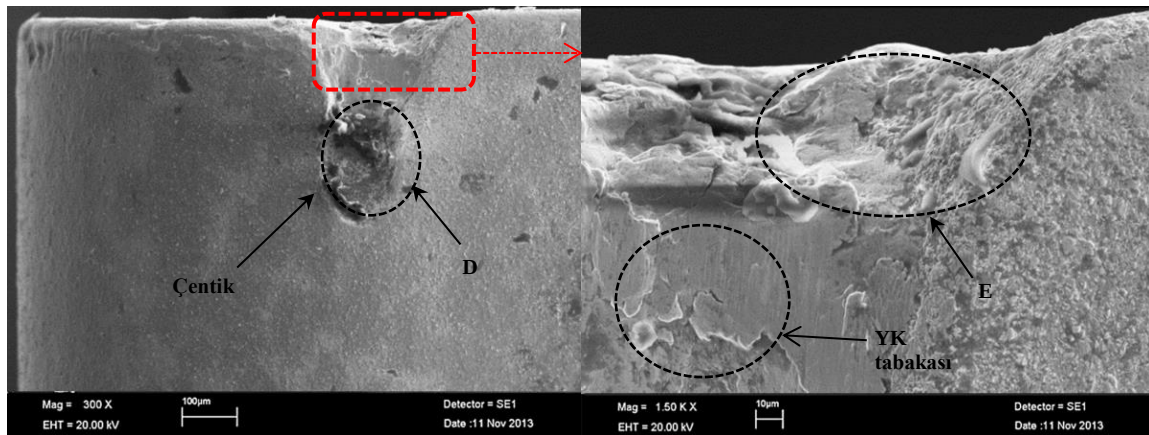
(b)

Resim 6.4. Geleneksel soğutma altında, $V=30$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

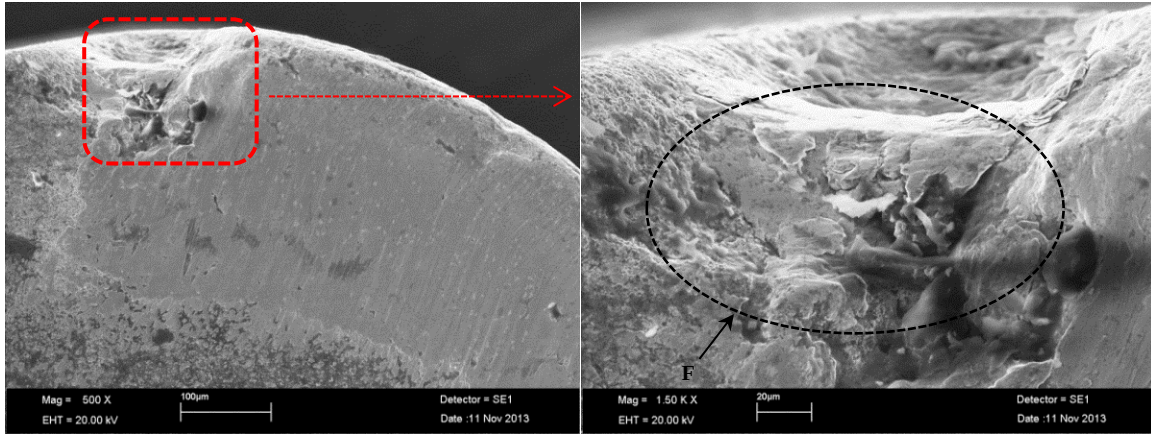
Resim 6.4.a’daki fotoğrafta kesicinin genel görüntüsü incelendiğinde ilk göze çarpan ana kesici kenarda kesme derinliğinin bittiği yerde oluşan çentik aşınmasıdır. Literatürde kılavuz (asıl) kesici kenarda oluşan çentik aşınmasının mekanik yüklerin bir sonucu olduğu ve daha çok sert malzemelerin işlenmesi esnasında aşındırıcı talaşların sebep olduğu belirtilmiştir [166]. Kesici kenarda oluşan çentik aşınması sonucu ortaya çıkan oluğu iş

parçası malzemesinin yapışarak doldurduğu görülmüştür. Resimde görülen bu yapışma, kesme kenarı hattını aşarak kesici geometrisini de değiştirmiştir. Yapışan iş parçası malzemesi kesicinin bir parçası haline gelmiş ve bu parça üzerine iş parçası malzemesi sıvanarak bir tabaka oluşturmuştur. Resim 6.4.a'da iş parçası malzemesinin yapışma sınırı da görülmektedir. Yapışan parça pekleşme noktasına ulaştığında bu sınırdan kopacak ve kesiciye daha büyük tahribatlar verecektir. Kesici ucun burun bölgesinde abrasiv aşınma izleri olduğu görülmektedir. Bu malzemelerde bulunan bazı elementler (Co, Ni, Cr) işlemeye karşı yüksek dayanım ve korozyon direnci oluşturmaktadır. Tipik olarak daha yüksek kobalt ve nikel içeriğinde işlemek daha zordur. Çünkü nikel ya da kobalt içeriği ya da titanyum bileşenleri parçaya sıcak sertlik eğilimi sağlamaktadır. Kobalt esaslı süper alaşımların mikro yapısının içinde bulunan sert aşındırıcı karbürler (örneğin; MC, M23C6) takım aşınmasının oluşmasına sebep olan abrasiv aşınma oluşumunu sağlarlar [144]. Resim 6.4.b incelendiğinde, takım malzemesine sıvanmış YK tabakası, bu tabakanın kalması ve difüzyon aşınma mekanizmasının etkisi ile takım-talaş yüzeyinde oluşan aşınmalar belirlenmiştir.

Resim 6.5'de, iş parçası malzemesinin geleneksel soğutma altında $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametreleriyle işlenmesinde oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir. Resim 6.5.a'da kesicinin genel görüntüsü incelendiğinde, oluşan çentik aşınmasının, $V=30$ m/min, $f=0,12$ mm/rev kesme parametrelerinde meydana gelen çentik aşınmasına göre boyutunun arttığıdır. Bu durumun sebebinin işleme sırasında oluşan yüksek ısı, iş parçasının yüksek dayanımı ve aşındırıcı talaşların olduğu düşünülmektedir.



(a)



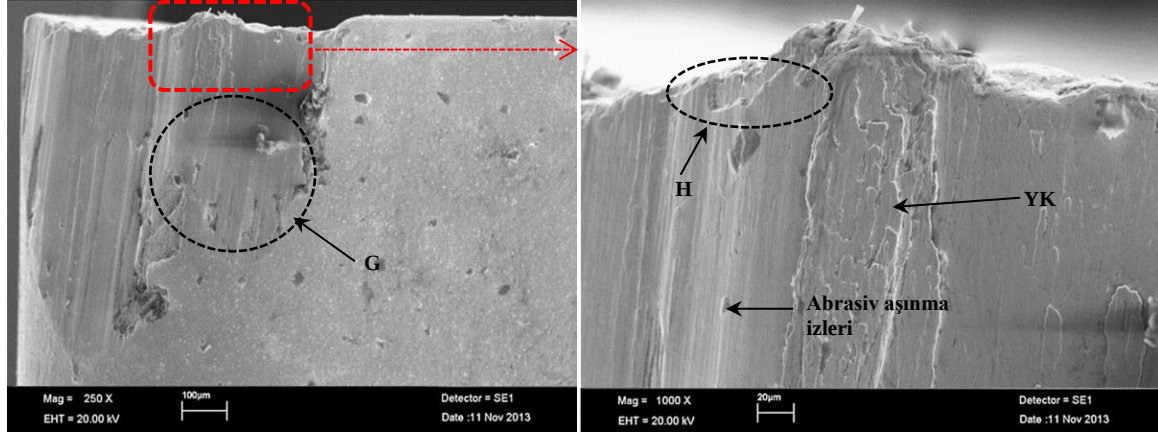
(b)

Resim 6.5. Geleneksel soğutma altında, $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

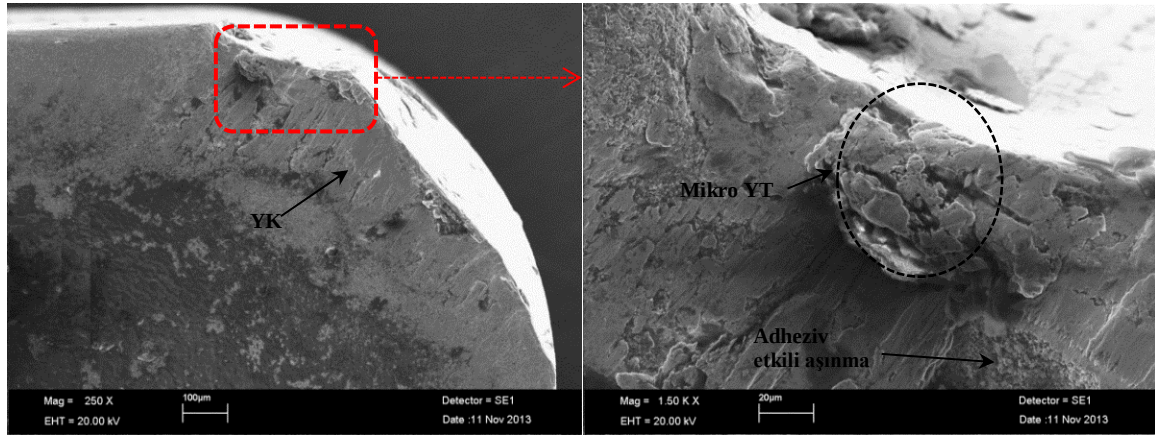
Aşınmadaki artış kesme hızındaki yükselme ve kesme bölgesindeki takım-talaş ara yüzeyinde artan sıcaklık ile ilişkilendirilmiştir [157, 168, 169]. Belirli bir sıcaklık aralığında takım ve iş parçası malzemeleri arasındaki kimyasal çekim gücü ve kesme kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkan yük adheziv aşınmayı oluşturan sebeplerdir. Bu durum çentik aşınmasının en yaygın şeklidir ve takım ile iş parçası malzemeleri arasındaki kimyasal çekim gücü ile doğrudan ilişkilidir [156, 166]. Resim 6.5.a'da "D" harfi ile belirtilmiş kısımda iş parçası malzemesinin çentik bölgesine yapıştığı görülmektedir. "E" harfi ile gösterilmiş kısımda adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle takım malzemesine yapışmış iş parçası malzemesinin belli bir pekleşme noktasına ulaştıktan sonra takım malzemesiyle birlikte bu bölgeden ayrıldığı belirlenmiştir. Bu resimde ayrıca takım üzerine sıvanan YK tabakalarında varlığı görülmektedir. Resim 6.5.b'de takım-talaş yüzeyine sıvanmış YK tabasında beliren beyaz renkli taneciklerin muhtemel iş parçası malzemesi ve çeşitli karbür partikülleri olduğu düşünülmektedir. Resim 6.5.b'de "F" harfi ile gösterilen bölgede görülen aşınmanın ana sebebi olarak difüzyon aşınma mekanizması olduğu tespit edilse de, yapışma aşınma mekanizmasının da burada etkili olduğu düşünülmektedir.

BH altında yapılan deneylerde kesicide oluşan aşınma davranışlarının incelenmesi

Bu bölümde malzemenin basınçlı hava altında işlenmesi esnasında ortaya çıkan takım aşınma mekanizmaları SEM vasıtasıyla incelenmiştir.



(a)



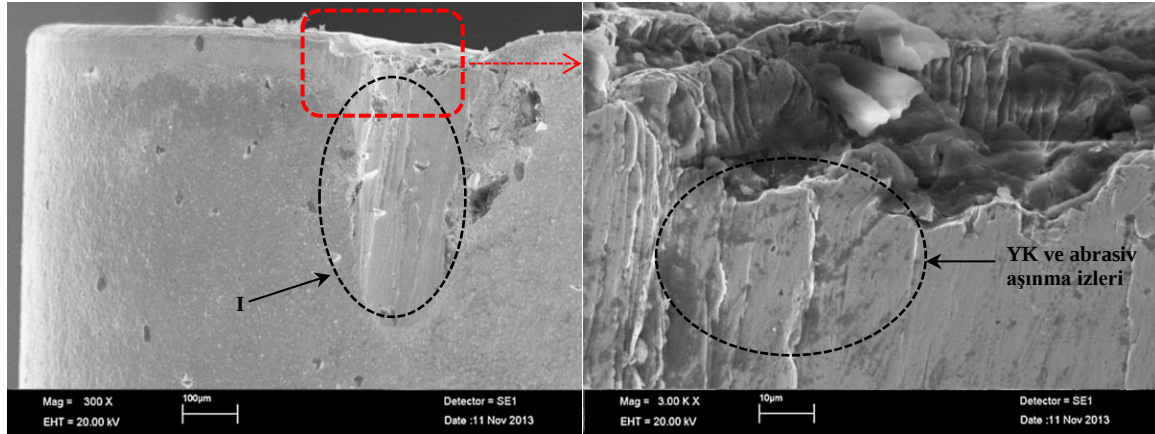
(b)

Resim 6.6. BH altında, $V=15$ m/min ve $f=0,08$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

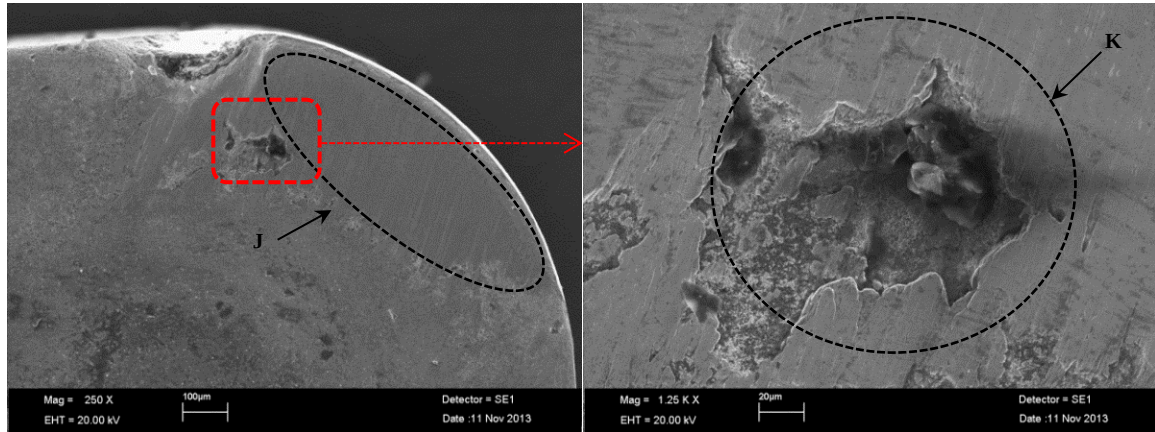
Resim 6.6'da malzemenin BH altında $V=15$ m/min, $f=0,08$ mm/rev kesme parametrelerinde işlenmesi sonucunda meydana gelen aşınma mekanizmaları verilmiştir. Resim 6.6.a incelendiğinde, kesme yapan takımın burun bölgesine iş parçası malzemesinin etkili bir şekilde sıvandığı ve bu bölgelerde yığıntı katmanlarının oluştuğu görülmektedir. Resim 6.6.a'da adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle kesici takım yüzeyine yapışan iş parçası malzemesinin belli bir pekleşme noktasından sonra takım malzemesi ile birlikte koptuğu tespit edilmiştir. Bu resimde ayrıca abrasiv aşınma izleri de görülmektedir. Bu izlerin henüz takım malzemesine etki etmediği ve sıvanan iş parçası malzemesi üzerinde olduğu belirlenmiştir. Resim 6.6.b incelendiğinde, ilk göze çarpan durum kesici takım burun geometrisinin bozulduğudur. Bu durumun sebebi olarak düşük kesme hızlarında malzeme yapışmasının oldukça etkin olduğudur. Kesme sürecinin devamında yapışan malzemenin belli bir süre sonra takım malzemesi ile birlikte ayrılması kesici geometrisinin bozulmasına yol açmıştır. Ayrıca Resim 6.6.b, adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle

oluşan yığıntı katmanlarını, mikro düzeyde oluşan yığıntı talaşları ve yapışma etkisiyle meydana gelen aşınmaları göstermektedir.

Resim 6.7’de malzemenin BH altında, $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev kesme parametreleriyle işlenmesinde, kesici uça oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir.



(a)



(b)

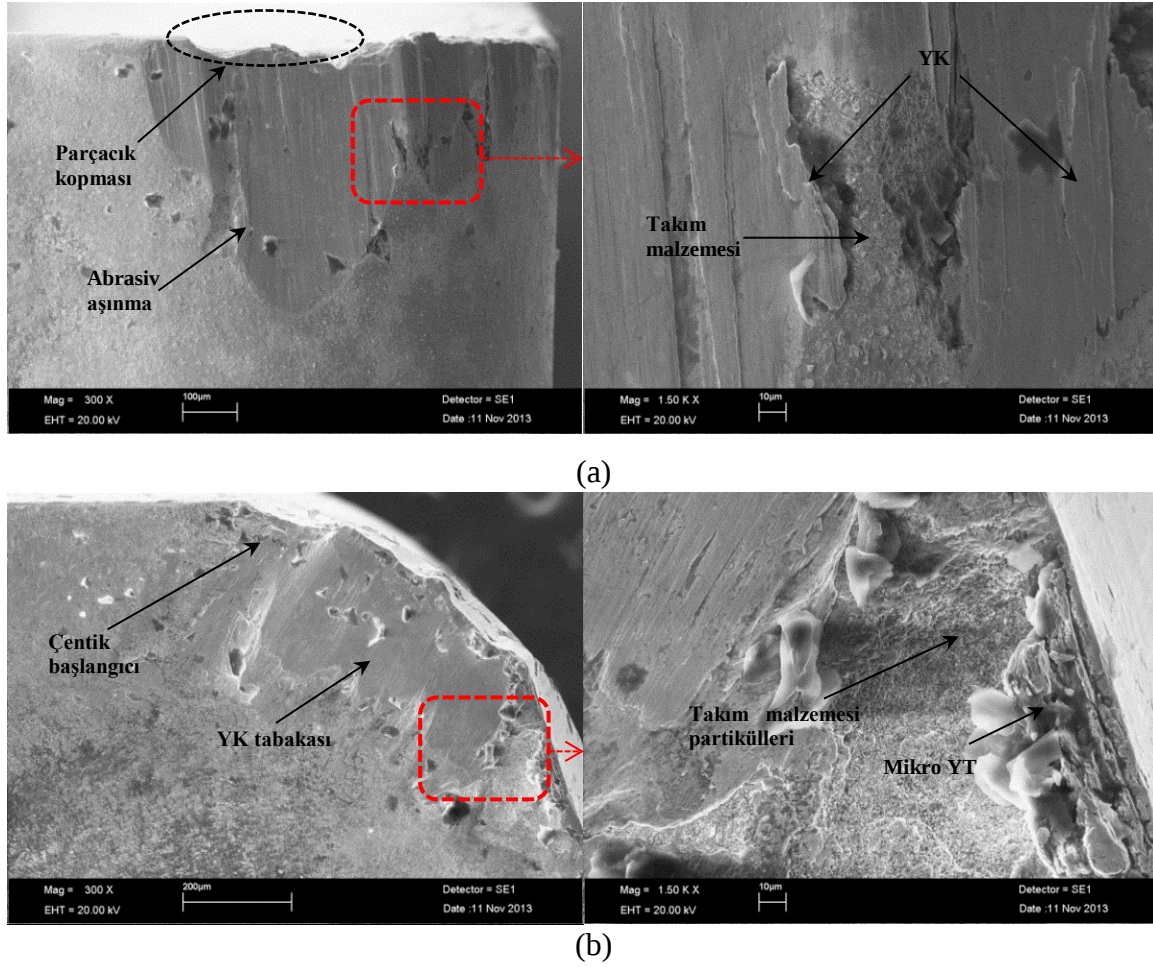
Resim 6.7. BH altında, $V=60$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Resim 6.7.a’da görüldüğü üzere iş parçası malzemesinden kopan parçalar kesici uca yapışarak adheziv aşınması meydana getirmiş devamında kesici uç üzerinden koparak etkin kesici kenar üzerinde çentik aşınması oluşturmuştur. Belirli bir sıcaklık aralığında takım ve iş parçası malzemeleri arasındaki afinite ve kesme kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkan yük adheziv aşınmayı oluşturan sebeplerdir. Bu aşınma türü talaş derinliğinin maksimum değerinde hızlı bir bölgesel aşınmaya sebep olur. Bu durum çentik aşınmasının en yaygın şeklidir ve takım ile iş parçası malzemeleri arasındaki afinite ile doğrudan ilgilidir [156,

166]. Kesme işlemi sürdüğü için çentik aşınması sonucu oluşan oluğa iş parçası malzemesi yapışmaya devam etmiştir. Çentik aşınmasını tetikleyen bir diğer etken ise oksidasyon aşınma mekanizmasıdır. Nitekim Resim 6.7.a'da "I" harfi ile belirtilmiş kısımda muhtemel oksidasyon aşınma mekanizmasının izleri görülmektedir. Oksidasyon aşınma mekanizması ile kesici kenarın talaş ile temasta olan kısmında, talaş genişliğinin sone erdiği noktada hava da kesme işlemine etkide bulunmuştur ve oksidasyon sebebiyle çentik oluşmuştur. Ayrıca Resim 6.7.a'da yığıntı katmanı ve bu katman üzerinde meydana gelen abrasiv aşınma izleri de görülmektedir. Resim 6.7.b'de "J" harfi ile belirtilmiş olan takım-talaş yüzeyinde ince bir tabaka halinde malzeme sıvanması oluşmuştur. Resim 6.7.b'de "K" harfi ile belirtilmiş kısımda difüzyon ve adheziv aşınma mekanizması sebebiyle meydana gelen bir oyuk görülmektedir. Oyuk yüzeylerinde malzeme yapışması ve bazı kısımlarda tabaka tabaka yapışan malzemenin kalktığı görülmektedir. Kopmalar sonucu kalkan takım malzemesinin altında difüzyona bağlı olarak açığa çıkan karbür partiküllerinin de yavaş yavaş belirginleştiği görülmektedir. Süper alaşımlarının kaplamasız karbür takımlarla işlenmesinde difüzyonun yaratmış olduğu ciddi problemler takım ömrünü sınırlamaktadır ve özellikle yüksek kesme hızlarında difüzyon aşınma mekanizması en etkin aşınma mekanizması olmaktadır. Talaş ve takım malzemesi arasındaki temas yüzeyinde, artan sıcaklık ve basınca bağlı olarak difüzyonlar meydana gelmektedir. Takım malzemesinin kimyasal özellikleri ve takım malzemesinin iş parçası malzemesine olan birleşme eğilimi; difüzyon aşınma mekanizmasının oluşumunu belirlemektedir. Bu süreçte takım malzemesinin sertliği çok fazla etkili değildir. Malzemeler arasındaki metalürjik ilişki aşınma mekanizmasının büyüklüğünü tayin etmektedir.

MMS altında yapılan deneylerde kesicide oluşan aşınma davranışlarının incelenmesi

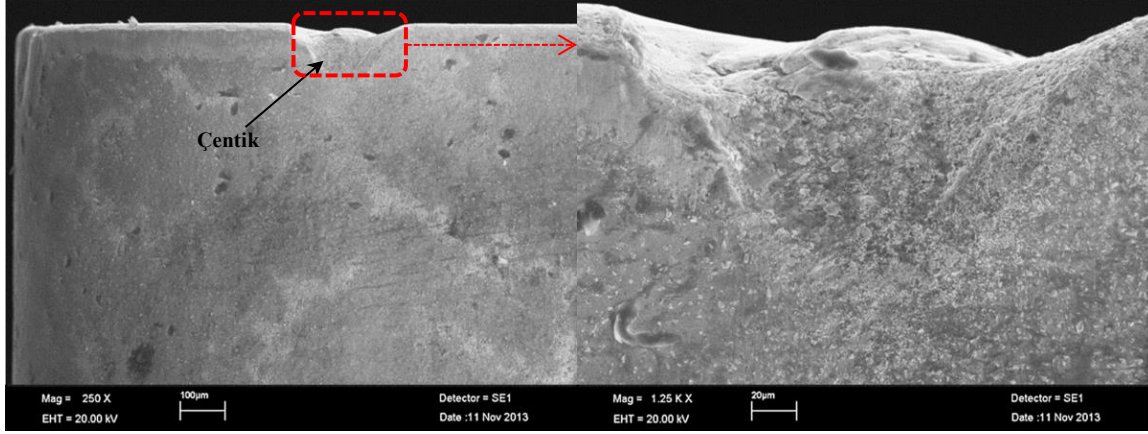
Bu bölümde malzemenin MMS altında işlenmesi esnasında ortaya çıkan takım aşınma mekanizmaları SEM fotoğraflarıyla araştırılmıştır. Resim 6.8'de malzemenin MMS altında $V=15$ m/min, $f=0,12$ mm/rev kesme parametrelerinde işlenmesi sonucunda meydana gelen aşınma mekanizmaları verilmiştir. Resim 6.8.a'da görülen kırılmaların adheziv aşınma mekanizması sonucu gerçekleştiği tahmin edilmektedir. İşleme esnasında kesici uçtaki aşırı basınç iş parçası malzemesinin kesici uca yapışmasına ya da kaynak olmasına sebep olur. Yapışan / kaynak olan bu malzemeler devam eden işleme sürecinde büyür ve belirli bir süre sonra maruz kaldığı gerilmelere dayanamayarak kesici takımdan koparak ayrılır.



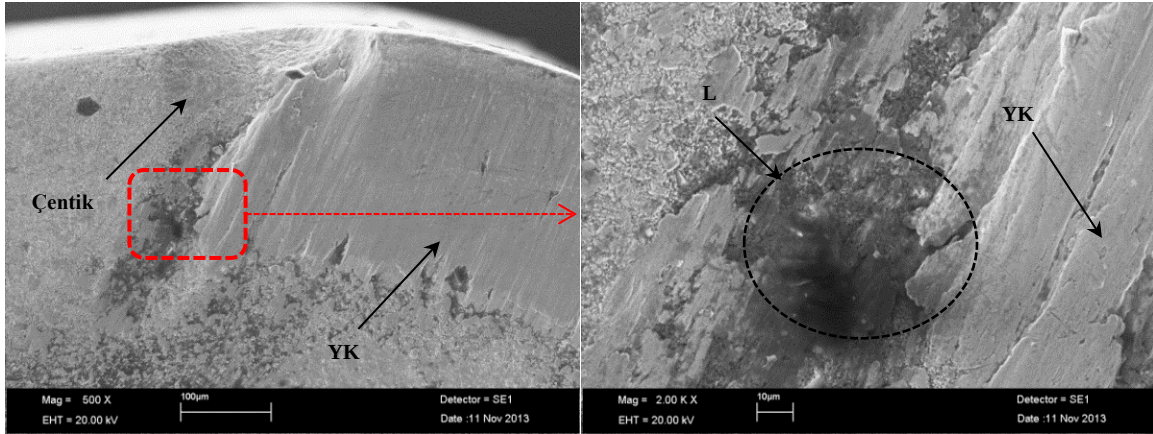
Resim 6.8. MMS altında, $V=15$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Talaşlı imalat işleminde yığıntı talaş olarak bilinen bu olay çoğunlukla sünek malzemelerin işlenmesinde sıkça görülür. Bu kopma ile kesici takımından da bir parça kopar ve dolayısıyla adheziv aşınma mekanizması vasıtasıyla kırılmalar gerçekleşir. Bu işlem, işleme esnasında periyodik olarak tekrarlandığı için kesici uç tedrici olarak aşınır [177]. Resim 6.8.a'da adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle kesici takım yüzeyine yer yer iş parçası malzemesinin katmanlar halinde sıvandığı tespit edilmiştir. Yapışan ince malzeme tabakasının yer yer kalktığı resimde görüldüğü gibi takım malzemesi partiküllerinin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Resim 6.8.b incelendiğinde, ilk göze çarpan durum kesici takım burun geometrisinin bozulduğudur. Bu durumun sebebi düşük kesme hızlarında malzeme yapışmasının oldukça etkin olduğudur. Kesme sürecinin devamında yapışan malzemenin belli bir süre sonra takım malzemesi ile birlikte ayrılması kesici geometrisinin bozulmasına yol açmıştır. Resim 6.8.b'de adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle takım-talaş yüzeyine sıvanmanın etkisiyle mikro düzeyde yığıntı talaşların ve yığıntı katmanlarının

oluştugu açıkça görülmektedir. Takım-talaş yüzeyinde meydana gelen aşınmalar neticesinde takım malzemesi partikülleri de açığa çıkmıştır.



(a)



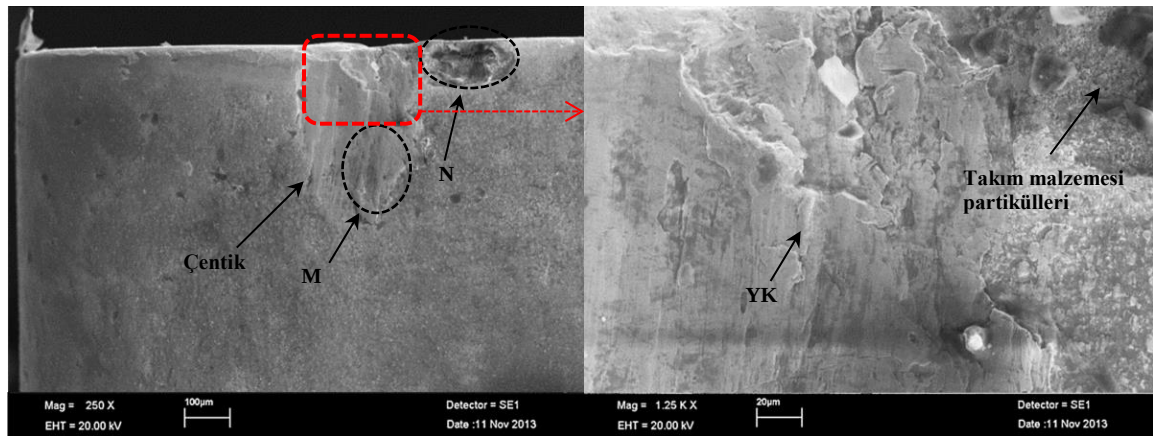
(b)

Resim 6.9. MMS altında, $V=30$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

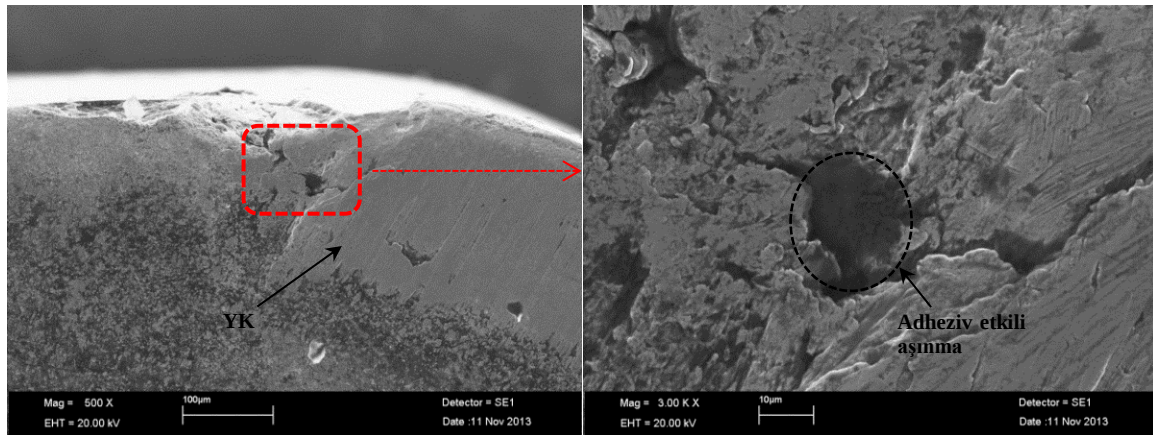
Resim 6.9'da malzemenin MMS altında $V=30$ m/min, $f=0,12$ mm/rev kesme parametrelerinde işlenmesi sonucunda meydana gelen aşınma mekanizmaları verilmiştir. Resim 6.9.a incelendiğinde, çentik aşınmasının oluşmaya başladığı görülmüştür. Literatürde elde edilen bulgulara göre de süper alaşımların sementit karbür takımlar ile işlenmesinde en çok karşılaşılan aşınma şekli, şiddetli yanak aşınması ile talaş derinliğinde çentik oluşumudur [140]. Nitekim bu çalışmada da özellikle kesme hızının 30 m/min'i aştığı deneylerde çentik aşınması oluşmaya başlamıştır. Kesme hızının artmasıyla kesicinin kesmeye katılan en son bölgesinde talaş derinliğinde oluşan çentikler daha da belirginleşmiştir. Malzemenin işlenmesi sırasında takım-talaş yüzeyinde yığıntı katmanının oluştuğu Resim 6.9.b'de görülmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinde iş parçası

malzemesinin, takımın talaş yüzeyine yapışması yığıntı katmanı (YK) ve takımın kesme kenarına yapışması yığıntı talaş (YT) olarak bilinir [178]. Resim 6.9.d’de “L” harfi ile belirtilen kısımda yapışan iş parçası malzemesinin kalkması sonucu ortaya çıkan oyuntular görülmektedir. Bu oyuntuların takım-talaş yüzeyinde olduğu görülmektedir. Ayrıca adheziv aşınması ve takım malzemesi arasındaki difüzyon nedeniyle ortaya çıkmış karbür partikülleri de göze çarpmaktadır.

Resim 6.10’da malzemenin MMS altında $V=60$ m/min, $f=0,08$ mm/rev kesme parametrelerinde işlenmesi sonucunda meydana gelen aşınma mekanizmaları verilmiştir. Resim 6.10.a’da görüldüğü üzere iş parçası malzemesinden kopan parçalar kesici uca yapışarak adheziv aşınması meydana getirmiş devamında kesici uç üzerinden koparak etkin kesici kenar üzerinde çentik aşınması oluşturmuştur.



(a)



(b)

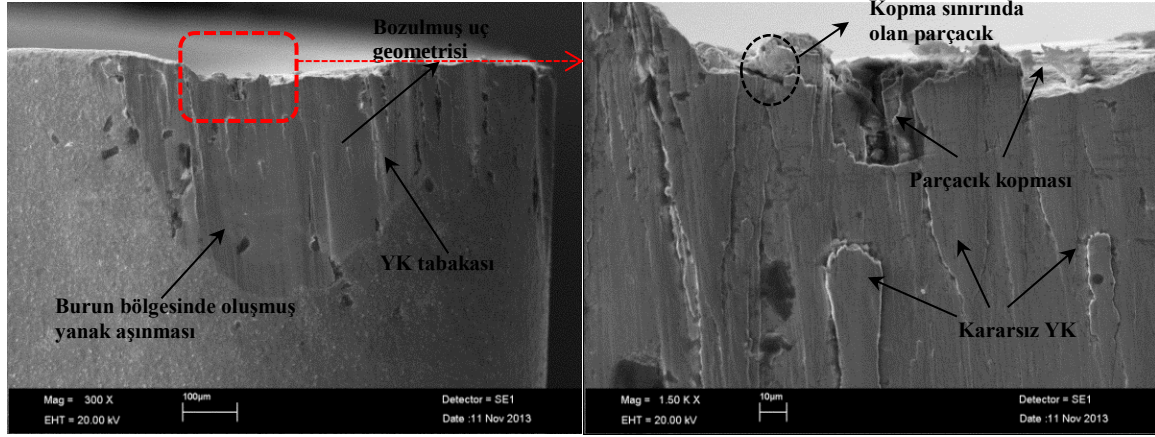
Resim 6.10. MMS altında, $V=60$ m/min ve $f=0,08$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Belirli bir sıcaklık aralığında takım ve iş parçası malzemeleri arasındaki afinite ve kesme kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkan yük adheziv aşınmayı oluşturan nedenlerdir. Bu aşınma türü talaş derinliğinin maksimum değerinde hızlı bir bölgesel aşınmaya neden olur. Resim 6.10.a'da "M" harfi ile belirtilmiş olan kısımda çentik aşınması sonucu oluşan oluğa kesme işleminin devamında iş parçası malzemesinin yapıştığı görülmüştür. Bu durum kesici takım-malzeme çifti arasındaki kaynaklanma ya da birleşme eğiliminin yüksek olduğunu kanıtlamıştır. Resim 6.10.a'da "N" harfi ile belirtilmiş olan kısımda görülen kırılmaların adheziv aşınma mekanizması sonucu gerçekleştiği tahmin edilmektedir. İşleme esnasında kesici uçtaki aşırı basınç iş parçası malzemesinin kesici uca yapışmasına ya da kaynaklanmasına neden olur. Yapışan / kaynaklanan bu malzemeler devam eden işleme sürecinde büyür ve belirli bir süre sonra maruz kaldığı gerilmelere dayanamayarak kesici takımdan koparak ayrılır. Ayrıca Resim 6.10.a, yığıntı katmanlarını ve bu katmanların takım malzemesi ile birlikte kopması neticesinde ortaya çıkan partikülleri göstermektedir. Burada adheziv aşınma mekanizmasının oldukça etkin olduğu söylenebilir. Resim 6.10.b'de takım-talaş yüzeyine sıvanmış yığıntı katmanlarını, yer yer talaş yüzeyinden ayrılmış katmanları ve adheziv aşınma mekanizmasıyla oluşmuş krateri görmek mümkündür.

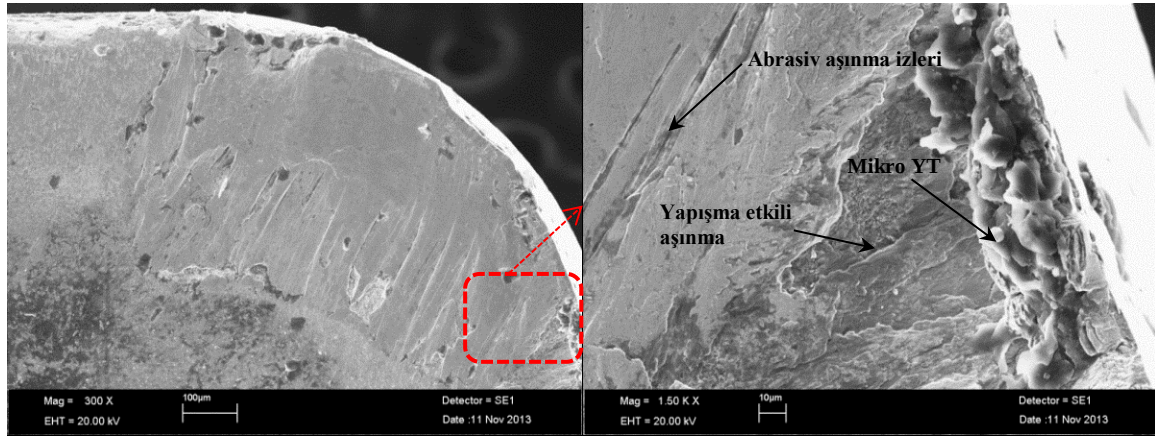
Kriyojenik soğutma altında yapılan deneylerde kesicide oluşan aşınma davranışlarının incelenmesi

Malzemenin kriyojenik soğutma altında işlenmesi esnasında ortaya çıkan takım aşınma mekanizmaları SEM fotoğraflarıyla araştırılmıştır. Resim 6.11'de malzemenin kriyojenik soğutma altında $V=15$ m/min, $f=0,12$ mm/rev kesme parametrelerinde işlenmesi sonucunda meydana gelen aşınma mekanizmaları verilmiştir. Resim 6.11.a'da görüldüğü gibi kesici uç radyüsünün 0,8 mm olması ve talaş derinliğinin 1 mm olması nedeni ile yan kenar aşınması burun yarıçapında veya burun yarıçapına yakın bölgede oluşmuştur. Bu resimde kesici ucun adheziv aşınma mekanizmasıyla birlikte ve abrasiv aşınma mekanizmasıyla aşınmış olabileceği düşünülmektedir. Kesme yapan takımın burun bölgesine iş parçası malzemesinin adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle etkili bir şekilde yapıştığı ve bu bölgelerde kararsız bir şekilde oluşmuş YK tabakalarının varlığı Resim 6.11.a'da görülmektedir. Yapışan ince malzeme tabakasının belli bir pekleşme noktasından sonra takım malzemesi ile birlikte yer yer koptuğu da görülmektedir. Ayrıca takım yüzeyinden kopan bölgelere iş parçası malzemesinin tekrardan yapışarak bu bölgeleri doldurduğu

görülmektedir. Kopma sonrası açıkta kalan bölgeye, kesme devam ettiği için, adheziv etkisiyle birlikte daha fazla yapışma olmaktadır.



(a)

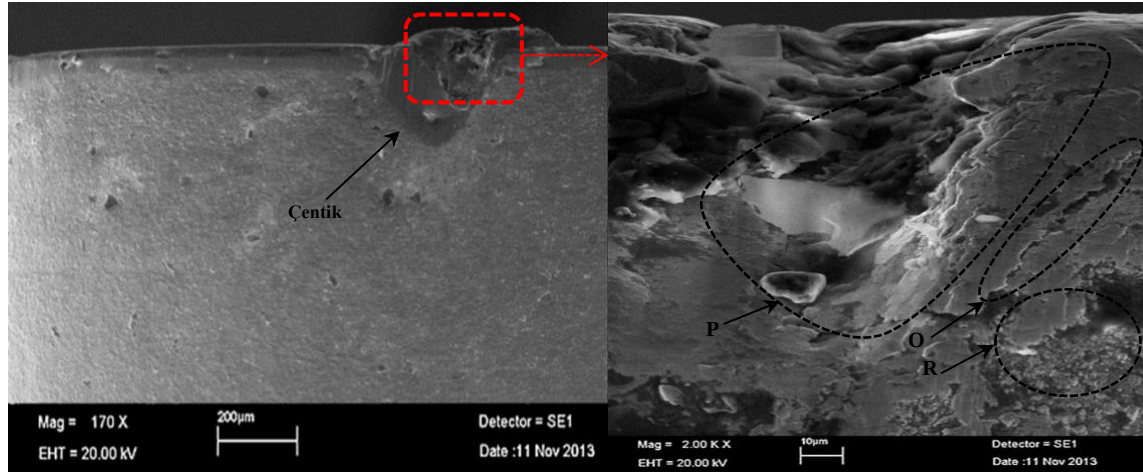


(b)

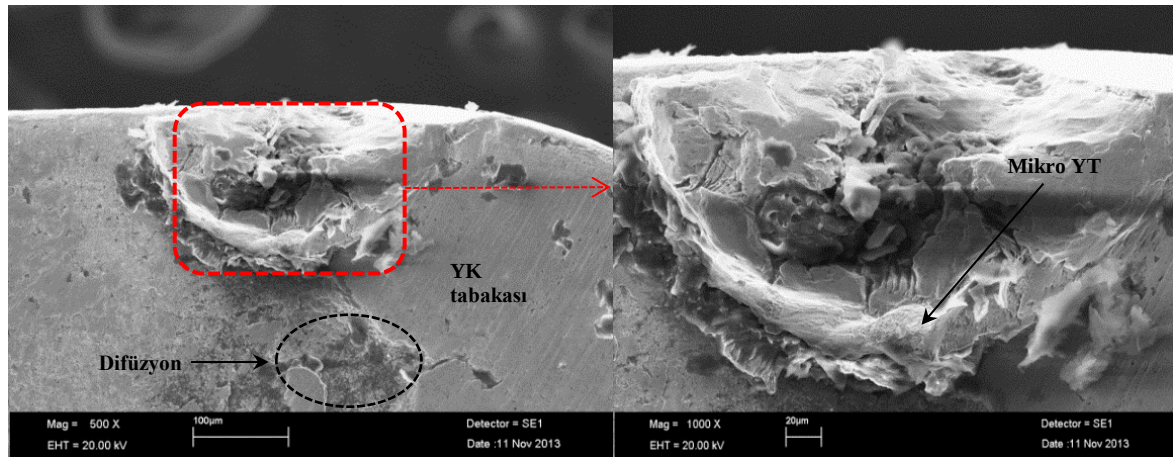
Resim 6.11. Kriyojenik soğutma altında, $V=15$ m/min ve $f=0,12$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Resim 6.11.b'de takım malzemesiyle birlikte kopan YK'ların kesici uç geometrisini tamamıyla değiştirdiği görülmektedir. Ayrıca adheziv aşınma mekanizmasıyla takım-talaş yüzeyinde YK'ların oluştuğu açıkça görülmektedir. Resim 6.11.b'de malzemenin düşük kesme hızında işlenmesi esnasında kesici takımın kesme hattı üzerinde mikro düzeyde oluşmuş yığıntı talaşların varlığı görülmektedir. Düşük sıcaklıklar ve yüksek basıncın iş parçası malzemesinin takım yüzeyine yapışmasının ana nedeni olduğu düşünülmektedir. Özellikle talaş yüzeyinde oluşan YT'lerin talaş akışında bir engel olarak davranacakları ve bu durumdan yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin olumsuz olarak etkileneceği tahmin edilmektedir. Ayrıca Resim 6.11.b'de yapışan malzeme katmanları üzerinde kesme

sırasında oluşan abrasiv aşınma izleri açıkça görülmektedir. Ancak bu izlerin henüz takım malzemesi üzerine etki etmediği belirgindir.



(a)

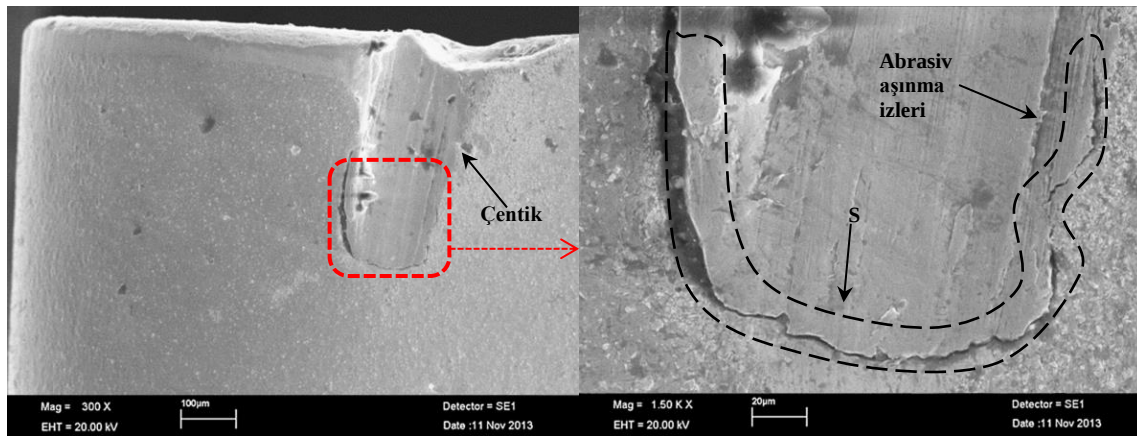


(b)

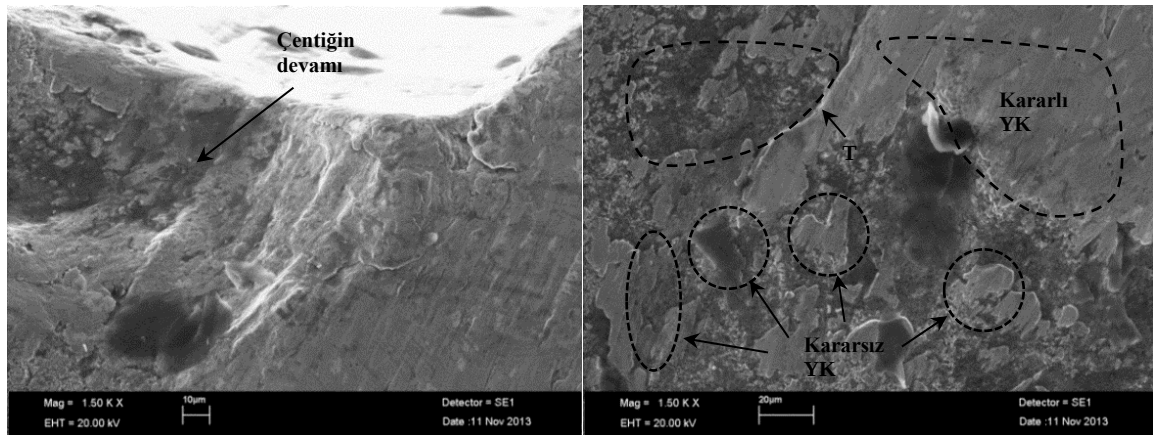
Resim 6.12. Kriyojenik soğutma altında, $V=45$ m/min ve $f=0,16$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Resim 6.12’de malzemenin kriyojenik soğutma altında $V=45$ m/min, $f=0,16$ mm/rev kesme parametrelerinde işlenmesi sonucunda meydana gelen aşınma mekanizmaları verilmiştir. Resim 6.12.a’da kesicinin genel görüntüsü incelendiğinde ilk göze çarpan ana kesici kenarda kesme derinliğinin bittiği yerde oluşan çentik aşınmasıdır. Kesme kenarında oluşan çentik aşınması sonucu ortaya çıkan oluğu iş parçası malzemesinin yapışarak doldurduğu görülmüştür. Resim 6.12’de görüldüğü gibi bu yapışma kesicinin kesme kenarı hattını aşarak kesici geometrisini de değiştirmiştir. Kesici kenar üzerine yapışan bu talaş parçalarının büyüklüğü ve biçimi kesici kenarın sağlıklı kesme yapabilmesini

engellemektedir. Yapışan malzemenin neden olduğu kesici kenar geometrisinin değişmesi birinci ve ikinci deformasyon bölgelerindeki kayma ve talaş akışı üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Bu yapışma, kesme süreci boyunca derece derece takımın kesme kabiliyetinin bozulmasına yol açmaktadır [148]. Resim 6.12.a'da "O" harfi ile belirtilen kısımda iş parçası malzemesinin yapışma sınırı görülmektedir. Yapışan parça pekleşme noktasına ulaştığında bu sınırdan kopacak ve kesiciye daha büyük tahribatlar verecektir. Bu durum adheziv aşınma mekanizmasının bu bölgede oldukça etkin olduğunun bir göstergesidir. Resim 6.12.a'da "P" harfi ile belirtilen kısımda kararsız YK tabakalarının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca "R" harfi ile belirtilen kısımda difüzyon ve adheziv aşınma mekanizması sonucunda açığa çıkan iş parçası malzemesi partikülleri de görülmektedir. Resim 6.12.b'de YK tabakası, mikro seviyede oluşmuş YT, difüzyon ve adheziv aşınma mekanizmalarından kaynaklanan aşınmalar tespit edilmiştir.



(a)



(b)

Resim 6.13. Kriyojenik soğutma altında, $V=60$ m/min ve $f=0,16$ mm/rev parametrelerinde kesicide oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması

Resim 6.13’de iş parçası malzemesinin kriyojenik soğutma altında $V=60$ m/min ve $f=0,16$ mm/rev kesme parametreleriyle işlenmesinde kesici uçta oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir. Resim 6.13.a’da kesicinin genel görüntüsü incelendiğinde oluşan çentik aşınmasının, bir önceki SEM resminde görülen ($V=45$ m/min, $f=0,16$ mm/rev) çentik aşınmasına göre boyutunun arttığı görülmektedir. Bu durumun sebebinin ise işleme sırasında oluşan yüksek ısı, iş parçasının yüksek dayanımı ve aşındırıcı talaşların olduğu düşünülmektedir. Aşınmadaki artış kesme hızındaki yükselme ve kesme bölgesindeki takım-talaş ara yüzeyinde artan sıcaklık ile ilişkilendirilmiştir [157, 168, 169]. Belirli bir sıcaklık aralığında takım ve iş parçası malzemeleri arasındaki kimyasal çekim gücü ve kesme kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkan yük adheziv aşınmayı oluşturan sebeplerdir. Bu durum çentik aşınmasının en yaygın şeklidir ve takım ile iş parçası malzemeleri arasındaki kimyasal çekim gücü ile doğrudan ilişkilidir [156, 166, 179]. Resim 6.13.a’da adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle çentik bölgesini yapışarak doldurmuş iş parçası malzemesini görmek mümkündür. Burada yapışan iş parçası malzemesinin kesici takımla bütünleşerek kesicinin bir parçası gibi davrandığı görülmektedir. Öyle ki resimde yapışan iş parçası malzemesi üzerinde kesme esnasında oluşmuş abrasiv aşınma izlerinin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu resimde “S” harfi ile belirtilen kısımda malzemenin kesici takıma yapışma sınırı da net bir şekilde görülmektedir. Yapışan iş parçası malzemesi belli bir pekleşme noktasından sonra bu sınırdan itibaren koparak kesiciye daha büyük tahribatlar verecektir. Resim 6.13.a’da çentik aşınmasının devamında talaş yüzeyinde oluşmuş tahribat gösterilmiştir. Resim 6.13.b’de ise adheziv aşınma mekanizmasının bir sonucu olan kararlı YK ve karasız YK’ların varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca talaş yüzeyinde “T” harfi ile belirtilmiş kısımda difüzyon ve adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle oluşmuş aşınmalar da görülmektedir.

6.1.3. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

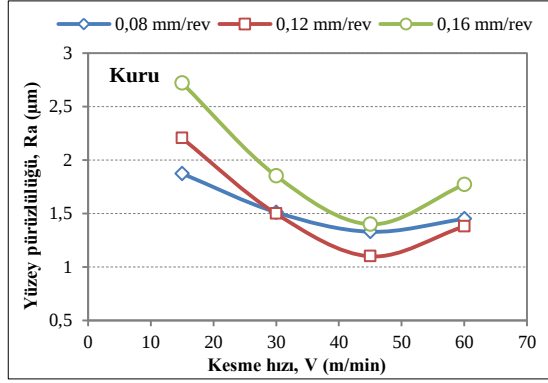
Malzemelerin işlenebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birisi de işlenen yüzeylerin yüzey kalitesidir [157, 166, 174]. Bu sebeple, kobalt esaslı Haynes 25 süper alaşımının işlenebilirliğini değerlendirmek ve soğutma/yağlama performanslarını ortaya koymak için işlenen yüzeylerin aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, işlenen yüzey üzerinden işleme yönünde çevresel olarak rastgele üç farklı noktadan üçer kez ölçülmüş ve ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen

sonuçlar; soğutma/yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak, Çizelge 6.3’de toplu halde verilmiştir. Her bir soğutma/yağlama şartında işlenen yüzeylerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak değişimlerini gösteren grafikler Şekil 6.5’de verilmiştir.

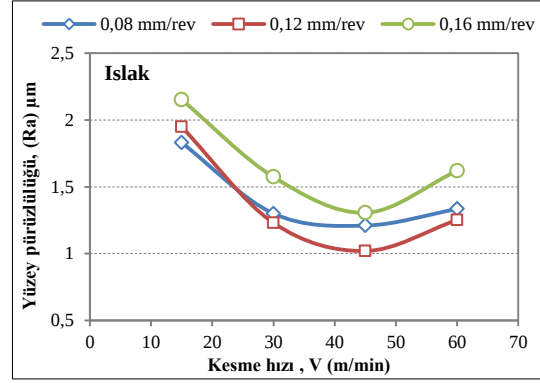
Çizelge 6.3. Kesme hızı, ilerleme oranı ve soğutma/yağlama şartına bağlı olarak işlenen yüzeylerde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

Kesme hızı (m/min)	İlerleme mm/rev	Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü, Ra (μm)				
		Kuru	Islak	BH	MMS	Kriyojenik
15	0,08	1,874	1,830	2,000	2,075	1,930
15	0,12	2,204	1,948	2,162	2,058	2,080
15	0,16	2,720	2,152	2,182	2,56	2,273
30	0,08	1,512	1,300	1,148	0,920	1,080
30	0,12	1,498	1,230	1,100	0,90	0,980
30	0,16	1,852	1,574	1,360	1,220	1,290
45	0,08	1,330	1,210	1,066	0,780	0,723
45	0,12	1,100	1,020	0,910	0,698	0,593
45	0,16	1,400	1,306	1,080	1,020	0,850
60	0,08	1,450	1,334	1,200	0,920	0,720
60	0,12	1,380	1,252	1,050	0,880	0,572
60	0,16	1,772	1,620	1,350	1,100	0,780

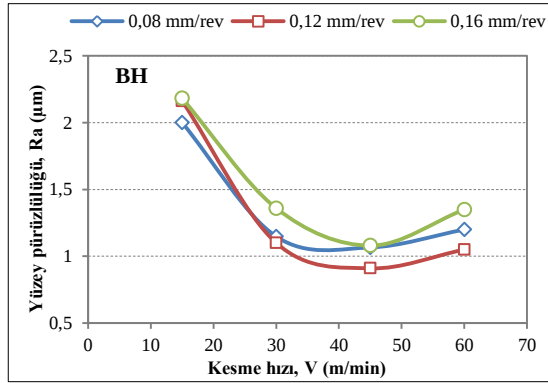
Şekil 6.5.a incelendiğinde, bütün işleme koşulları altında 15 m/min’lik kesme hızı değerinde işlenen yüzeylerde en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülmüştür. Bu durumun sebebi olarak düşük kesme hızında takımın daha erken aşınma sürecine girerek yüksek oranda aşınması ile ilişkilendirilmiştir. Nitekim 15 m/min kesme hızında çekilen SEM fotoğrafları ve optik mikroskop görüntüleri bu görüşü doğrulayıcı niteliktedir. Ayrıca SEM fotoğraflarında görülen 15 m/min’lik kesme hızında oluşan yığıntı katmanlarının da yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde arttırdığı düşünülmektedir. Çünkü kesici uç üzerindeki yığıntı talaş, kesici takım üzerinden iş parçası malzemesine doğru çıkıntı oluşturarak talaş derinliğini ve kesicinin kesme geometrisini değiştirir. Bu değişimin sonucu olarak işlenen malzeme ile temas eden düzensiz kesme geometrisi de yüzey pürüzlülüğünü artırır [168, 180-182].



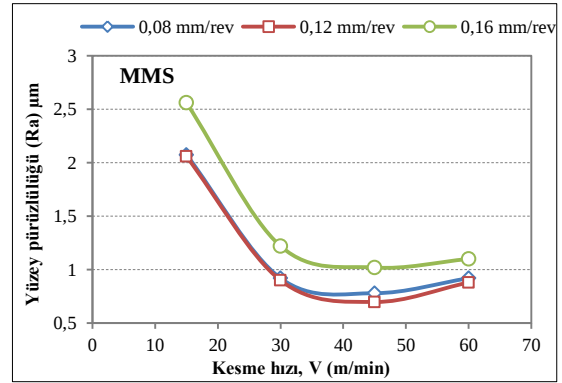
(a)



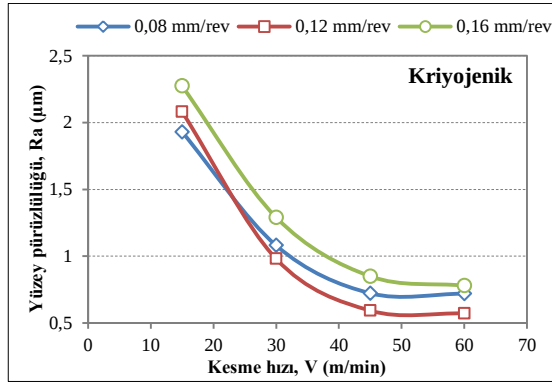
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 6.5. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi

a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik

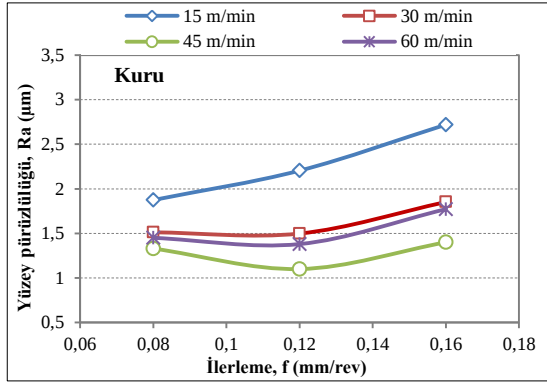
Şekil 6.5 incelendiğinde, göze çarpan bir durum ise diğer parametrelerden bağımsız olarak artan kesme hızıyla beraber ortalama yüzey pürüzlülüğündeki düşme eğilimidir. Kesme hızının artmasına paralel olarak kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasıyla beraber 1. deformasyon bölgesinde plastik deformasyon kolaylaşırken aynı şekilde 2. deformasyon bölgesinde talaş akışı ve talaşın biçimlenmesi kolaylaşmaktadır. Önceki bölümde optik mikroskop ve SEM resimlerinde kesme hızının 15 m/min'den 30 m/min'e yükseltilmesiyle

yanak aşınmasının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün azalmasında önemli derecede etkili olmuştur. Ayrıca kesme hızının artışı yığıntı talaş oluşumunu ve yığıntı katmanlarını azaltarak takım aşınmasını olumlu yönde etkilemekte ve bu durum, beklenen şekilde yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olmaktadır. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak, yüzey kalitesindeki iyileşme, beklenen bir özellik olup yüzey kalitesini iyileştirmek için kesme hızının artırılması literatürde karşılaşılan en yaygın yöntemdir [183]. Ancak kesme hızındaki aşırı artışlar, takımın aşınma sürecine daha erken girmesine sebep olacağından (aşırı yüksek sıcaklıkların kesici takımın sıcak sertliğini olumsuz etkilemesi sebebiyle), kesme hızının belli bir sınıra kadar artırılması yüzey kalitesi açısından olumlu olurken, daha fazla artırılması yüzey kalitesinde tekrar kötüleşmeye sebep olabilmektedir [154, 157, 166, 174, 184, 185]. Takımın aşınma sürecine girerek yüzey pürüzlülüğünün belli değerlerden sonra tekrar artışa geçtiği, özellikle kuru işleme ve ıslak işleme soğutma şartlarında daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Söz konusu grafiklerin tamamında gözlenen artan kesme hızıyla yüzey kalitesinin iyileşme eğilimi, takım üreticileri verilerine [158] ve pilot deneylere bağlı alınarak seçilen kesme hızı değerlerinin aşırı yüksek olmadığını göstermektedir. Haynes 25 süper alaşımının işlenmesinde bütün soğutma/yağlama koşullarında 15 m/min’lik kesme hızında işlenen yüzeylerde en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiş olup; kuru işlemede 2,72 μm , geleneksel soğutma altında 2,152 μm , basınçlı hava altında 2,182 μm , MMS ile işlemede 2,56 μm ve kriyojenik soğutma şartında 2,273 μm olarak meydana gelmiştir. Kesme hızı %100 artışla 30 m/min’e yükseltildiğinde en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerleri; kuru işleme için %32 azalarak 1,852 μm , ıslak işleme için %26,9 azalarak 1,574 μm , BH ile işlemede %37,67 azalarak 1,36 μm , MMS ile işlemede %59 azalarak 1,22 μm , kriyojenik işlemede ise %36 azalarak 1,29 μm olarak tespit edilmiştir. Kriyojenik soğutma şartında yapılan deneyler hariç diğer işleme şartlarında en iyi yüzey pürüzlülük sonuçları 45 m/min’lik kesme hızında elde edilmiştir. Kesme hızının 45 m/min’lik seviyesinde ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 30 m/min’lik kesme hızına göre, kuru işlemede %24,4 ile %40,6 arasında, ıslak işlemede %17 ile %35,2 arasında, BH ile işleme de %20,6 ile %33,1 arasında, MMS ile işlemede %16,4 ile %42,8 arasında azalmıştır. Yukarıda açıklandığı gibi bu kesme hızı sınırından itibaren artan kesme hızıyla beraber kesici uç aşınma mekanizmalarının hızlanması nedeniyle yüzey pürüzlülük değerleri de artışa geçmiştir. Kriyojenik işlemede takım aşınmasına bağlı olarak en iyi pürüzlülük değerleri 60 m/min’lik kesme hızında olmuş ve 30 m/min’lik kesme hızına göre ortalama pürüzlülük değerleri %39,5 ile %55,6 arasında azalmıştır. Tüm deneylerde elde

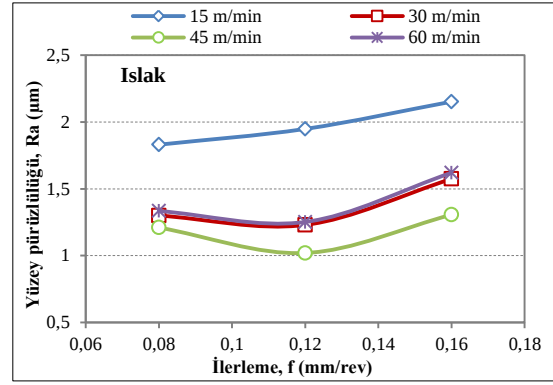
edilen en yüksek yüzey pürüzlülüğü ile (kuru işleme $V=15$ m/min - $f=0,08$ mm/rev, $R_a=2,72$ μ m) en düşük yüzey pürüzlülüğü (kriyojenik işleme $V=60$ m/min – $f=0,12$ mm/rev, $R_a=0,572$ μ m) arasında %475,5 oranında bir fark oluşmuştur.

İlerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

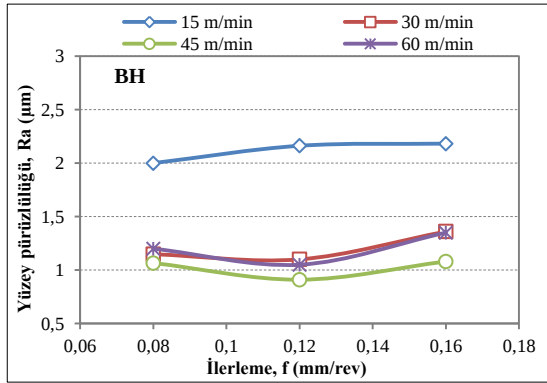
Yapılan çalışmalar işlenen yüzeylerin yüzey kalitesi üzerinde en etkili parametrelerin ilerleme ve kesici takım burun yarıçapı olduğunu göstermektedir [157, 174, 185]. Bu çalışmada kesici takım burun yarıçapı sabit (0,8 mm) bir parametre olarak alındığında değişken parametre olarak seçilen ilerleme miktarına göre ayrıca bir değerlendirme yapılmıştır. İlerlemeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişimi gösteren grafikler, soğutma/yağlama koşulları ve kesme hızı parametreleri de dikkate alınarak Şekil 6.6'da toplu halde gösterilmiştir. Şekil 6.6'da grafikler incelendiğinde, en düşük R_a değerleri, kuru işleme şartında 45 m/min kesme hızı ve 0,12 mm/rev ilerlemede 1,1 μ m, ıslak işlemede 45 m/min kesme hızı ve 0,12 mm/rev ilerlemede 1,02 μ m, BH ile işlemede 45 m/min kesme hızı ve 0,12 mm/rev ilerlemede 0,91 μ m, MMS ile işlemede 45 m/min kesme hızı ve 0,12 mm/rev ilerlemede 0,698 μ m ve kriyojenik işlemede 60 m/min kesme ve 0,12 mm/rev ilerlemede 0,572 μ m olarak oluşmuştur. Literatürde, ilerleme değeri ile yüzey pürüzlülüğü arasında artan bir ilişki olduğu ve ilerleme değerindeki artışa bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğündeki artış, beklenen bir özellik olup yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için ilerleme değerinin azaltılması belirtilmektedir [174]. Fakat bu çalışmada genel olarak bütün işleme şartlarında ilerleme değerinin en düşük seviyesinden orta seviyeye yükseltilmesiyle ortalama yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Bu durum ilerleme değerinin çok küçük olmasına ve dolayısıyla tezgâh-iş parçası- takım titreşimlerinden ve yığıntı talaş formundan olumsuz etkilenmesine atfedilebilir. Ayrıca deneylerde kaldırılan sabit talaş hacminde en düşük ilerlemede ($f=0,08$ mm/rev) kesici takımın daha fazla aşınmasının yüzey pürüzlülüğünü de olumsuz olarak etkilediği düşünülmektedir. Literatürde ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de artacağı belirtilmektedir. Bu çalışmada da tüm soğutma yöntemleri için ilerleme miktarı 0,12 mm/rev'den sonra arttıkça yüzey pürüzlülüğünün de arttığı görülmektedir. İlerleme miktarının artması yüksek ilerleme kuvvetine, düşük kayma açısına ve kaldırılan talaş hacminin artmasına neden olmaktadır [186]. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemektedir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda da, ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetlerinin ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür [187].



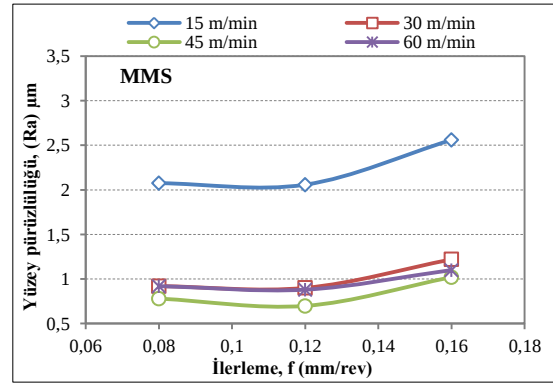
(a)



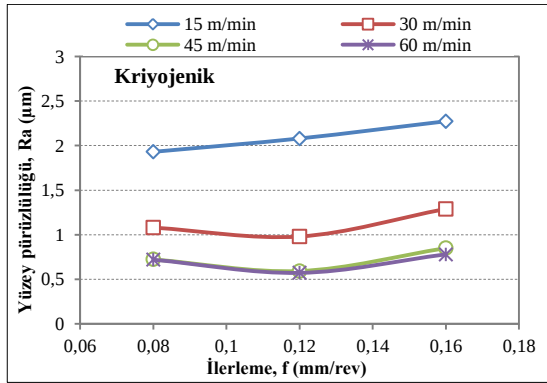
(b)



(c)



(d)



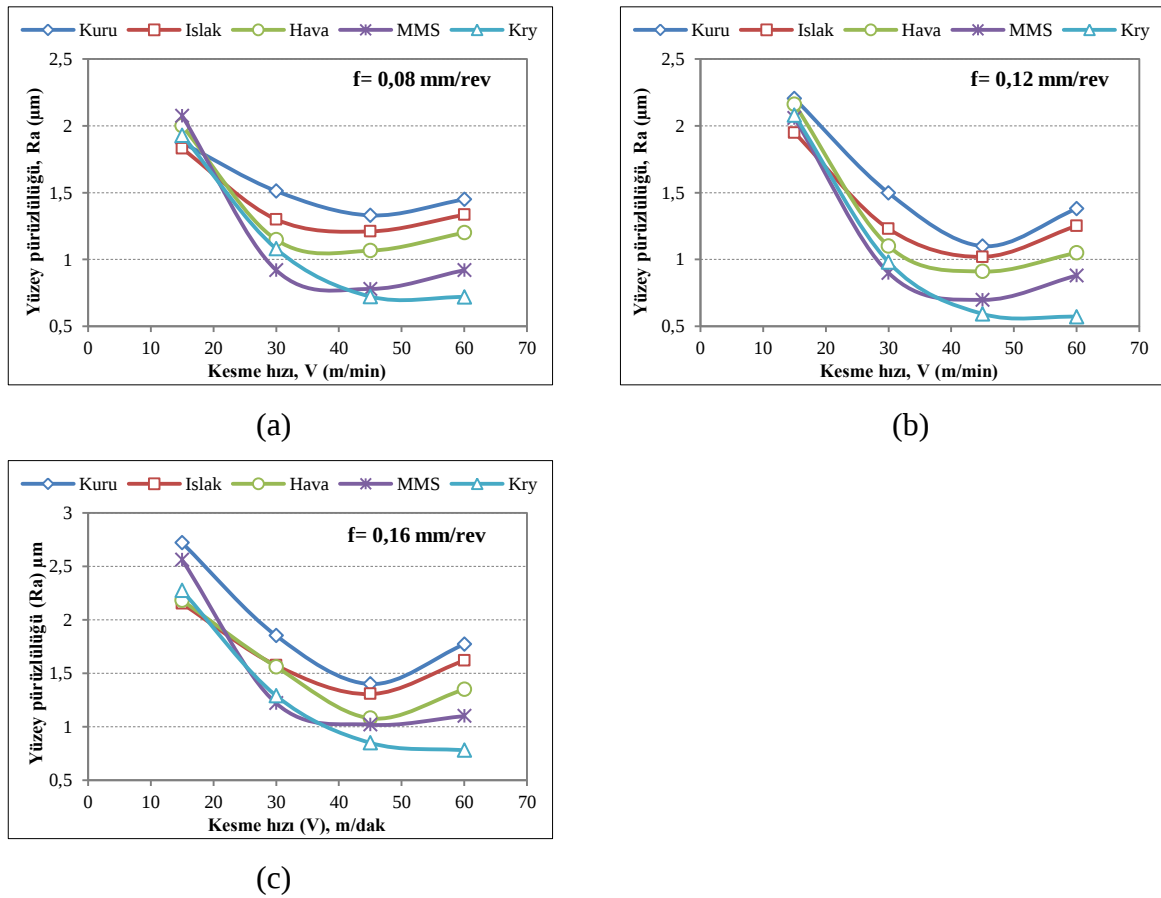
(e)

Şekil 6.6. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi
a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik

Soğutma/yağlama yönteminin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin değerlendirilmesi

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan soğutma/yağlama yöntemlerinin, iyi yüzey kalitesi ve boyut tamlığında parça imalatı için büyük önemi vardır. Soğutma sıvılarının fiziksel ve kimyasal özellikleri; imalat işlemi sırasında ortaya çıkan ısı veya mekanik sebepli hasarların azaltılmasını veya önlenmesini sağlar. Soğutma/yağlama maddeleri, doğru

kullanıldıkları takdirde, bir yandan iş parçasının boyutları ve biçiminde yüksek hassasiyet ve daha iyi yüzey kalitesi sağlarken, öte yandan takımlar için daha uzun kullanım ömrü elde edilir. Talaşlı imalatta, kesme sıvıları soğutma, yağlama ve temizleme gibi olumlu etkileri nedeniyle hala çok önemli bir yer tutmaktadırlar. Ancak bunlar doğru ve verimli bir şekilde kullanılmadığı takdirde çevre ve insanlar için bir tehlike potansiyeli doğurmakta ve imha edilmeleri, devamlı artan masraflara neden olmaktadır [61, 62]. Bu bölümde Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi esnasında kullanılan beş farklı soğuma/yağlama yönteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.7. Soğutma/yağlama performanslarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi
a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme

Şekil 6.7 incelendiğinde, en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün (Ra) kriyojenik soğutma koşullarında 60 m/min'lik kesme hızı ve 0,12 mm/rev ilerleme oranında meydana geldiği görülmüştür. Malzemenin tornalanması esnasında işlenen yüzeyde oluşan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri kuru işlemeye göre; geleneksel soğutma yöntemiyle %20,8 ile %62,5 arasında, basınçlı hava ile %19,7 ile %66,5 arasında, MMS kullanımı ile %5,8 ile %74,3 arasında ve kriyogenik soğutma yöntemi kullanılması ile %16,4 ile %79 arasında

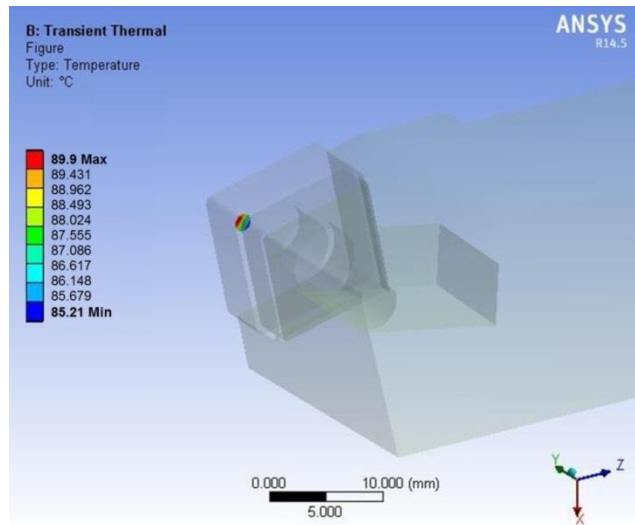
daha az oluşmuştur. Haynes 25 süper alaşımının tornalanmasında kullanılabilecek soğutma/yağlama yöntemleri içerisinde kriyojenik soğutma yönteminin diğer süper alaşımların işlenmesinde olduğu gibi yüzey pürüzlülüğü açısından en verimli yöntem olduğu bu çalışma ile belirlenmiştir [37-39, 51, 52]. Özel tasarlanmış ya da içerisine sıvı azot geçiş kanalları açılmak suretiyle üzerinde değişiklikler yapılmış kesici takımlara sıvılaştırılmış azot uygulaması yapılarak tornalama işlemlerinde, sıvı azotun birinci kayma bölgesindeki kesme sıcaklığını kontrol altına alarak kesici takım aşınmalarını azalttığı dolayısıyla yüzey kalitesinin de bundan olumlu yönde etkilendiği söylenebilir. Şekil 6.7 incelendiğinde, geleneksel soğutma, basınçlı hava ve MMS soğutma/yağlama yöntemlerine göre kriyojenik soğutma yönteminin yüzey kalitesi bakımından yüksek işleme hızlarındaki performansı daha belirgin olmuştur. Bu durum, sebebi literatürde geçen “kriyojenik soğutma yöntemi yüksek işleme hızlarında daha ekonomik ve verimlidir” ifadesi ile paralellik arz etmektedir [29, 31-33, 35]. Ayrıca, MMS soğutma/yağlama yönteminin malzemenin yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesine yönelik bir diğer alternatif yöntem olduğu tespit edilmiştir. Abrasiv aşınma ve adheziv aşınma mekanizmaları sonucunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bunların azaltılmasında MMS ile kullanılan yağlayıcı etkisinin önemli olduğu bilinmektedir [66].

6.1.4. Kesici takım yüzeyi sıcaklığının değerlendirilmesi

Talaşlı imalat işleminde kullanılan güç ($F_c \cdot V$) ekseriyetle ısıya dönüşerek talaşın, iş parçasının ve kesici takımın sıcaklığını artırır. Sıcaklık artışı, talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan ısı ve aynı zamanda bu ısının uzaklaştırılması durumuna bağlıdır [153]. Oluşan ısı sonucu sıcaklık artışı kesici takım performansını ve iş parçası kalitesini etkiler [174]. Isının takım aşınması ve takım ömrü üzerinde doğrudan bir etkisi vardır ve kesme hızının artışı sınırlandırır. Oluşan ısının çoğu kesme bölgesinden talaş, iş parçası, kesici takım ve ortam tarafından uzaklaştırılır. Bunların her biri tarafından uzaklaştırılan ısının miktarı iş parçası malzemesi, kesme parametreleri, kesici takım malzemesi, takım geometrisi ve kesme şartlarıyla değişir [153]. Bu bölümde, Haynes 25 süper alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin ve soğutma/yağlama yöntemlerinin takım-talaş ara yüzeyi sıcaklığı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Termokupul yardımıyla kesici ucun alt noktasından ölçülen sıcaklıklar üzerinden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS programının “Transient Termal Analysis” modülünden Çizelge 6.4’de verilen takım-talaş yüzeyi sıcaklıklarına ulaşılmıştır.

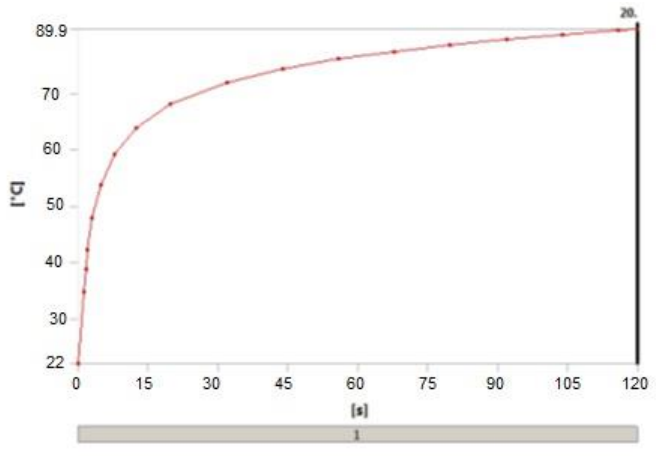
Çizelge 6.4. İşleme şartlarında ölçülen ve tahmin edilen takım sıcaklıkları

Sıra No	Kesme Hızı, Vc, (m/min)	İlerleme, f (m/rev)	Kuru işleme		Islak işleme		Basıncılı hava		MMS		Kriyojenik	
			Tm (°C)	Tc (°C)	Tm (°C)	Tc (°C)	Tm (°C)	Tc (°C)	Tm (°C)	Tc (°C)	Tm (°C)	Tc (°C)
1	15	0,08	89,9	193,5	88,8	190,7	87,9	188,5	85,5	182,4	82,7	175,3
2	15	0,12	92,2	199,3	90,91	196,1	89,9	193,5	87,2	186,7	84,5	179,8
3	15	0,16	100,1	219,3	97,12	211,7	93,3	202,1	90,1	194,0	85,1	181,4
4	30	0,08	95,12	206,7	93,5	202,6	90,2	194,3	86,2	184,2	83,7	177,8
5	30	0,12	105,5	232,9	102	224,1	99,9	218,8	96,5	210,2	90,9	196,1
6	30	0,16	110,4	245,3	106	234,2	102,9	226,4	98,5	215,2	91,9	198,5
7	45	0,08	104,4	230,2	100	219,1	96,9	211,2	92,6	200,3	89,1	191,5
8	45	0,12	113,091	252,1	109	241,8	107,5	237,9	103,2	227,1	94,5	205,1
9	45	0,16	131,2	297,8	126	284,7	122,1	274,8	118,5	265,7	104,5	230,4
10	60	0,08	110,5	245,5	105	231,6	101,2	222,1	97,7	213,2	91,3	197,1
11	60	0,12	126,6	286,2	119	267,1	115,2	257,4	110,2	244,8	99,8	218,5
12	60	0,16	145,6	334,2	137	312,5	131,5	298,6	125,5	283,4	115,6	258,4
Tm: Ölçülen sıcaklık, Tc: Hesaplanan sıcaklık												



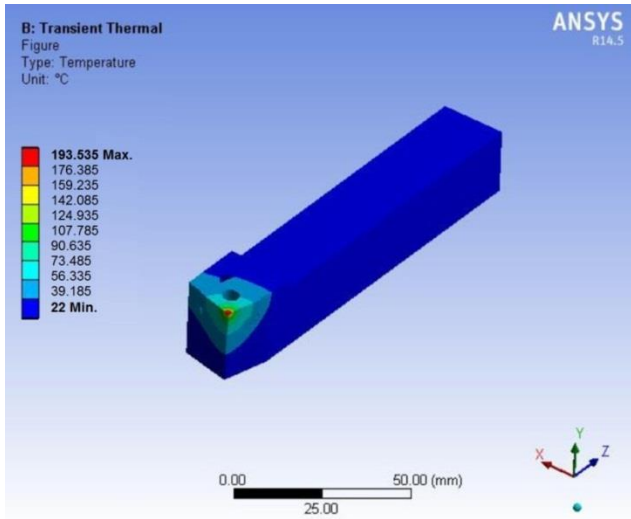
Şekil 6.8. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de ölçülen sıcaklıkların dağılımı

Termokupul yardımıyla takım-altlık ara yüzeyinden ölçülen sıcaklıkların bu bölgedeki dağılımını ve zamana bağlı değişimini gösteren ANSYS program çıktısı sırasıyla Şekil 6.8’de ve Şekil 6.9’da görülmektedir.

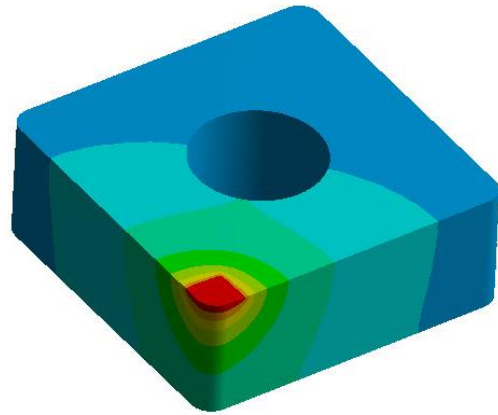


Şekil 6.9. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de oluşan sıcaklığın zamana göre dağılımı

Termokupul yardımıyla kesici ucun alt noktasından ölçülen sıcaklıklar üzerinden ısı akışı hesaplanarak takım-talaş ara yüzeyi sıcaklığı tersine ısı iletim yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen bu sıcaklıkların kesme bölgesindeki dağılımını gösteren ANSYS program çıktısı Şekil 6.10’da görülmektedir.



(a)

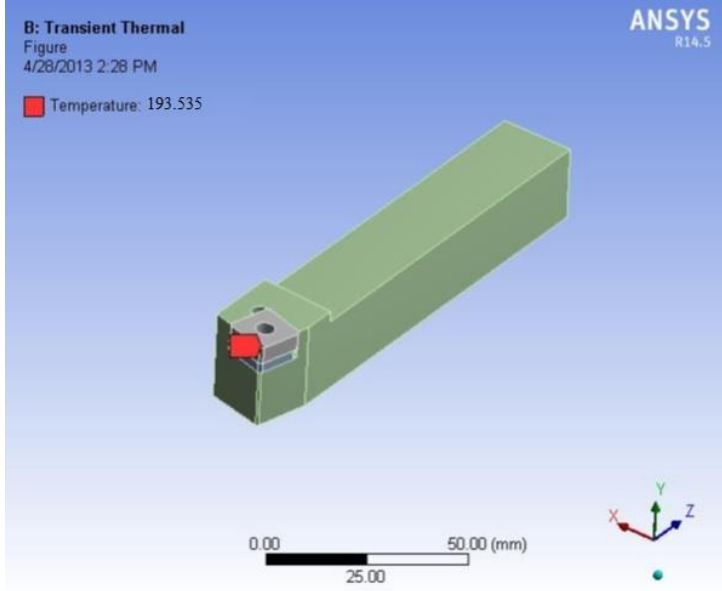


(b)

Şekil 6.10. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de tahmin edilen sıcaklığın kesici uç üzerindeki dağılımı a) Takımın genel görünümü b) Kesici ucun görünümü

Kesici uç üzerindeki belirli bir kesme süresindeki sıcaklığı elde etmek için ANSYS ile yapılan örnek bir analiz sonucu Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de görülmektedir. Burada kuru işleme altında 15 m/min’lik kesme hızı ve 0,08 ilerleme oranında takım-altlık ara

yüzeyinden ölçülen sıcaklığın kesici ucun talaş ile temas ettiği üst kesme bölgesinde olduğu tahmin edilen maksimum sıcaklık değeri görülmektedir. Kullanılan bütün soğutma/yağlama şartlarında ve kesme parametrelerinde analizler bu şekilde tekrar edilerek her deney şartı için sıcaklıklar Çizelge 6.4’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

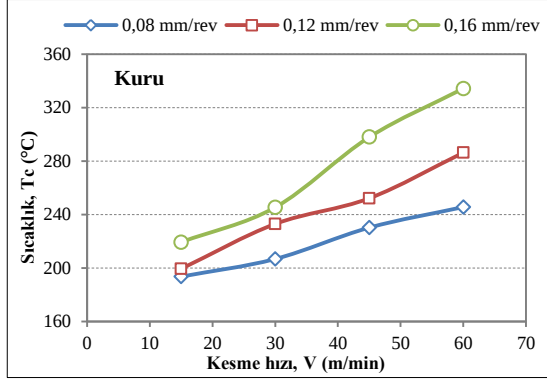


Şekil 6.11. Kuru işleme altında 15 m/min kesme hızı ve 0,08 mm/rev’de tahmin edilen maksimum sıcaklık

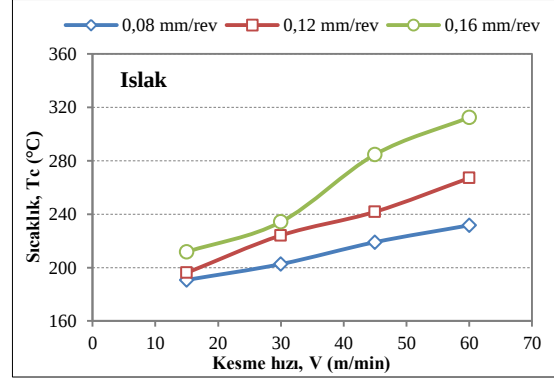
Tornalama işleminin en önemli performans karakteristikleri; kesici takım aşınması ve iş parçası yüzey pürüzlüğüdür. Talaş kaldırma işleminde performans karakteristiklerine, takım ve iş parçası arasında meydana gelen ısı, kesme hızı, ilerleme hızı, soğutma yöntemi, talaş derinliği gibi birçok faktör etki etmektedir. Bu faktörlerin performans karakteristikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve uygun kesme koşullarının tespiti imalat açısından önemlidir. Talaşlı işlemede, takım ve iş parçası ara yüzeyinde oluşan kesme sıcaklığı, takım aşınması, yüzey kalitesi ve talaş oluşum mekanizmasını kontrol eden önemli bir faktördür [137]. Kesme işlemi devam ettikçe takım ucu ısınmakta ve belirli bir sıcaklık değerinden sonra plastik deformasyona uğramaktadır. Bunun sonucunda takım ucunda bazı kopma ve kırılmalar meydana gelmektedir.

Her bir soğutma/yağlama şartında takım-talaş yüzeyinde hesaplanan sıcaklık değerlerinin kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak değişimlerini gösteren grafikler Şekil 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.12 incelendiğinde, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan sıcaklık analizi

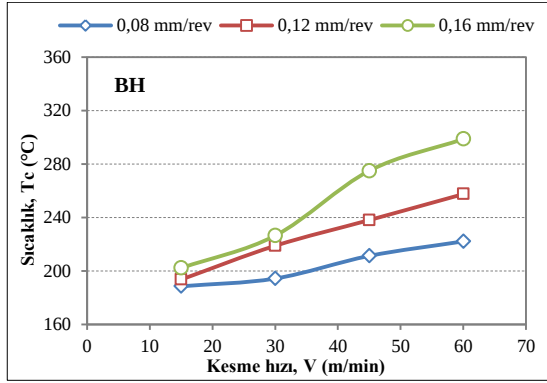
sonucunda kesici takım talaş yüzeyi sıcaklığının değişen kesme hızı, ilerleme ve soğutma-yağlama şartına bağlı olarak 175,3 °C ile 334,2 °C arasında değiştiği görülmüştür.



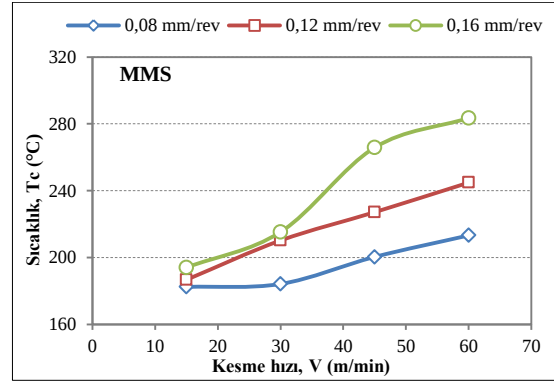
(a)



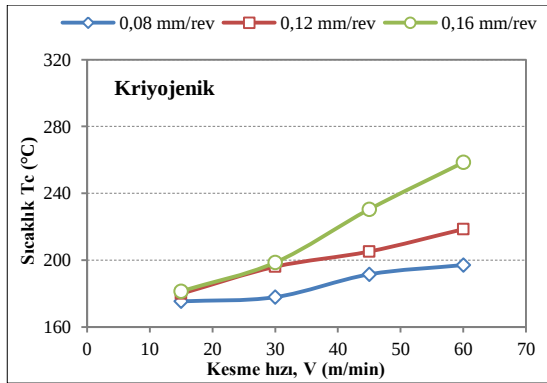
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 6.12. Kesme hızı ve ilerlemenin sıcaklık üzerindeki etkisi

a) Kuru b) Islak c) BH d) MMS e) Kriyojenik

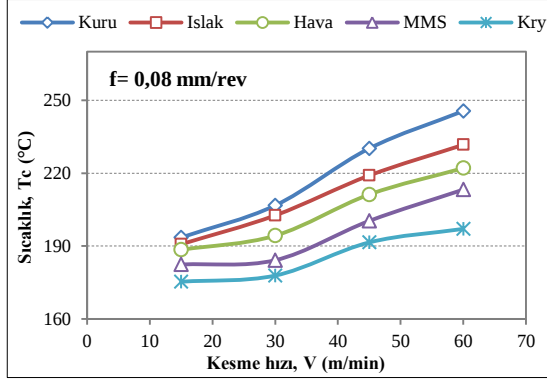
Grafikler incelendiğinde takım-talaş yüzeyi sıcaklığının kesme hızı ile değişimi farklı ilerleme oranı değerlerinde görülmektedir. Kesme hızının artırılması ile takım-talaş yüzeyi sıcaklığının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla

malzemenin mikro yapısında bulunan sert partiküllerin (özellikle kobalt, nikel, krom ve silisyum) takım ucunda meydana getirdiği sürtünme kuvvetini artırmasından dolayı sıcaklık da artmıştır. Kesme hızı arttırıldığında kesici takımın yüzeyden talaş kaldırmak için gereken enerji miktarı artmakta ve takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklığı da arttırmaktadır [188]. İlerleme hızının arttırılmasıyla takım-talaş ara yüzey sıcaklığı artmaktadır (Şekil 6.12). İlerleme hızının artmasıyla kesici takım ucuna talaş sıvanarak ucun şeklini bozmakta ve kesici uç sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca takım ucuna sıvanan talaş parçaları ısı depolayarak takım sıcaklığını yükseltmektedir. İlerleme hızının artması kesici takımın ucundaki radyal kuvvetleri arttırmakta, dolayısıyla talaş kaldırma enerjisi de artmaktadır. Bu ise takım-talaş ve iş parçası ara yüzeyinde sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır [186]. Takım-talaş yüzeyi sıcaklığının kesme hızı ve ilerleme oranına bağlı olarak artması literatür ile paralellik arz etmektedir [166, 174, 189].

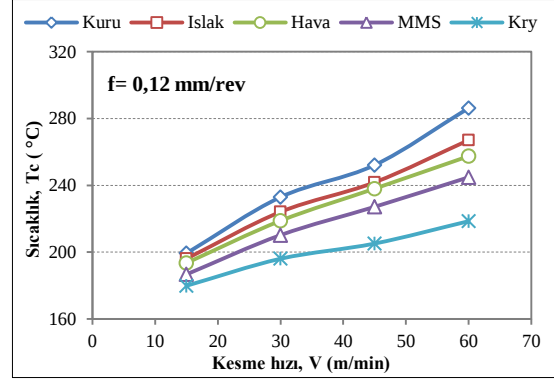
Soğutma/yağlama yöntemlerinin sıcaklık üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Kesme sırasında meydana gelen plastik deformasyon sonucu açığa çıkan enerji ısı enerjisine dönüşmektedir [24]. Tornalama sırasında kesici kenar bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar takım ömrü ve takım-talaş yüzeyindeki sürtünme üzerinde etkili olmaktadır [25]. Kesme bölgesinde oluşan büyük miktardaki ısı, kesici takımın termal iletkenliğine bağlı olarak kesici takıma taşınmaktadır. Kullanılan takımın yapısal özellikleri ve soğutma metodunun türü, bu iletkenliği azaltabilmekte dolayısıyla takıma geçen ısıyı da azaltmaktadır [26]. Süper alaşımların tornalanmasında soğutma işlemi gereklidir. Çünkü modern malzemelerin daha etkili ve ekonomik bir biçimde işlenmesi için ısı oluşumunun en aza indirilmesi gerekir [52]. Yapılan deneysel çalışmalarda, kesme bölgesindeki sıcaklığın az da olsa düşürülmesi, takım ömrünün arttırılmasına büyük katkılar sağlamıştır. Bu bölümde soğutma/yağlama yöntemlerinin kesici takım sıcaklığını düşürmedeki etkinliği araştırılmıştır. Kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak her bir soğutma/yağlama şartında takım-talaş ara yüzeyinde hesaplanan sıcaklık değerlerinin değişimlerini gösteren grafikler Şekil 6.13’de verilmiştir. Şekil 6.13 incelendiğinde, en düşük kesici takım yüzeyi sıcaklığı kriyojenik soğutma koşullarında 15 m/min’lik kesme hızı ve 0,08 mm/rev ilerleme oranında 175,3 °C olarak hesaplanmıştır. Malzemenin tornalanması esnasında kesici takım-talaş yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri kuru işlemeye göre; geleneksel soğutma yöntemiyle ortalama %6,7 basınçlı hava ile soğutma yöntemiyle ortalama %10,7,

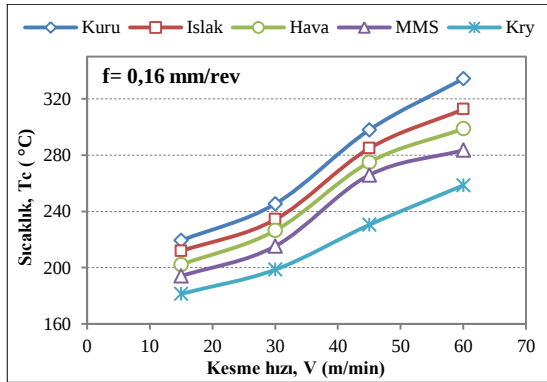
MMS yöntemi ile ortalama %15,2 ve kriyogenik soğutma yöntemi kullanılması ile %23,7 daha az oluşmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.13. Soğutma/yağlama performanslarının kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkisi
a) 0,08 mm/rev ilerleme b) 0,12 mm/rev ilerleme c) 0,16 mm/rev ilerleme

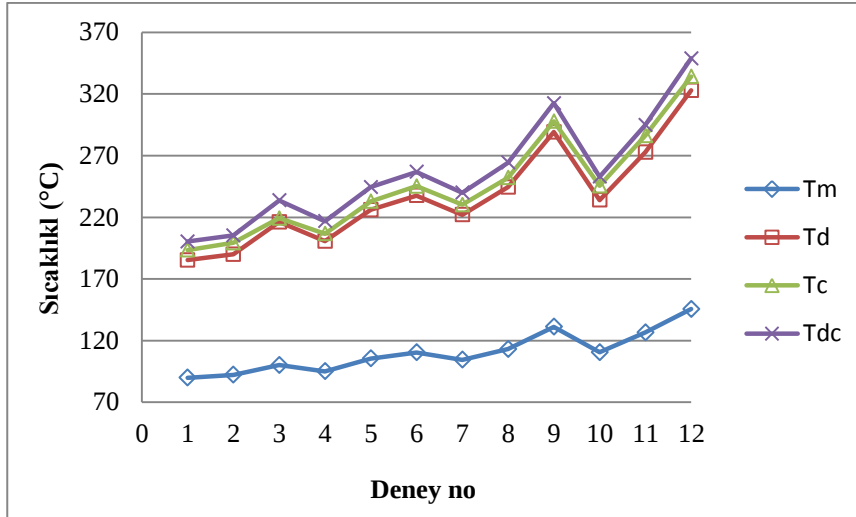
Haynes 25 süper alaşımının tornalanmasında kullanılabilecek soğutma/yağlama yöntemleri içerisinde kriyogenik soğutma yönteminin diğer süper alaşımların işlenmesinde olduğu gibi kesici takım sıcaklığı açısından da en verimli yöntem olduğu bu çalışma ile belirlenmiştir [37-39, 51, 52]. Literatürde özel tasarlanmış ya da içerisine sıvı azot geçiş kanalları açılmak suretiyle üzerinde değişiklikler yapılmış kesici takımlara sıvılaştırılmış azot uygulaması yapılarak tornalama işlemlerinde, sıvı azotun birinci kayma bölgesindeki kesme sıcaklığını kontrol altına alarak adheziv, difüzyon ve krater aşınmalarını azaltmış, takım ömründe ve yüzey kalitesinde gözle görülebilir artış rapor edilmiştir [39, 52, 179].

6.1.5. Sıcaklık doğrulama deneyleri sonuçları

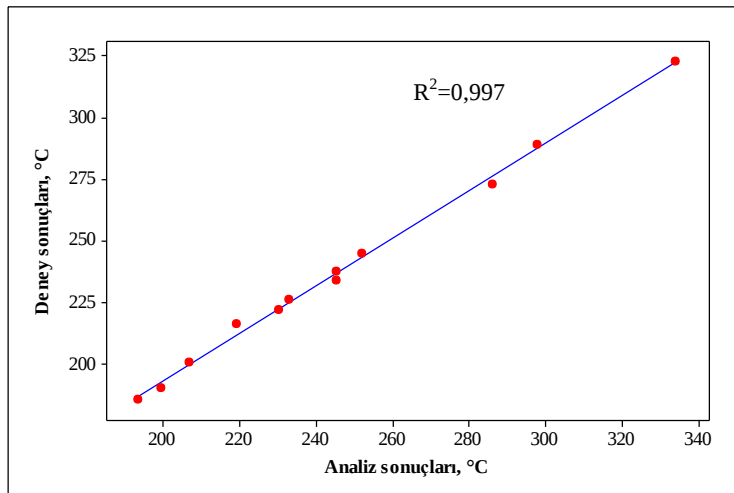
Termokupul ile kesici ucun alt noktasından ölçülen sıcaklıklar kullanılarak ANSYS programı yardımıyla kesicinin üst noktasında oluşan sıcaklıklar tahmin edilmiştir. Modelleme ile tahmin edilen bu sıcaklıkların güvenilirliğini ortaya koymak için kesici uç, kesme bölgesinin en yakın noktasına kadar (uç üzerinden 0,4 mm mesafede) tel erozyonla delinerek sıcaklıklar bu bölgede yeniden ölçülmüştür. Ölçülen bu sıcaklıklar kullanılarak yeniden ANSYS programıyla modelleme yapılarak kesici takım yüzeyi sıcaklıkları hesaplanmıştır. Doğrulama deneyleri için kuru kesme koşulları altında 12 adet deney yapılmıştır. Deney sonuçları ve modelleme neticesinde elde edilen kesme yüzeyi sıcaklıkları ve Çizelge 6.5’de verilmiştir. Çizelge 6.5’de verilen deneysel ve tahmin edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.14’de gösterilmiştir. Şekil 6.14 deney sonuçları ile modelleme sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğunu göstermiştir. Kesici ucun alt noktasından ölçülen sıcaklıklar referans alınarak yapılan modelleme sonuçları ile kesici uca delinen delik içerisinden ölçülen sıcaklıklar referans alınarak yapılan modelleme sonuçları arasındaki hata payı ortalama %4,34 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 6.15 deney sonuçları ile analiz sonuçları arasındaki korelasyonun 0,997 olduğunu göstermiştir. Bu durum deney sonuçları ile analiz sonuçları arasında belirgin bir hata olmadığını kanıtlamıştır.

Çizelge 6.5. Doğrulama deney sonuçları

Sıra no	Kesme hızı, V (m/min)	İlerleme, f (mm/rev)	Ölçülen sıcaklıklar		Modelleme	
			Ucun alt noktası, (Tm)	Ucun delinmiş noktası, (Td)	Ucun alt noktası, (Tc)	Ucun delinmiş noktası, (Tdc)
1	15	0,08	89,9	185,3	193,5	200,34
2	15	0,12	92,2	189,9	199,3	205,31
3	15	0,16	100,1	216,2	219,3	233,72
4	30	0,08	95,12	200,6	206,7	216,87
5	30	0,12	105,5	226,1	232,9	244,41
6	30	0,16	110,4	237,6	245,3	256,83
7	45	0,08	104,4	222,0	230,2	239,98
8	45	0,12	113,1	244,5	252,1	264,28
9	45	0,16	131,2	289,1	297,8	312,45
10	60	0,08	110,5	234,0	245,5	252,94
11	60	0,12	126,6	272,8	286,2	294,84
12	60	0,16	145,6	322,8	334,2	348,84



Şekil 6.14. Deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.15. Deney sonuçları ile analiz sonuçları arasındaki ilişki

6.1.6. MMS parametrelerinin işlenebilirliğe etkisinin değerlendirilmesi

Malzemenin işlenebilirliği deneylerinde soğutma/yağlama performanslarının karşılaştırıldığı deneylerde MMS yönteminde 100 ml/h debide ticari mineral esaslı yağ kullanılmıştır. Bilindiği üzere MMS yönteminde sonuçları etkileyen yağ cinsi, yağ debisi, nozul ölçüleri ve nozul pozisyonu gibi birçok parametre mevcuttur [69, 90, 93]. Bu bölümde süper alaşımın işlenmesi esnasında MMS yönteminde kullanılan yağ cinsi, yağ debisi ve kesme hızının; takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Taguchi deney tasarım tekniği (L₉ orthogonal dizi) kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6'da görülmektedir. Minitab

16.0 programında Taguchi analiz tekniği kullanılarak Çizelge 6.6’da verilen deney giriş parametrelerinin deney sonuçlarına etkisi ortalama etki grafikleri ile değerlendirilmiştir.

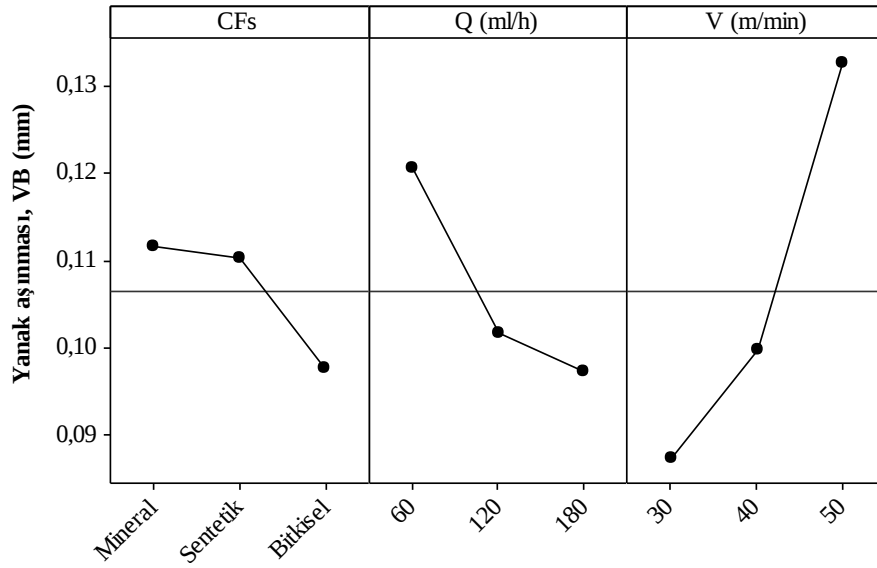
Çizelge 6.6. MMS performans deneylerinin sonuçları

Yağ cinsi, CF _s	Debi Q (ml/h)	Kesme hızı, V (m/min)	Aşınma		Yüzey pürüzlülüğü (μ m)	Sıcaklık, T (°C)	
			VB (mm)	VB _{max} (mm)		Ölçülen T _m (°C)	Hesaplanan T _c (°C)
Madeni	60	30	0,104	0,127	1,76	80,01	168,5
Madeni	120	40	0,115	0,137	1,14	83,30	176,8
Madeni	180	50	0,128	0,148	0,90	90,20	194,2
Sentetik	60	40	0,118	0,135	1,35	86,90	185,9
Sentetik	120	50	0,130	0,145	0,95	93,30	202,1
Sentetik	180	30	0,092	0,114	1,40	72,50	149,5
Bitkisel	60	50	0,155	0,185	0,91	95,20	206,9
Bitkisel	120	30	0,068	0,086	1,47	60,20	118,5
Bitkisel	180	40	0,076	0,100	1,20	69,90	143

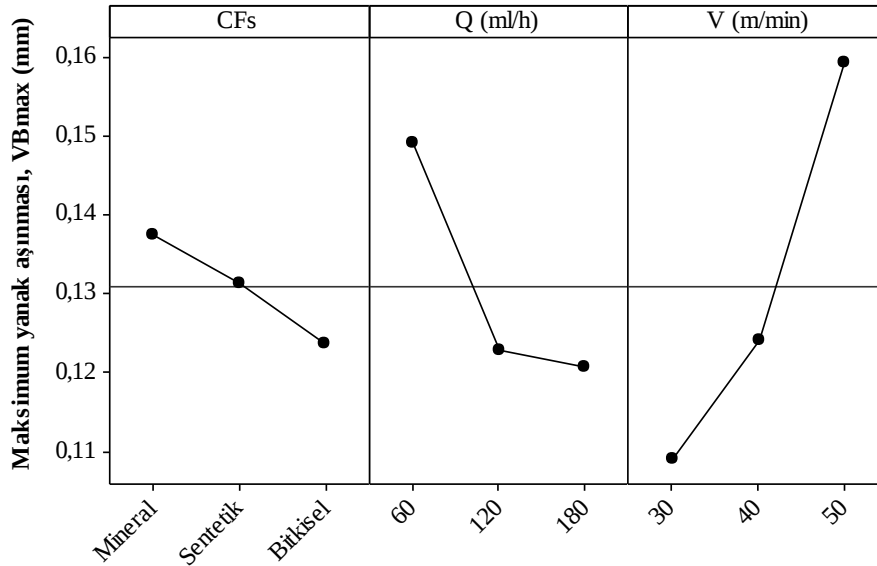
MMS parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkisi

Minimum miktarda yağ kullanılarak Haynes 25 süper alaşımının işlenmesinde giriş parametreleri olarak seçilen yağ cinsi, yağ akış debisi ve kesme hızının aşınmalar üzerindeki etkisi Şekil 6.16’da görülmektedir. MMS parametrelerinin performans deneylerinde kullanılan bitkisel esaslı kesme yağının mineral ve sentetik esaslı kesme yağlarına göre ortalama aşınma miktarlarını düşürdüğü ve daha iyi takım ömrü performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Bitkisel esaslı kesme yağlarının moleküler olarak uzun, ağır ve iki kutuplu olması metal yüzeylere karşı kimyasal olarak afinitesini arttırmaktadır. Bitkisel esaslı kesme sıvıları belirtilen kimyasal yapılarından ve yüksek viskozitesinden dolayı kesme bölgesinde ince, güçlü ve uzun ömürlü yağlama tabakası oluştururlar. Bu sayede kesme bölgesindeki basıncı absorbe ederek kesme kuvvetlerini ve takım-iş parçası arasındaki sürtünmeyi düşürür ve takım aşınmalarını azaltırlar [190]. Performans deneylerinde kullanılan debi miktarlarının takım aşınması üzerindeki etkisi incelendiğinde kullanılan yağın miktarı arttıkça aşınma değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Bu durum yağ miktarının artmasıyla kesme bölgesine etki eden yağ miktarının da artmasından dolayı kesme esnasında takım-iş parçası arasında oluşan sürtünmenin olumlu yönde azalmasının takım ömrünü arttırdığı belirlenmiştir [90, 97]. Şekil 6.16 incelendiğinde artan kesme hızına paralel olarak her üç aşınma mekanizması için aşınma değerlerini de belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak işleme sırasında oluşan yüksek ısı,

iş parçasının yüksek dayanımı ve aşındırıcı talaşların olduğu düşünülmektedir [157, 168, 169]. Bu malzemelerde bulunan bazı elementler (Co, Ni, Cr) işlemeye karşı yüksek dayanım ve korozyon direnci oluşturmaktadır. Tipik olarak daha yüksek kobalt ve nikel içeriğinde işlemek daha zordur. Çünkü nikel ya da kobalt içeriği ya da titanyum bileşenleri parçaya sıcak sertlik eğilimi sağlamaktadır. Kobalt esaslı süper alaşımların mikro yapısının içinde hali hazırda bulunan sert aşındırıcı karbürler (örneğin; MC, $M_{23}C_6$) takım aşınmasının oluşmasını sağlarlar [144].



(a)

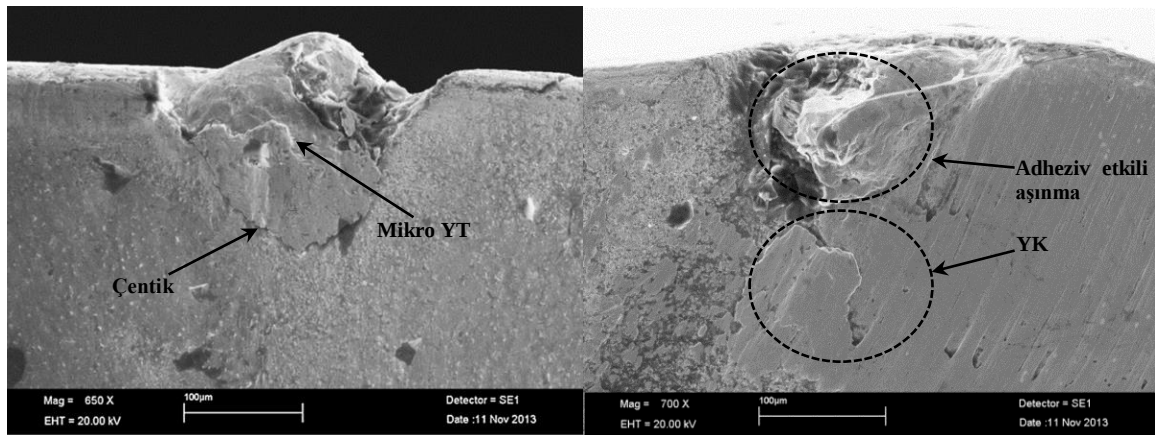


(b)

Şekil 6.16. MMS giriş parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkisi
a) Yanak aşınması (VB) b) Maksimum yanak aşınması (VB_{max})

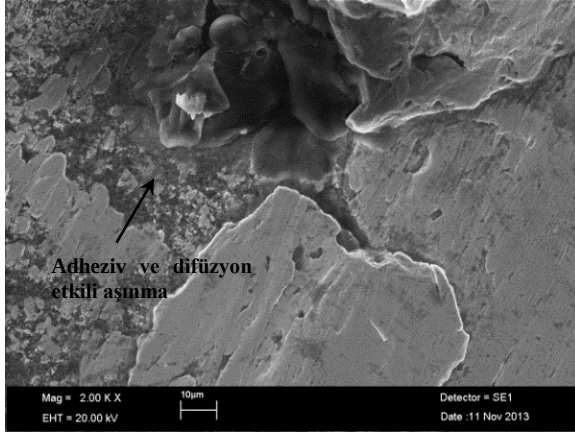
MMS performans deneylerinde aşınma mekanizmalarının SEM analizi

MMS parametrelerinin performans deneylerinde malzemenin kaplamasız karbür kesici takımlarla işlenmesi esnasında kesici uçlarda oluşan aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için SEM fotoğrafları sunulmuştur. SEM fotoğraflarında MMS yöntemi ile farklı kimyasallara sahip kesme yağları kullanılarak malzemenin farklı kesme parametrelerinde işlenmesi esnasında kesici takım yüzeyinde meydana gelen aşınma mekanizmaları verilmiştir. Her üç SEM fotoğrafında da çentik aşınması meydana geldiği görülmektedir. Resim 6.14'de 180 ml/h debi ile mineral esaslı kesme yağı kullanılarak $V=50$ m/min, $f=0,15$ mm/rev kesme parametrelerinde kullanılan kesici uç üzerinde çentik aşınması ile aşınan bölgede adheziv aşınma mekanizması etkisiyle talaş yapışması meydana geldiği ve mikro seviyede YT oluştuğu görülmektedir. Kesici kenar üzerine yapışan bu talaş parçalarının büyüklüğü ve biçimi kesici kenarın sağlıklı kesme yapabilmesini engellemektedir. Yapışan malzemenin neden olduğu kesici kenar geometrisinin değişmesi birinci ve ikinci deformasyon bölgelerindeki kayma ve talaş akışı üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Bu yapışma, kesme süreci boyunca derece derece takımın kesme kabiliyetinin bozulmasına yol açmaktadır [148]. Çentik bölgesine yapışan iş parçası malzemesinin kesme sürecinin devam etmesi durumunda belli bir pekleşme noktasına ulaşmasıyla bu bölgeden takım malzemesiyle birlikte uzaklaşacağı ve kesici uca daha büyük tahribatlar vereceği tahmin edilmektedir. Nitekim diğer SEM fotoğraflarında da meydana gelen çentik aşınmasının sebebinin malzeme yapışması ve devamında malzemenin takım malzemesi ile birlikte ayrılması olduğu düşünülmektedir.



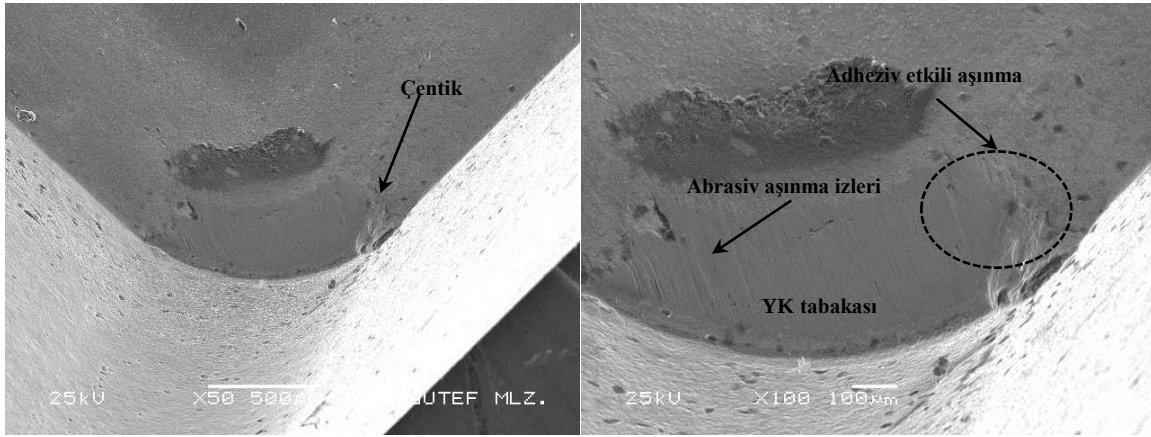
(a)

(b)



(c)

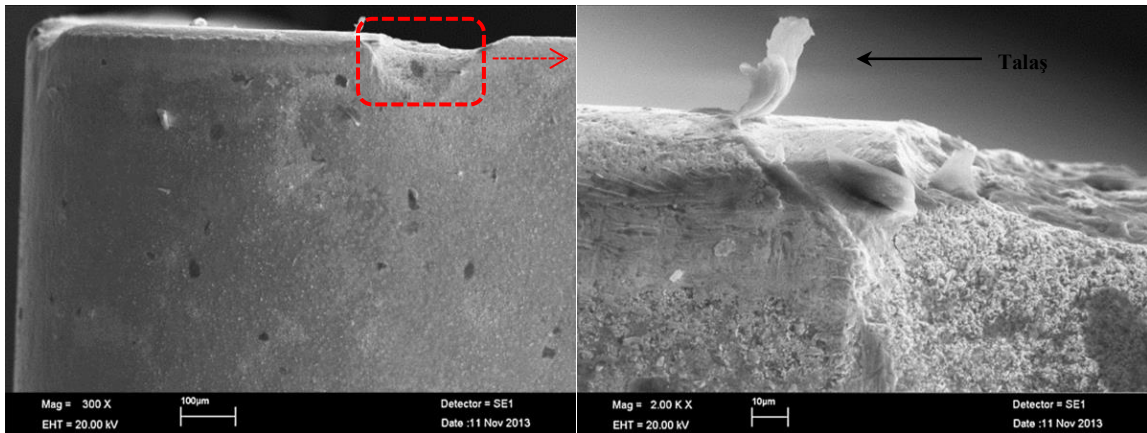
Resim 6.14. MMS altında, mineral esaslı kesme yağ ile $Q=180$ ml/h debi ve $V=50$ m/min işleme parametrelerinde oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzey aşınması (X700) c) Talaş yüzeyi aşınması (X2000)



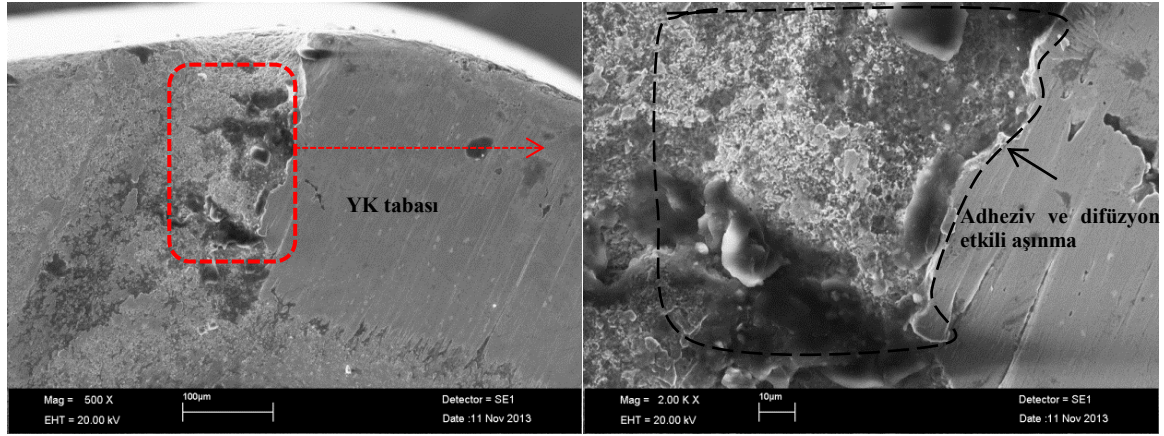
(a)

(b)

Resim 6.15. MMS altında, sentetik esaslı yağ ile $Q=120$ ml/h debi ve $V=50$ m/min işleme parametrelerinde oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması b) Talaş yüzeyi aşınması



(a)



(b)

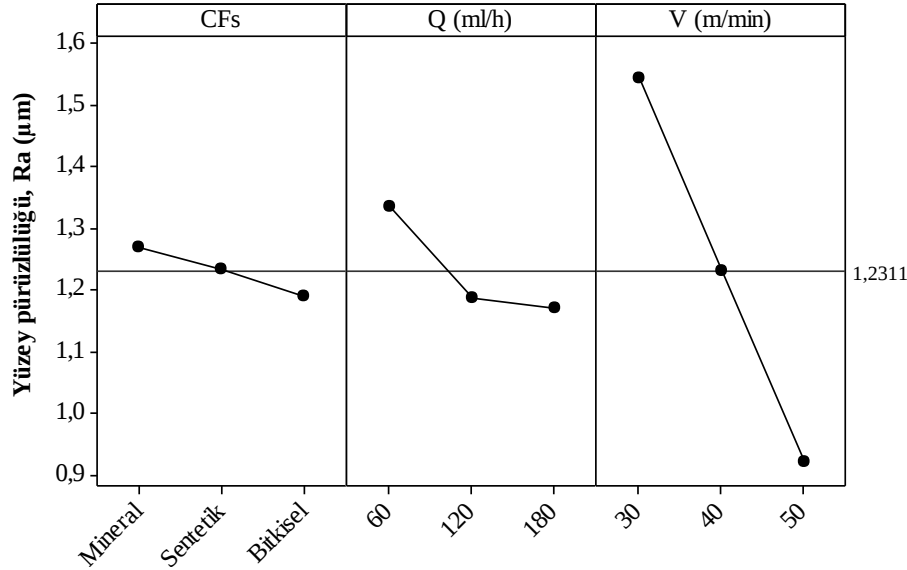
Resim 6.16. MMS altında, bitkisel esaslı yağ ile $Q=180$ ml/h debi ve $V=40$ m/min işleme parametrelerinde oluşan aşınma mekanizmaları a) Yan yüzey aşınması
b) Talaş yüzeyi aşınması

Bütün SEM fotoğraflarında görüldüğü gibi takım-talaş yüzeyinde malzeme sıvanması olduğu ve bu nedenle YK tabakaları meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapışan malzeme katmanları üzerinde kesme sırasında oluşan abrasiv aşınma izleri açıkça görülmektedir. Ancak bu izlerin henüz takım malzemesi üzerine etki etmediği belirgindir. Yapışan malzeme, hem altında oluşan difüzyon hem de mekanik ve/veya termal yorulmanın etkisi ile bir süre sonra küçük parçalar halinde takımdan uzaklaşmaktadır. SEM fotoğraflarında görüldüğü gibi takım-talaş yüzeylerinde adheziv etki ile yapışan malzemenin difüzyonla birlikte takım üzerinde gerçekleştirdiği derin tahribat da görülmektedir. Tekrar tekrar yapışma ve kopma (bu arada difüzyon devam etmekte) sürekli olarak takımı aşındırmaktadır. Kopma sonrası açıkta kalan bölgeye, kesme devam ettiği için, adheziv etkiyle birlikte daha fazla yapışma olmaktadır. Her defasında yapışmanın arttığı düşünülürse kopmayla birlikte takımdan ayrılan parçaların miktarı da artacaktır. Yapışan tabakaların katman katman kalktığı görülebilmektedir.

MMS parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi

Minimum miktarda kesme yağı kullanılarak Haynes 25 süper alaşımının işlenmesinde giriş parametreleri olarak seçilen yağ cinsi, yağ akış debisi ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi Şekil 6.17’de görülmektedir. Şekil 6.17 incelendiğinde, ortalama yüzey pürüzlülük değerinin $1,2311 \mu\text{m}$ olduğu görülmektedir. MMS parametrelerinin performans deneylerinde kullanılan bitkisel esaslı kesme yağının mineral ve sentetik esaslı kesme

yağlarına göre ortalama yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü ve daha iyi yüzey kalitesi performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum bitkisel esaslı kesme yağının yüksek viskozitesi ile açıklanabilir. Yüksek viskozite değerleri yüksek imalat sıcaklıklarında istikrarlı bir yağlayıcılık sağlamaktadır [190, 191].



Şekil 6.17. MMS giriş parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi

Performans deneylerinde kullanılan debi miktarlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde kullanılan yağın miktarı arttıkça pürüzlülük değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Bu durum; yağ miktarının artmasıyla kesme bölgesine etki eden yağ miktarının da artmasından dolayı kesme esnasında takım-iş parçası arasında oluşan sürtünmenin azalması, dolayısıyla takım aşınması azalmasına da bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün de azalması ile ilişkilendirilmiştir. Debi miktarının artışının yüzey pürüzlülüğüne olumlu etkisi literatürde yapılan çalışmalarla paralellik göstermiştir [90, 97]. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak, yüzey kalitesindeki iyileşme, beklenen bir özellik olup yüzey kalitesini iyileştirmek için kesme hızının artırılması literatürdeki en yaygın yöntemdir [183]. Kesme hızının artmasına paralel olarak kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasıyla beraber 1. deformasyon bölgesinde plastik deformasyon kolaylaşırken aynı şekilde 2. deformasyon bölgesinde talaş akışı ve talaşın biçimlenmesi kolaylaşmaktadır. Ayrıca kesme hızının artışı yığıntı talaş oluşumunu ve yığıntı katmanlarını azaltarak takım aşınmasını olumlu yönde etkilemekte ve bu durum, beklenen şekilde yüzey kalitesini iyileştirerek yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olmaktadır.

6.2. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizlerle Yorumlanması

Varyans analizi (Analysis of Variance: ANOVA) ile hangi işlem üzerinde hangi faktörlerin ne derecede etkili oldukları istatistiksel olarak ortaya konulmuştur. Yapılan deneylerde takım aşınması, takım yüzeyi sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının, girdi parametresi olarak kullanılan kesme hızı, ilerleme ve soğutma/yağlama yöntemleri gibi kontrol faktörlerine göre değiştiği kabul edilmiş ve bu kabule dayalı olarak varyans analizi ve çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Varyans analizi yöntemi; aslında deney sonuçlarında ortaya çıkan toplam değişimin, değişime sebep olduğu varsayılan faktörlere göre ayrıştırılarak toplam varyansın içindeki paylarının belirlenmesini esas alan bir yöntemdir. F-testi olarak da bilinen varyans analizi faktörler veya seviyelerinin birbirinden farksız olduğunu kabul eden belirli bir hipotezin kontrolünde kullanılır. Burada hesaplanan test istatistiği değerinin tablo değerinden küçük olması durumunda faktör veya seviyelerinin etkilerinin önemsiz olduğuna, büyük olması durumunda ise, faktör veya seviyelerinin etkilerinin önemli olduğuna karar verilir. Bu hüküm analiz için belirlenen önem düzeyine göre verilir [192]. Yüzde katkı oranı her bir faktör ve/veya etkileşimin deney sonuçlarının toplam varyasyonuna ne oranda katkı sağladığını temsil etmektedir. Katkı oranı hatalara bağlı olarak deneylerin doğruluğunun yüzdelik olarak belirlenmesini sağlar [193]. Çizelge 6.7’de verilen deney sonuçlarının istatistiksel analizinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri verilmiştir.

Çizelge 6.7. Kontrol faktörleri ve seviyeleri

Faktör	Sembol	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
Soğutma	SY	-	Kuru (0)	Islak (1)	BH (2)	MMS (3)	Kriyojenik (4)
Kesme hızı	V	m/min	15	30	45	60	-
İlerleme	f	mm/rev	0,08	0,12	0,16	-	-

Regresyon analizi bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Bir tek bağımsız değişkenin kullanıldığı regresyon tek değişkenli regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişkenin kullanıldığı regresyon analizi de çok değişkenli regresyon analizi olarak adlandırılmaktadır [194]. Bağımlı değişken (Y) ile bir bağımsız değişken (X_1) arasındaki bağıntıyı inceleyen yönteme basit regresyon, bir bağımlı değişken (Y) ile iki ya da daha fazla bağımsız değişken ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$) arasındaki bağıntıları modeller aracılığı ile inceleyen

yönteme ise çoklu regresyon adı verilmektedir [195]. Üç farklı çoklu regresyon analizi vardır. Bunlar; birinci dereceden lineer regresyon, ikinci dereceden regresyon ve logaritmik regresyon modelidir. Bu çalışmada, farklı deney parametrelerinde tahminsel sonuçlar elde etmek için genel yapısı Eş. 6.1’de verilen ikinci dereceden çoklu regresyon analiziyle matematiksel modeller elde edilmiştir.

$$T = k_0 + k_1x + k_2y + k_3z + k_4x^2 + k_5y^2 + k_6z^2 + k_7xy + k_8xz + k_9yz \quad (6.1)$$

6.2.1. Kesici takım aşınmasının analizi

Bu bölümde Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi esnasında kullanılan tüm soğutma/yağlama yöntemleri ve kesme parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkisi varyans analiziyle birlikte genel olarak değerlendirilmiştir. Önceki bölümlerde en düşük kesme hızında (15 m/min) yapılan deneylerde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının beklenen sonuçların aksine oldukça yüksek olduğundan bahsedilmiştir. Bu durum varyans analizi sonuçlarına çok fazla etki edeceğinden dolayı hem 15 m/min’lik kesme hızının dikkate alındığı hem de bu seviyenin ihmal edildiği 2 farklı analiz yapılmış ve analiz sonuçları Çizelge 6.8’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.8. Yanak aşınması sonuçları için ANOVA tablosu

Faktör	Serbestlik derecesi, SD	Kareler Toplamı, KT	Kareler Ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% Katkı
<i>V=15 m/min dikkate alındığında (R²=%97,3)</i>						
SY	4	0,07533	0,01883	22,70	0,000	5
V	3	1,37623	0,45884	553,08	0,000	89,7
f	2	0,04028	0,02014	24,28	0,000	2,6
Hata	50	0,04148	0,00083			2,7
Toplam	59	1,53362				100
<i>V=15 m/min dikkate alınmadığında (R²=%91,3)</i>						
SY	4	0,085335	0,021334	61,97	0,000	59,8
V	2	0,030240	0,015120	43,92	0,000	21,2
f	2	0,014746	0,007373	21,42	0,000	10,3
Hata	36	0,012393	0,000344			8,7
Toplam	44	0,142714				100

15 m/min’lik kesme hızı analize dâhil edilerek yapılan varyans analizi sonuçlarına göre farklı soğutma/yağlama şartları ve kesme parametrelerinde Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi esnasında kesici takımda oluşan yanak aşınması üzerindeki en etkili

parametrenin %89,7 ile kesme hızı olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızından sonra yanak aşınması üzerindeki diğer etkili parametreler ise %5 ile soğutma/yağlama yöntemi ve %2,6 ile ilerleme olduğu belirlenmiştir. Analizlerde kesme hızının ilk seviyesi ihmal edildiğinde ise; yanak aşınması üzerindeki en etkili parametreler sırasıyla %59,8 ile soğutma/yağlama yöntemi, %21,2 ile kesme hızı, %10,3 ile ilerleme olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.9. Maksimum yanak aşınması sonuçları için ANOVA tablosu

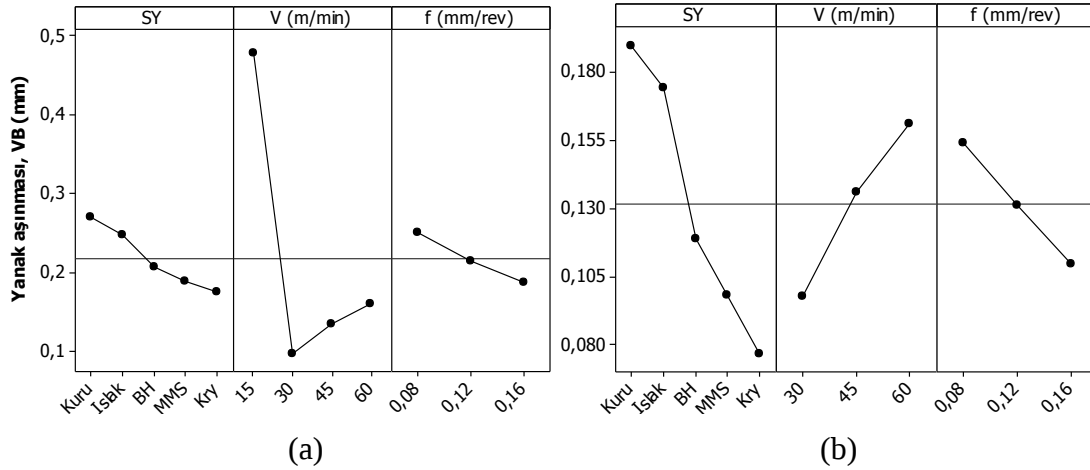
Faktör	Serbestlik derecesi, SD	Kareler Toplamı, KT	Kareler Ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% Katkı
<i>V=15 m/min dikkate alındığında (R^2=%93,9)</i>						
SY	4	0,13563	0,03391	13,19	0,000	6,5
V	3	1,78085	0,59362	230,93	0,000	84,1
f	2	0,07084	0,03542	13,78	0,000	3,3
Hata	50	0,12853	0,00257			6,1
Toplam	59	2,11585				
<i>V=15 m/min dikkate alınmadığında (R^2=%93,1)</i>						
SY	4	0,18084	0,04521	27,26	0,000	21
V	2	0,52551	0,26276	158,43	0,000	61,1
f	2	0,09445	0,04723	28,48	0,000	11
Hata	36	0,05971	0,00166			6,9
Toplam	44	0,86051				100

15 m/min dikkate alındığında maksimum yanak aşınması üzerindeki en etkili parametrenin %84,1 ile kesme hızı olduğu görülmüştür (Çizelge 6.9). Soğutma/yağlama yöntemi ve ilerlemenin etki oranı ise sırasıyla %6,5 ve %3,3 olarak gerçekleşmiştir. Kesme hızının 15 m/min'lik seviyesi dikkate alınmadığında ise VB_{max} üzerindeki en etkili parametreler sırasıyla kesme hızı (%61,1), soğutma/yağlama yöntemi (%21) ve ilerleme (%11) olarak gerçekleşmiştir. Yuvarlak kesici uçların kullanımı, mümkün olan her yerde en küçük giriş açısının kullanılması, açılı tornalama, kesici uç yarıçapı ve talaş derinliği arasındaki ilişkinin yanı sıra verimli soğutma/yağlama yöntemleri çentik aşınmasının azaltılması için kullanılabilmektedir [173]. Ancak literatürde ısıl dirençli süper alaşımların işlenmesi esnasında oluşan çentik aşınmasının hiç bir zaman yok edilemeyeceği ancak iyi bir planlama ile minimum seviyeye indirilebileceği vurgulanmıştır [174]. Çentik aşınmasını oluşturan sebeplerin arasında yüksek sıcaklık, malzemenin yüksek mukavemeti, pekleşme etkisi ve aşındırıcı talaşlar gibi birden fazla faktörün bulunması bu durumun sebebi olarak gösterilmiştir [175]. Kesme parametrelerinin çentik aşınması üzerindeki etkisi araştırıldığında kesme hızının en etkili parametre olduğu literatürde de görülmektedir

[173]. Bu çalışmada da 15 m/min'lik kesme hızının varyans analizine hem dâhil edildiği hem de dâhil edilmediği durumlarda kesme hızının çentik aşınması üzerindeki en etkili parametre olduğu ve soğutma/yağlama yöntemlerinin bu aşınma tipinin azaltılması için olumlu bir etki edeceği belirlenmiştir.

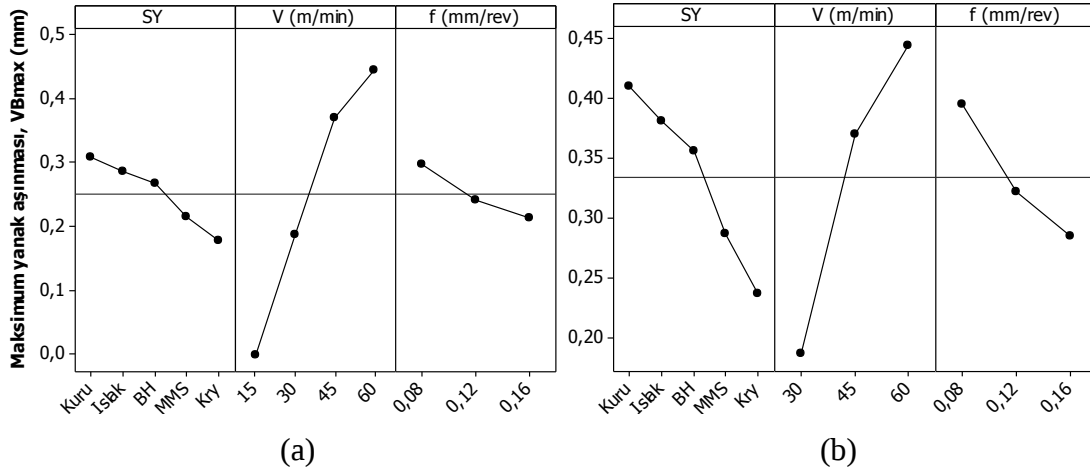
Analizler sonucu elde edilen belirtme katsayısı (R^2) olarak bilinen bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı ise; modeldeki açıklama miktarının açıklanamayan miktara olan oranıdır. Regresyon sonuçlarında belirtme katsayısı 1'e yakın bulunursa bağımlı değişkendeki değişimin büyük bir kısmı bağımsız değişken tarafından açıklanabilmektedir. Bulgulardaki katsayı ifadesi değerlerdeki 1 birimlik değişimin denklemini ne kadar etkilediğini gösterir. Regresyon katsayısı; bağımsız değişkende bir birimlik değişimin bağımlı değişkende ne kadar etkiye sahip olacağını ifade eder. Katsayıların standart hatası ise; katsayılarıdaki standart sapmayı ifade eder. Sabit ve regresyon katsayısı için hata değerleri; istatistiklerinin sonucu arasındaki farkı ifade eder. Anlamlılık göstergesi olan P değeri ise; regresyon analizine etki eden bağımsız değişkenlerin denkleminde anlamlı olup olmadığını test etmektedir. Anlamlılık, $P < 0,05$ olursa regresyon denkleminde bağımsız değişkenin bağımlı değişkene etkisinin olduğu sonucuna varılır [194]. Bu bilgiler eşliğinde yapılan varyans analizinde belirlilik katsayılarının yanak aşınması için $V=15$ m/min dikkate alındığında $R^2 = 0,973$; $V=15$ m/min dikkate alınmadığında $R^2 = 0,913$ ve maksimum yanak aşınması için $V=15$ m/min dikkate alındığında $R^2 = 0,939$; $V=15$ m/min dikkate alınmadığında ise $R^2 = 0,931$ olarak bulunması analiz sonuçlarının uygunluğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle bağımsız değişkenler olan soğutma/yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerlemenin; yanak aşınması üzerindeki etkisi %97,3 ($V=15$ m/min dikkate alındığında) ve %91,3 ($V=15$ m/min dikkate alınmadığında), $V=15$ m/min dikkate alındığında maksimum yanak aşınması üzerindeki etkisi %93,9 ve $V=15$ m/min dikkate alınmadığında ise %93,1'dir. Tüm aşınma analizlerinde soğutma/yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme için hesaplanan p değerleri 0,05'den küçük olduğu için tüm parametrelerin aşınma mekanizmaları üzerinde istatistiksel ve fiziksel öneme sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da ana faktör seviyelerinin VB ve VB_{max} üzerindeki etkileri ve ortalama aşınma değerleri verilmiştir. Bu durum, literatürde bulunan sonuçlarla paralellik arz etmiştir [52].



Şekil 6.18. Kontrol faktörlerinin yanak aşınması üzerindeki etkisi

a) V=15 m/min dikkate alındığında b) V=15 m/min dikkate alınmadığında



Şekil 6.19. Kontrol faktörlerinin maksimum yanak aşınması üzerindeki etkisi

a) V=15 m/min dikkate alındığında b) V=15 m/min dikkate alınmadığında

Deneyler sonucunda elde edilen takım aşınması verileri Minitab 16.0 yazılımı ile çoklu regresyon analizine tabi tutulmuştur. Analizler neticesinde çalışmadan elde edilen deney sonuçları ile Çizelge 6.7’de verilen giriş parametreleri arasındaki ilişkiyi gösteren ikinci dereceden matematiksel denklemler elde edilmiştir. Çoklu regresyon analizi yapılırken kesme hızının ilk seviyesi ihmal edilmiştir. Çizelge 6.10 ve 6.11’de ikinci dereceden çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen model sabiti ve değişkenlerin katsayılar tablosu verilmiştir. Analiz sonucu VB için geliştirilen model Eş. 6.2’de verilmiştir. Analiz sonucunda geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayısı yanak aşınması için %92,1 olarak bulunmuştur. %95 güven aralığı seviyesinde Çizelge 6.10’da p değeri 0,05 den büyük parametrelerin modellerde etkisinin önemsiz olduğu bulunmuştur.

Çizelge 6.10. VB modeli için katsayılar

Faktör	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	0,14008	0,07973	1,75669	0,088
SY	-0,03096	0,01185	-2,61309	0,013
V	0,00483	0,00243	1,98677	0,055
f	-1,15792	0,91165	-1,27013	0,212
SY ²	0,00164	0,00159	1,03019	0,310
V ²	-0,00003	0,00003	-1,13061	0,266
f ²	0,43750	3,53791	0,12366	0,902
SY*V	-0,00044	0,00015	-2,84876	0,007
SY*f	0,11625	0,05777	2,01216	0,052
V*f	0,00592	0,00667	0,88690	0,381

Çizelge 6.11. VB_{max} modeli için katsayılar

Faktör	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	-0,1449	0,12477	-1,16141	0,253
SY	-0,0117	0,01854	-0,63162	0,532
V	0,0332	0,00380	8,72988	0,000
f	-4,7762	1,42666	-3,34785	0,002
SY ²	-0,0062	0,00250	-2,49330	0,018
V ²	-0,0002	0,00004	-6,14481	0,000
f ²	11,6667	5,53652	2,10722	0,042
SY*V	-0,0012	0,00024	-4,97266	0,000
SY*f	0,3879	0,09041	4,29059	0,000
V*f	-0,0039	0,01044	-0,37515	0,710

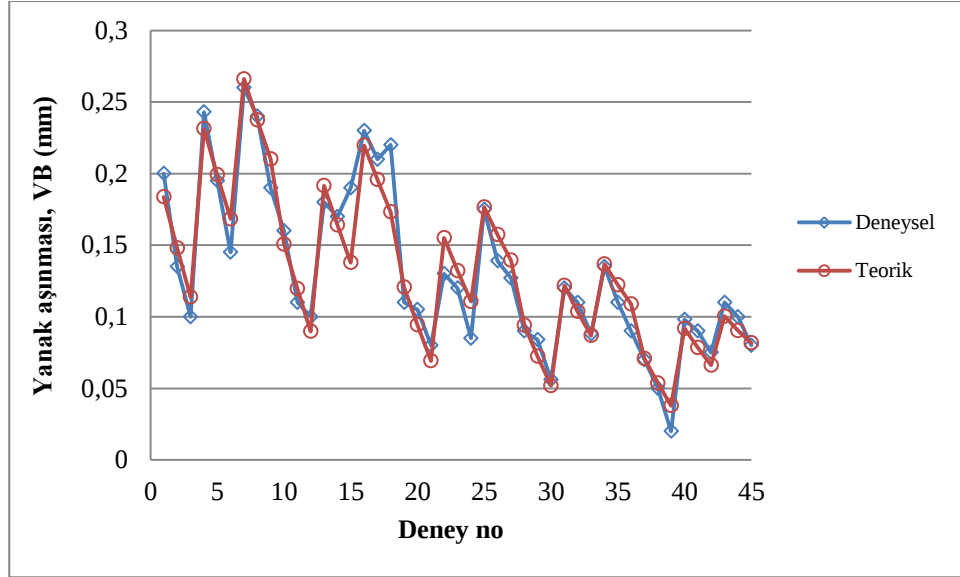
Yanak aşınması modeli ($R^2 = \%92,1$):

$$VB = 0,14 - 0,0309 * SY + 0,004 * V - 1,157 * f + 0,001 * SY^2 - 0,00003 * V^2 + 0,4375 * f^2 - 0,0004 * SY * V + 0,116 * SY * f + 0,005 * f * V \quad (6.2)$$

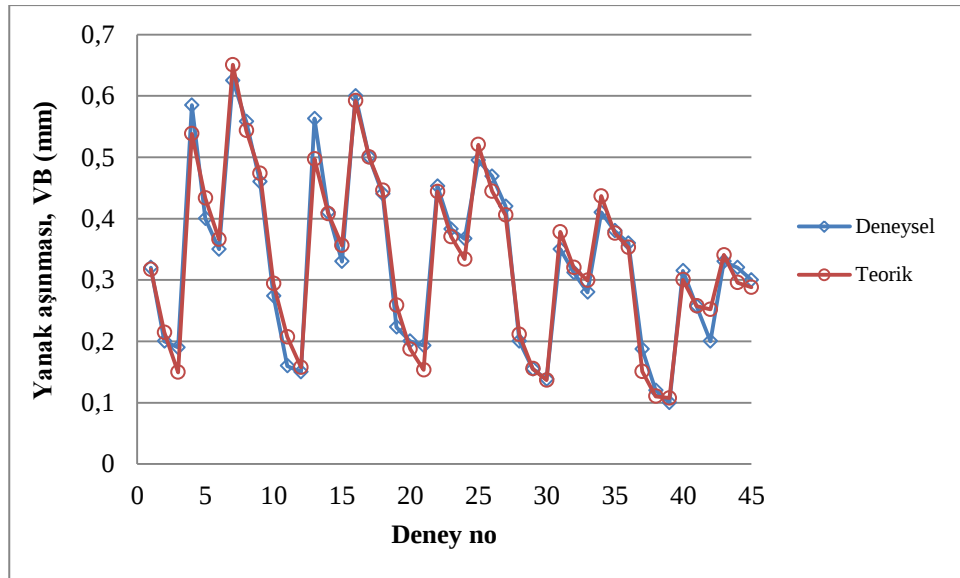
Analiz sonucu VB_{max} için geliştirilen model Eş. 6.3 verilmiştir. Analiz sonucunda geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayısı maksimum yanak aşınması için %96,8 olarak bulunmuştur. %95 güven aralığı seviyesinde Çizelge 6.11’de p değeri 0,05 den büyük parametrelerin modellerde etkisinin önemsiz olduğu bulunmuştur.

Maksimum yanak aşınması modeli ($R^2=\%96,8$):

$$VB_{max} = -0,144 - 0,011 * SY + 0,033 * V - 4,776 * f - 0,006 * SY^2 - 0,0002 * V^2 + 11,66 * f^2 - 0,001 * SY * V + 0,387 * SY * f - 0,003 * f * V \quad (6.3)$$



Şekil 6.20. Yanak aşınması için deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.21. Maksimum yanak aşınması için deney sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.20 ve Şekil 6.21, deneylerden ve matematiksel modellerden elde edilen yanak aşınması ve maksimum yanak aşınması sonuçlarının karşılaştırıldığı grafikleri

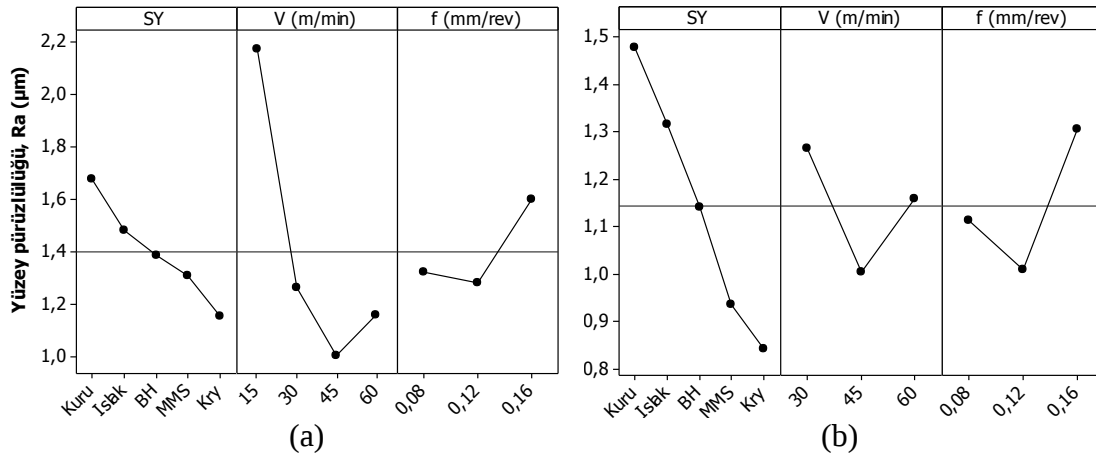
göstermektedir. Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de verilen grafikte görüldüğü üzere geliştirilen modellerin (Denklem 6.2 ve Denklem 6.3) sonuçları ile deney sonuçları değerlerinin birbirlerine çok yakın çıktığı görülmektedir. Başka bir ifadeyle geliştirilen modellerde hata (artık) miktarının az olduğu tespit edilmiştir. Hata miktarının az oluşunun sebebi geliştirilen modellerin belirlilik katsayısının yüksek olmasıdır. Belirtme katsayısı R^2 ’nin 1’e yakın olması geliştirilen modelin güçlü olduğunu ve hataların az olduğunu göstermektedir.

6.2.2. Yüzey pürüzlülüğünün analizi

Bu bölümde Haynes 25 süper alaşımının işlenmesinde yüzeyde oluşan pürüzlülüğe etki eden faktörlerin % etkisi araştırılmış ve ikinci dereceden çoklu regresyon analiziyle matematiksel modeller elde edilmiştir. Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi esnasında kullanılan tüm soğutma/yağlama yöntemleri ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi varyans analiziyle birlikte genel olarak değerlendirilmiştir. Takım aşınması analizlerinde olduğu gibi bu bölümde de kesme hızının ilk seviyesinin hem dikkate alındığı ve hem de ihmal edildiği iki farklı analiz yapılmıştır. Çizelge 6.12’de verilen varyans analizi sonuçlarına göre farklı soğutma/yağlama şartları ve kesme parametrelerinde ($V=15$ m/min dâhil edildiğinde) Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi esnasında yüzeyde oluşan pürüzlülük üzerinde etkili parametreler sırasıyla %70,5 ile kesme hızı, %9,4 ile soğutma/yağlama yöntemi ve %6,5 ile ilerleme olduğu görülmüştür. Kesme hızının $V=15$ m/min’lik seviyesi ihmal edilerek yapılan analizde ise yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametreler sırasıyla soğutma/yağlama yöntemi (%62,3), ilerleme (%16,9) ve kesme hızı (%12,8) olarak tespit edilmiştir. Çizelge 6.12’ye göre varyans analizinde belirlilik katsayılarının $R^2=0,885$ ve $R^2=0,92$ olarak bulunması analiz sonuçlarının uygunluğunu göstermiştir. Soğutma/yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme için hesaplanan p değerleri 0,05’den küçük olduğu için tüm parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel ve fiziksel öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.22’de, ana faktör seviyelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ve ortalama pürüzlülük çizgileri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere değişen işleme şartı ve kesme parametrelerine göre pürüzlülük değerlerinin de belirgin bir şekilde değiştiği gözlenmiştir. Bu durum literatürde bulunan sonuçlarla paralellik arz etmiştir [52].

Çizelge 6.12. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları için ANOVA tablosu

Faktör	Serbestlik derecesi, SD	Kareler Toplamı, KT	Kareler Ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% Katkı
<i>V=15 m/min dikkate alındığında ($R^2=\%88,5$)</i>						
SY	4	1,8029	0,4507	11,21	0,000	9,4
Vc	3	12,4647	4,1549	103,3	0,000	70,5
f	2	1,2205	0,6102	15,17	0,000	6,5
Hata	50	2,0112	0,0402			13,6
Toplam	59	17,4993				100
<i>V=15 m/min dikkate alınmadığında ($R^2=\%92$)</i>						
SY	4	2,46405	0,61601	70,19	0,000	62,3
Vc	2	0,50690	0,25345	28,88	0,000	12,8
f	2	0,66884	0,33442	38,10	0,000	16,9
Hata	36	0,31597	0,00878			8
Toplam	44	3,95576				100



Şekil 6.22. Kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi

a) $V=15$ m/min dikkate alındığında b) $V=15$ m/min dikkate alınmadığında

Çizelge 6.13’de ikinci dereceden çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen model sabiti ve değişkenlerin katsayıları verilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü modeli ($R^2=\%94$):

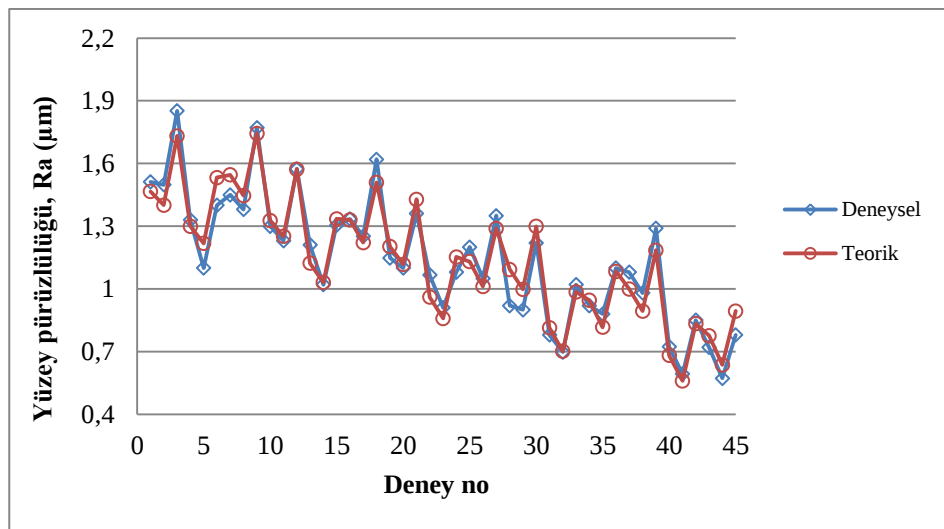
$$R_a = 4,281 - 0,05 * SY - 0,077 * V - 25,53 * f + 0,007 * SY^2 + 0,0001 * V^2 + 123,7 * f^2 - 0,252 * SY * f - 0,002 * SY * V - 0,028 * V * f \quad (6.4)$$

Soğutma yöntemlerinin de dâhil edildiği analiz sonucunda yüzey pürüzlülüğü için geliştirilen model Eş. 6.4’de verilmiştir. Geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayısı $\%94$ olarak bulunmuştur. $\%95$ güven aralığı seviyesinde modelde p değeri 0,05’den küçük

parametrelerinin etkisinin önemsiz olduğu bulunmuştur. Şekil 6.23, deneylerden ve matematiksel modellerden elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının karşılaştırıldığı grafiği göstermektedir. Şekil 6.23’de verilen grafikte görüldüğü üzere, geliştirilen modelin (Denklem 6.4) sonuçları ile deney sonuçları değerlerinin birbirlerine çok yakın çıktığı görülmektedir. Başka bir ifadeyle geliştirilen modelde hata (artık) miktarının az olduğu tespit edilmiştir. Hata miktarının az oluşunun sebebi geliştirilen modellerin belirlilik katsayısının $R^2=0,94$ (Çizelge 6.13) yüksek olmasıdır. Belirtme katsayısı R^2 ’nin 1’e yakın olması geliştirilen modelin güçlü olduğunu ve hataların az olduğunu göstermiştir.

Çizelge 6.13. Yüzey pürüzlülüğü modeli için katsayılar

Faktör	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	4,282	0,3643	11,7539	0,000
SY	-0,051	0,0541	-0,9363	0,356
V	-0,077	0,0111	-6,9653	0,000
f	-25,532	4,1655	-6,1293	0,000
SY^2	0,008	0,0073	1,0369	0,307
V^2	0,001	0,0001	7,9542	0,000
f^2	123,771	16,1654	7,6565	0,000
SY*f	-0,003	0,0007	-3,5956	0,001
SY*V	-0,252	0,2640	-0,9565	0,345
V*f	-0,028	0,0305	-0,9240	0,362



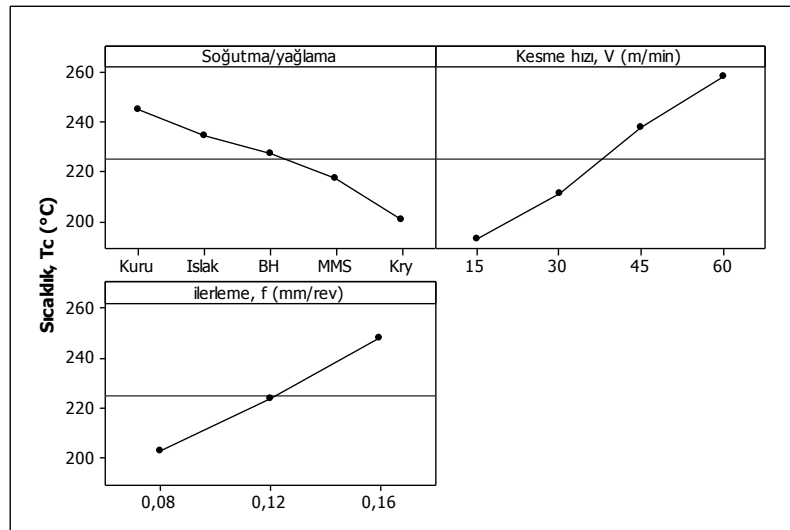
Şekil 6.23. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

6.2.3. Kesici takım sıcaklığının analizi

Haynes 25 süper alaşımının işlenmesinde kesici takımda oluşan sıcaklığa etki eden faktörlerin % etkisi araştırılmış ve ikinci dereceden çoklu regresyon analiziyle matematiksel modeller elde edilmiştir. Haynes 25 süper alaşımının işlenmesi esnasında kullanılan tüm soğutma/yağlama yöntemleri ve kesme parametrelerinin sıcaklık üzerindeki etkisi varyans analiziyle birlikte genel olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 6.14’de varyans analizinde belirlilik katsayılarının $R^2 = 0,897$ olarak bulunması analiz sonuçlarının uygunluğunu göstermektedir.

Çizelge 6.14. Sıcaklık sonuçları için ANOVA tablosu

Faktör	Serbestlik derecesi, SD	Kareler Toplamı, KT	Kareler Ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% Katkı
SY	4	13824,9	3456,2	21,01	0,000	17,3
V	3	37191,2	12397,1	75,37	0,000	46,5
f	2	20806,5	10403,2	63,25	0,000	26
Hata	50	8224,0	164,5			10,2
Toplam	59	80046,5				100



Şekil 6.24. Kontrol faktörlerinin sıcaklık üzerindeki etkisi

Analiz ile sıcaklık üzerindeki en etkili parametrenin %46,5 ile kesme hızı olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızından sonra sıcaklık üzerinde etkili diğer parametreler ise %26 ile ilerleme %17,3 ile soğutma/yağlama yöntemi olmuştur. Varyans analiziyle sıcaklık

değişiminde kesme hızı parametresinin ilerlemeye göre daha etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Bu eğilim, literatür ile paralellik arz etmektedir [166, 174, 189, 196-198].

Çizelge 6.15. Sıcaklık modeli için katsayılar

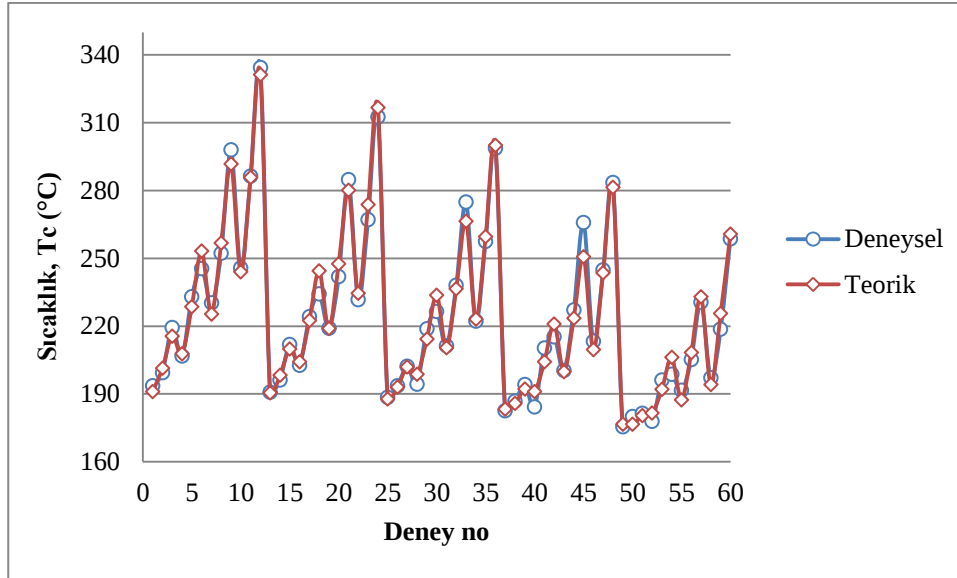
Faktör	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	177,09	14,556	12,1666	0,000
SY	10,56	3,007	3,5103	0,001
V	-0,18	0,267	-0,6666	0,508
f	-172,76	210,787	-0,8196	0,416
SY ²	-1,00	0,378	-2,6502	0,011
V ²	0,00	0,003	0,7403	0,463
f ²	1181,76	838,466	1,4094	0,165
SY*V	-0,20	0,027	-7,3658	0,000
SY*f	-65,04	13,692	-4,7499	0,000
V*f	17,43	1,155	15,0994	0,000

Çizelge 6.15’de ikinci dereceden çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen model sabiti ve değişkenlerin katsayıları verilmiştir.

Sıcaklık modeli ($R^2 = \%98,5$):

$$T_c = 177,094 - 10,555 * SY - 0,178 * V - 172,764 * f - 1,001 * SY^2 + 0,002 * V^2 + 1181,76 * f^2 - 0,194 * SY * V - 65,036 * SY * f + 17,434 * V * f \quad (6.5)$$

Soğutma yöntemlerinin de dâhil edildiği analiz sonucunda tahmin edilen kesici takım sıcaklığı için geliştirilen model Eş. 6.5’de verilmiştir. Geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayısı %98,50 olarak bulunmuştur. %95 güven aralığı seviyesinde modelde p değeri 0,05’in altında olan parametrelerinin etkisi önemsizdir. Şekil 6.25’de verilen grafikte görüldüğü üzere geliştirilen modelin (Denklem 6.5) sonuçları ile deney sonuçları değerlerinin birbirlerine çok yakın çıktığı görülmektedir. Başka bir ifadeyle sıcaklık sonuçları için geliştirilen modelde hata (artık) miktarının az olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.25. Sıcaklık için deney sonuçları ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

6.2.4. MMS parametrelerinin analizi

Bu bölümde süper alaşımın MMS yöntemiyle işlenmesi esnasında MMS sisteminde kullanılan yağ cinsi ve yağ debisi ile kesme hızının; takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ANOVA analizi yardımıyla istatistiksel olarak araştırılmıştır. ANOVA analizinde kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlere ait seviyeler Çizelge 6.16'da verilmiştir.

Çizelge 6.16. Kontrol faktörleri ve seviyeleri

Faktör	Sembol	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme yağı cinsi	CF _s	-	Mineral esaslı (1)	Sentetik esaslı (2)	Bitkisel esaslı (3)
Yağ akış oranı	Q	ml/h	60	120	180
Kesme hızı	V	m/min	30	40	50

ANOVA analizi neticesinde elde edilen bulgular Çizelge 6.17'de verilmiştir. Çizelge 6.17'de verilen bu bulgulara göre; VB, VB_{max} ve Ra için belirlilik katsayıları sırasıyla R²=%90,6; R²=%85,8 ve R²=%94,5 olarak bulunmuştur. ANOVA analizi ile yanak aşınması üzerindeki en etkili parametreler sırasıyla %63,66 ile kesme hızı, %19,88 ile yağ akış oranı ve %7,34 ile yağ cinsi olarak gerçekleşmiştir. Çizelge 6.17'de verilen sonuçlara göre; maksimum yanak aşınması üzerindeki en etkili parametre %59,42 ile kesme hızı olmuştur. Kesme hızından sonra diğer etkili parametreler ise %22,24 ile yağ akış oranı ve

%4,18 ile yağ cinsi olmuştur. ANOVA analizine göre yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkili parametreler sırasıyla kesme hızı (%85,65), yağ akış debisi (% 7,43) ve yağ cinsi (%1,42) olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 6.17. MMS parametrelerinin ANOVA tablosu

Faktör	Serbestlik derecesi, SD	Kareler Toplamı, KT	Kareler Ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% Katkı
<i>Yanak aşınması, VB ($R^2=90,9$)</i>						
CF _s	2	0,0004482	0,0002241	0,80	0,555	7,34
Q	2	0,0012162	0,0006081	2,18	0,315	19,88
V	2	0,0038936	0,0019468	6,97	0,125	63,66
Hata	2	0,0005582	0,0002791			9,12
Toplam	8	0,0061162				100
<i>Maksimum yanak aşınması, VB_{max} ($R^2=85,8$)</i>						
CF _s	2	0,0002816	0,0001408	0,29	0,772	4,18
Q	2	0,0015002	0,0007501	1,57	0,389	22,24
V	2	0,0040069	0,0020034	4,20	0,192	59,42
Hata	2	0,0009549	0,0004774			14,16
Toplam	8	0,0067436				100
<i>Yüzey pürüzlülüğü, Ra ($R^2=94,5$)</i>						
CF _s	2	0,00962	0,00481	0,26	0,796	1,42
Q	2	0,05056	0,02528	1,35	0,426	7,43
V	2	0,58282	0,29141	15,55	0,058	85,65
Hata	2	0,03749	0,01874			5,50
Toplam	8	0,68049				100

MMS giriş parametreleri bağımsız değişken, deney sonuçları ise bağımlı değişken olarak kabul edilerek matematiksel modeller elde etmek için çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Çizelge 6.18’de ikinci dereceden çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen model sabiti ve değişkenlerin katsayıları tablosu verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak elde edilen matematiksel eşitlikler Eş. 6.6-Eş. 6.8 arasında görülmektedir.

Yanak aşınması modeli ($R^2=99,69$):

$$VB = 0.133 - 0.0036 * CF_s + 0.0004 * Q - 0.0031 * V_c - 0.0003 * CF_s * Q + 0.0017 * CF_s * V_c - 0.0076 * CF_s^2 \quad (6.6)$$

Maksimum yanak aşınması modeli ($R^2=99,77$):

$$VB_{max} = 0.1776 - 0.0506 * CF_s + 0.0005 * Q - 0.0025 * V_c - 0.0003 * CF_s * Q + 0.0021 * CF_s * V_c - 0.0003 * CF_s^2 \quad (6.7)$$

Yüzey pürüzlülüğü modeli ($R^2=\%98,77$):

$$Ra = 4.12 + 0.1266 * CF_s - 0.0137 * Q - 0.076 * V_c + 0.0063 * CF_s \cdot V_c + 0.0002 * Q * V_c - 0.0833 * CF_s^2 \quad (6.8)$$

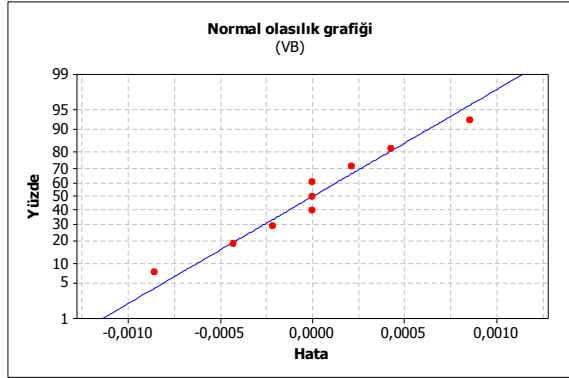
VB, VB_{max} ve Ra için geliştirilen matematiksel modellerin belirlilik katsayıları sırasıyla $R^2=99,69$, $R^2=99,7$ ve $R^2=98,77$ olarak bulunmuştur. %95 güven aralığı seviyesinde modellerde p anlamlılık değeri 0,05'den küçük olan parametrelerin etkisi istatistiksel olarak önemsizdir.

Çizelge 6.18. Modeller için katsayılar tablosu

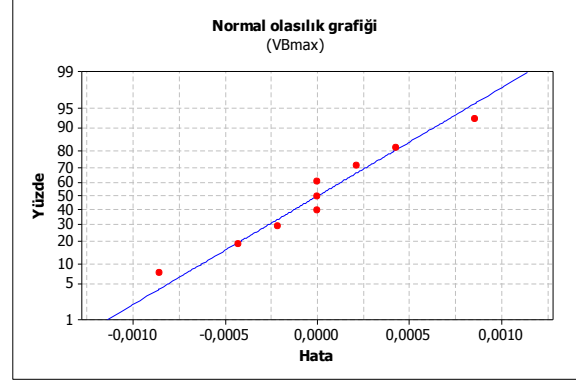
Faktör	Katsayı	SE Katsayı	T	P
<i>Yanak aşınması, VB ($R^2=\%99,69$)</i>				
Sabit	0,120571	0,0165625	7,2798	0,087
CF_s	-0,003131	0,0056725	-0,5520	0,679
Q	0,000418	0,0000758	5,5093	0,114
V	-0,002393	0,0006622	-3,6134	0,172
$CF_s \cdot Q$	-0,000323	0,0000247	-13,0545	0,049
$CF_s \cdot V$	0,001595	0,0001485	10,7451	0,059
$Q \cdot V$	0,000004	0,0000028	1,4699	0,380
CF_s^2	-0,006917	0,0012990	-5,3245	0,118
<i>Maksimum yanak aşınması, VB_{max} ($R^2=\%99,77$)</i>				
Sabit	0,190095	0,0165625	11,4775	0,055
CF_s	-0,051202	0,0056725	-9,0264	0,070
Q	0,000643	0,0000758	8,4811	0,075
V	-0,003274	0,0006622	-4,9438	0,127
$CF_s \cdot Q$	-0,000360	0,0000247	-14,5621	0,044
$CF_s \cdot V$	0,002305	0,0001485	15,5243	0,041
$Q \cdot V$	0,000001	0,0000028	0,2940	0,818
CF_s^2	-0,001083	0,0012990	-0,8340	0,557
<i>Yüzey pürüzlülüğü, Ra ($R^2=94,5$)</i>				
Sabit	4,41000	0,386458	11,4113	0,056
CF_s	0,11417	0,132358	0,8626	0,547
Q	-0,01242	0,001770	-7,0161	0,090
V	-0,09250	0,015452	-5,9865	0,105
$CF_s \cdot Q$	-0,00056	0,000577	-0,9623	0,512
$CF_s \cdot V$	0,01033	0,003464	2,9830	0,206
$Q \cdot V$	0,00032	0,000066	4,9135	0,128
CF_s^2	-0,10083	0,030311	-3,3266	0,186

Bu bölümde modellerin güvenilirliğini belirlemek için normal olasılık grafikleri kullanılmıştır. Bu grafiklerde, bir eksen gözlenen değerler, diğer eksen ise normal dağılım

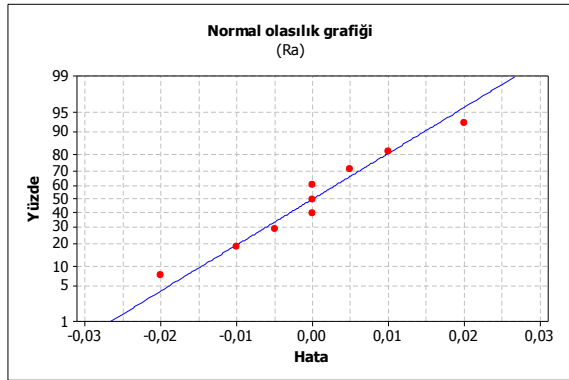
varsayımına göre beklenen değerler eksenidir. Veriler normal dağılım gösteriyorsa, noktaların bir doğru üzerinde yer alması ya da etrafında belirli bir desen göstermeden dağılması gerekir. Şekil 6.26.'da elde edilen modellerin normal olasılık grafikleri görülmektedir. Grafikler yorumlandığında, üç grafikte de noktaların doğru üzerinde yer aldığı tespit edilmiştir. Bu durum elde edilen modellerin güvenilirliğini ispatlamaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil. 6.26. Hataların normal olasılık grafiği a) VB b) VB_{max} c) Ra

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

İşlenebilirliği en zor malzeme grubunda gösterilen Haynes 25 diğer bir adıyla L 605 süper alaşımının işlenmesi sürecinde seçilen kesme parametrelerinin ve soğutma/yağlama yöntemlerinin süper alaşımın işlenebilirliğine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla CNC torna tezgâhında ISO 3685 standardına uygun olarak farklı kesme hızı, ilerleme oranı, soğutma/yağlama yöntemi ve sabit talaş derinliğinde deneyler yapılmıştır. Deneyler ilk olarak kuru işleme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra geleneksel soğutma yöntemi, basınçlı hava ile soğutma yöntemi (BH), basınçlı hava ile minimum miktarda kesme yağı püskürtmek suretiyle soğutma/yağlama yöntemi (MMS) ve kater içerisinde sıvı azot geçirilerek kriyojenik soğutma yöntemi ile deneyler tekrarlanmıştır. Her bir deney neticesinde kesme şartları ve takım soğutma sistemi ile takım aşınması, yüzey kalitesi ve sıcaklık arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. MMS yönteminde seçilen kesme yağı, yağ akış debisi ve kesme hızının deney sonuçlarına etki edebileceği düşünülerek bu parametreler MMS yöntemi içerisinde ayrıca değerlendirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmış ve bazı öneriler sunulmuştur:

- Literatürde, ısıl dirençli süper alaşımların kaplamasız karbür kesici takım kullanılarak işlenmesinde tavsiye edilen $V=15$ m/min ve malzeme üreticisinin önerdiği $V=12$ m/min'lik kesme hızı seviyelerinin bu malzemenin işlenmesi için uygun olmadığı görülmüştür. Çünkü düşük kesme hızında özellikle kesici uç burun bölgesinde önemli miktarda aşınma ve malzeme sıvanması (YK) meydana gelmiştir.
- Kesici uç radyüsünün 0,8 mm ve talaş derinliğinin 1 mm olması sebebi ile yan kenar aşınması (VB) burun yarıçapında veya burun yarıçapına yakın bölgede oluşmuştur.
- Kesme hızının 30 m/min'e yükselmesiyle beraber düşük kesme hızında kesici uç burun bölgesinde oluşan malzeme yapışması önemli ölçüde azaltılmıştır. Artan kesme hızıyla birlikte YK tabakalarının azalması literatürle paralellik arz etmiştir. Fakat $V=30$ m/min ve bu seviyeden sonra artan kesme hızıyla birlikte tüm soğutma koşullarında kesici uçta çentik aşınması (VB_{max}) meydana gelmiştir.

- Kesici uçların SEM görüntüleriyle yapılan analizlerinde başta adheziv aşınma mekanizması olmak üzere abrasiv aşınma, difüzyon aşınma ve yorulma aşınmasının etkin olduğu bulunmuştur. Süper alaşımın kaplamasız karbür kesici takım ile işlenmesinde adheziv aşınma mekanizmasının etkisiyle özellikle takım-talaş yüzeyine sıvanmış YK tabakalarının ve mikro düzeyde oluşan YT'lerin varlığı tespit edilmiştir. Bu durum kesici takım-malzeme çifti arasındaki yapışma eğiliminin oldukça fazla olduğunu göstermiştir.
- Her bir deneyde malzeme üzerinden sabit hacimde talaş kaldırdıktan sonra yapılan ölçümlerde en düşük yanak aşınması, kriyojenik soğutma altında $V=30$ m/min ve $f=0,16$ mm/rev kesme parametrelerinde, en düşük maksimum yanak aşınması ise, kriyojenik soğutma altında aynı kesme parametreleri ile ölçülmüştür.
- Bütün soğutma/yağlama koşulları altında maksimum yanak aşınması (VB) $V=15$ m/min ve $f=0,08$ mm/rev kesme parametrelerinde oluşmuş gibi görülse de düşük kesme hızında malzemenin kesici uç burun bölgesi üzerine etkili bir şekilde yapışması yapılan ölçümlerin doğruluğunu azaltmıştır. Maksimum VB_{max} değeri ise kullanılan bütün soğutma/yağlama koşulları altında $V=60$ m/min ve $f=0,08$ mm/rev parametrelerinde oluşmuştur.
- Malzeme üzerinden sabit hacimde talaş kaldırdıktan sonra yapılan ölçümlerde minimum takım aşınmasının ilerlemenin en üst seviyesinde ($f=0,16$ mm/rev) ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum yüksek ilerlemede kesici takım-iş parçası arasındaki temas süresinin az olmasıyla ilişkilendirilmiştir.
- Yan yüzey aşınması değeri, kesme parametrelerinin ve soğutma yönteminin doğru seçilmesiyle %96,5 oranında azaltılmıştır. Maksimum yan yüzey aşınması değeri ise, kesme parametrelerinin ve soğutma/yağlama yönteminin doğru seçilmesiyle %84 oranında azaltılmıştır.
- Yan yüzey aşınması, kuru işlemeye göre; geleneksel soğutma yöntemiyle %26'ya kadar, basınçlı hava ile %46,5'e kadar, MMS kullanımı ile %54,1'e kadar ve kriyojenik soğutma yöntemi kullanılması ile %80'e kadar azaltılmıştır. Maksimum yan yüzey

aşınması ise, kuru işlemeye göre; geleneksel soğutma yöntemiyle %21'e kadar, basınçlı hava kullanılması ile %30,3'e kadar, MMS kullanımı ile %40'a kadar ve kriyojenik soğutma yöntemi kullanılması ile %47,3'e kadar azaltılmıştır.

- Kullanılan bütün soğutma yöntemleri altında en yüksek yüzey pürüzlülük değeri $V=15$ m/min'lik kesme hızında oluşmuştur. Kesici takımlar için yapılan SEM incelemelerinde düşük kesme hızında gözlenen YK ve YT oluşumunun, beklenmedik bir biçimde oldukça yüksek çıkan yüzey pürüzlülük sonuçlarının sebebi olarak belirlenmiştir.
- İşleme koşullarında genellikle ilerleme değerinin orta seviyesinde ($f=0,12$ mm/rev) en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Düşük ve yüksek ilerleme hızları yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. İlerleme değerinin çok küçük olması dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü tezgâh-iş parçası-takım titreşimlerinden ve yığıntı talaş formundan olumsuz olarak etkilenmiştir. İlerleme değerinin bu seviyeden sonra artmasıyla yüzey pürüzlülüğü de buna paralel olarak artmıştır. Bu durum beklenen bir sonuç olup literatür ile paralellik arz etmiştir.
- Bütün işleme koşulları altında kesme hızının $V=45$ m/min'e kadar artmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Fakat kuru, geleneksel soğutma, BH ve MMS işleme koşulları altında $V=45$ m/min'den sonraki artışlarda kesici takım aşınma sürecine girdiğinden kesme hızının çok fazla artması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir. Kriyojenik soğutma yöntemi ile bu sınır $V=45$ m/min'den $V=60$ m/min'e yükseltilmiştir.
- Ortalama sıcaklıklar değerlendirildiğinde, en düşük ortalama sıcaklık kriyojenik soğutma koşulları altında elde edilmiştir. Nitekim bu durum, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne olumlu olarak yansımıştır. Kesme hızı ve ilerlemenin artışıyla birlikte kesici takımda oluşan sıcaklık da artmıştır. Bu durum beklenen bir sonuç olup literatür ile paralellik arz etmektedir.
- Kesici takım yüzeyi sıcaklığını tahmin etmek için ANSYS programı yardımıyla tersine ısı iletim metodu kullanılmıştır. Kesici uç-altlık ara yüzeyinden ve kesme bölgesine en yakın noktadan ölçülen sıcaklıklar bu metotla modellenmiştir. Modelleme sonuçları ile

doğrulama deney sonuçları arasındaki hata payı %4,34 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar uygulanan yöntemin güvenilirliğini göstermiştir.

- Bu çalışmada kesici takım yüzeyinde oluşan sıcaklıkların bulunması için kullanılan üç boyutlu tersine ısııl model, sıcaklıkların tespitinde kullanılan pahalı deneysel yöntemlere (termal kamera, pirometre, ısııl çift, termokupul gömme gibi) bir alternatif olarak bundan sonraki çalışmalarda da kullanılabilir.
- Optimum MMS parametrelerinin belirlenmesi için yapılan deneylerde ise $Q=180$ ml/h yağ akış debisinde bitkisel esaslı kesme yağı en iyi sonucu vermiştir.
- Kesme hızının en düşük seviyesi ($V=15$ m/min) varyans analizine dâhil edilerek yapılan değerlendirmelerde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık üzerindeki en etkili parametrenin kesme hızı olduğu görülmüştür. Kesme hızının $V=15$ m/min'lik seviyesi ihmal edilerek yapılan varyans analizinde ise yanak aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin soğutma yöntemi, maksimum yanak aşınması üzerindeki en etkili parametrenin ise kesme hızı olduğu bulunmuştur. Ayrıca yapılan bütün analizlerde belirlilik katsayısının (R^2) yüksek oluşu analizlerin güvenilirliğini ortaya koymuştur.
- Farklı işleme parametrelerinde tahmini sonuçlar elde etmek için çoklu regresyon analizi ile 2. dereceden matematiksel modeller elde edilmiştir. Deney sonuçları ve matematiksel model sonuçlarının çok yakın çıkması deney parametreleri haricinde farklı kesme parametrelerinde sonuçlar elde etmek için modellerin kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Çoklu regresyon analizlerinde hesaplanan belirtme katsayılarının yüksek olması modellerin güvenilirliğini göstermiştir.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında, bundan sonraki çalışmalara aşağıdaki öneriler getirilebilir:

- Literatürde, süper alaşımların işlenmesinde kaplamasız karbür H13A kalitesinin yüzey pürüzlülüğü açısından iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada

H13A kalitesinde kaplamasız karbür uçlar kullanılmıştır. PVD ve CVD kaplamalı karbür kesici uçların da malzemenin işlenmesi esnasındaki performansı test edilebilir.

- Bu çalışmada dört farklı soğutma yöntemi (geleneksel, basınçlı hava, MMS ve kriyojenik) kullanılmıştır. Yüksek basınçlı soğutma (bor yağı+su) ve ısı borusu yönteminin de malzemelerin işlenmesi esnasında ortaya koyduğu sonuçlar araştırılabilir. Maliyet, uygulanabilirlik ve çevresel şartlar göz önüne alındığında, MMS yöntemi talaş kaldırma uygulamalarının hemen hemen hepsinde kullanılabilir.
- Literatürde ısıl dirençli süper alaşımların (Haynes 25 ve Inconel 718 gibi) bir ark kaynağı yardımıyla ısıtılması frezede işlenebilirliği kolaylaştırdığı fakat işleme maliyetlerini çok fazla arttığı belirtilmiştir. İşlenmesi zor ve maliyetli olan bu süper alaşımların ısıtılarak tornalanmasının da işlenebilirliğe ve toplam işleme maliyetine olan etkisi araştırılabilir.
- Bu çalışmada en etkili soğutma yönteminin kriyojenik ve MMS soğutma/yağlama yöntemi olduğu bulunmuştur. Her iki yöntem de bu çalışmada ayrı ayrı uygulanmıştır. Takım içi (dâhili) kriyojenik soğutma ve takım dışı (harici) MMS ile yağlama metotlarının bir arada kullanılmasıyla daha verimli sonuçlar elde edililip edilemeyeceği araştırılabilir.
- Bu çalışmada kullanılan basınçlı hava ve MMS ile soğutma yağlama yönteminde nozul ölçüsü, nozul pozisyonu, basınç oranı, yağ cinsi, yağ debisi vb. işleme performansını etkileyen pek çok parametre olduğu literatürde belirtilmiştir. Bu parametreler değiştirilerek işlenmesi zor malzemelerin bu yöntemlerle işlenmesinde en uygun parametreler tespit edilebilir.
- Bu çalışmada kesme derinliği sabit tutulmuş olup, kesme derinliğinin işlenebilirlik kriterleri üzerindeki etkisi kapsam dışında tutulmuştur. Kesme derinliğinin de bir parametre olarak değişen değerleri için işlenebilirlik kriterleri araştırılabilir.

- Bu çalışmada işlenebilirlik kriteri olarak takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık sonuçları dikkate alınmıştır. Farklı bir çalışma ile kesme kuvvetleri de ölçülerek ayrı bir değerlendirme yapılabilir.
- Bu çalışmada işleme deneyleri “tornalama” yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Aynı malzemelerde “frezeleme” ve “delme” uygulamaları yapılarak farklı işlenebilirlik değerlendirmelerine gidilebilir.
- Bu malzeme üzerinde, alışılmamış imal usulleriyle yapılacak deney sonuçları ile geleneksel yöntemlerle elde edilecek sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Farklı giriş parametrelerinde tahmini deney sonuçları elde etmek için bu çalışmada kullanılan çoklu regresyon analizi ile modelleme yerine yapay sinir ağlarıyla modelleme yolu seçilebilir. Her iki modelleme yönteminden elde edilen sonuçlar kıyaslanarak en etkili modelleme yöntemi bulunabilir.
- İşlenebilirlik deneylerinde kesme bölgesindeki sıcaklığın doğru bir şekilde ölçülmesi oldukça zor ve maliyetlidir. Bu çalışmada kullanılan tersine ısı iletim yöntemi, farklı malzemelerin işlenmesinde, kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkların ölçülmesinde de kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Tungaloy, I. Products for machining high temp alloy materials. *Tungaloy America Inc. Product Selection Guide*. URL: <http://www.tungaloyamerica.com/pdf/High%20Temp%20web.pdf>, Son Erişim Tarihi: 18.12.2012.
2. Ezugwu E.O. (2007). Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 60-71.
3. High temperature – materials. (2004). Web: <http://www.haynesintl.com/pdf/h3057.pdf> sayfasından 11 Nisan 2012 tarihinde alınmıştır.
4. Ezugwu E.O. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1353–1367.
5. Ezugwu E.O., et al. (2003). An overview of the machinability of aero-engine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253.
6. Ezugwu E.O., et al. (1999). The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 1-16.
7. Grzesik, W. (2008). Theory, modelling and applications. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, Elsevier, 186-189.
8. Sims, C.T., Hagel, W.C. (1972). The superalloys. Wiley, New York, 25.
9. White, C. H. (1986). Nickel base alloys, *Wiggin Alloy*, 12.
10. Richards, N., Aspinwall, D. (1989). Use of ceramic tools for machining nickel-based alloys. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 294, 575-588.
11. Field, M. (1968). Machining aerospace alloys. *Iron and Steel Institute*, Special Report 94, 151-160.
12. Ezugwu, E. O., Wanga, Z. M., Machadop A. R. (1998). The machinability of nickel based alloys: a review. *Journal of materials Processing Technology*, 86 (1-3), 1-16.
13. Davis J.R. (2003). Handbook of materials for medical devices. *ASM International*, 3, 34-36.
14. Heat resistant super alloys – HRSA. Web: www2.coromant.sandvik.com/coromant/./C_2920_18_ENG_009_042.pdf sayfasından 25 Haziran 2012 tarihinde alınmıştır.
15. Davis J.R. (2000). Nickel, cobalt, and their alloys. *ASM Specialty Handbook*, 362-404.
16. ASM International. (1995). Machininig. *ASM International*, 16 of the 9th Edition Metals Handbook.

17. Lacelle, L.N., Sanchez, J.A., Lamikiz, A., Celaya, A. (2004). Plasma assisted milling of heat – resistant superalloys. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126 (2), 274-285.
18. Aykut Ş., Bağcı E., Kentli A., Yazıcıoğlu O. (2007). Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool. *Materials and Design*, 28, 1880-1888.
19. Aykut Ş. (2005). *Kobalt Esaslı Süper Alaşımlı Çeliklerin Düzlem Yüzey Frezelemede Talaş Kaldırma Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
20. Benghersallah, M., Boulanouar, L., Le Coz, G., Devillez, A., Dudzinski, D. (2010). Machinability of stellite 6 hardfacing. *Epc Web of Conferences*, 6.
21. Çakır, O., Kılıçkap, E. (2001). Metallerin soğuk talaşlı işlenmesi. *Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, Konya, 279-283.
22. Çakır, O., Kıyak, M., Atlan, E. (2004). Comprasion of gases applications to wet and dry cuttings in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 35-42.
23. Yamane, Y., Nautılı, N., Hayashi, K. (1996). Suppression of tool wear by using an inert gas in face milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 62, 380-383.
24. Da Silva, M.B., Wallbank, J. (1999). Cutting temperature: prediction and measurement methods a review. *Journal of Material Processing Technology*, 88, 195-202.
25. Boothroyd G., Winston A.K. (2005). Fundamentals of machining and machine tools. *CRC Taylor & Francis*, Third ed.
26. E.M. Trent, P.K. Wright. (2000). Metal Cutting. Fourth Ed. *Butterworth Heinemann*, Oxford.
27. Bermingham, M.J., Kirsch, J., Sun, S., Palanisamy, S., Dargusch, M.S. (2012). A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti-6Al-4V cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 752-765.
28. Sun, S., Brandt, M., Dargusch, M.S. (2010). Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50, 933-942.
29. Khan, A.A., Ahmed, M.I. (2008). Improving tool life using cryogenic cooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 196, 149-154.
30. Özçatalbaş, Y., Baş, A. (2006). Tornalamada hava püskürtme ile soğutmanın kesme kuvvetleri ve takım ömrüne etkilerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3), 451-455.

31. Ezugwu, E.O., Bonney, J. (2005). Finish machining of nickel-base Inconel 718 alloy with coated carbide tool under conventional and high-pressure coolant supplies, *Tribology Transactions*, 48(1), 76-81.
32. Ezugwu, E.O., Bonney, J., Fadare, D.A., Sales, W.F. (2005). Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 609-614.
33. Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253.
34. Machai, C., Biermann, D. (2011). Machining of B-titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: cooling with carbon dioxide snow. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1175-1183.
35. Kalyan Kumar, K.V.B.S., Choudhury, S.K. (2008). Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 203, 95-101.
36. Jerold, B.D., Kumar, M.P. (2011). Experimental investigation of turning AISI 1045 steel using cryogenic carbon dioxide as the cutting fluid. *Journal of Manufacturing Process*, 13, 113-119.
37. Nandy A.K. Gowrishankar, M.C., Paul, S. (2009). Some studies on high-pressure cooling in turning of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 182-198.
38. Liu, J., Han, R., Sun, Y. (2005). Research on experiments and action mechanism with water vapor as coolant and lubricant in green cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 687-694.
39. Venugopal, K.A., Paul, S., Chattopadhyay, A.B. (2007). Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy. *Cryogenics*, 47, 12-18.
40. Koenig, W., Komanduri, R., Tonshoff, H.K., Ackershon, G. (1984). Machining of hard materials. *Ann. CIRP*, 33, 417-427.
41. Tonshoff, H.K., Arendt, C., Amor, R.B. (1993). Cutting of Hardened Steel. *Ann. CIRP*, 42, 547-566.
42. Vikram Kumar, C.H.R., Ramamoorthy, B. (2007). Performance of coated tools during hard turning under minimum fluid application. *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 210-216.
43. Nguyen, T., Zhang, L. C. (2003). An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 224-230.
44. Choi, Z., H., Lee, S., W. (2002). The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 155-158.

45. Sreejith, P. S., Ngoi, B. K. A. (2000). Dry machining: machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 287-291.
46. Wang, Z.Y., Rajurkar, K.P. (2000). Cryogenic machining of hard to cut materials. *Wear*, 239, 168-175.
47. Ke, Y., Dong, H., Liu, G., Zhang, M. (2009). Use of nitrogen gas in high speed milling of Ti-6Al-4V. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 19, 530-534.
48. Bermingham, M.J., Palanisamy, S., Kent, D., Dargusch, M.S. (2012). A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti-6Al-4V cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 752-765.
49. Haq, A.N., Tamizharasan, T. (2006). Investigation of the effects of cooling in hard turning operations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 30, 808-816.
50. Da Silva, R.B., Vieira, J.M., Cardoso, R.N., Carvalho, H.C., Costa, E.S., Machado, A.R., De Avila, R.F. (2011). Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication cooling systems. *Wear*, 271, 2459-2465.
51. Stanford M., Lister, P.M., Morgan, C., Kibble, K.A. (2009). Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using wc-co uncoated tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 961-972.
52. Sharma, V.S., Dogra, M., Suri, N.M. (2009). Cooling techniques improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 435-453.
53. Davim, J.P., Sreejith, P.S., Silva, J. (2007). Turning of brasses using minimum quantity of lubricant (MQL) and flooded lubricant conditions. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(1), 45-50.
54. Özçelik, B., Kuram, E., Çetin, M.H., Demirbaş, E. (2012). Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. *Tribology International*, 44, 1864-1871.
55. Çetin, M.H., Özçelik, B. (2011). AISI 304 çeliklerin tornalanmasında ep katkılı karma bitkisel esaslı kesme sıvılarının performansı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26 (3), 581-589.
56. Kuram, E., Özçelik, B., Bayramoğlu, M., Demirbaş, E., Şimsek, B.T. (2013). Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. *Journal of Cleaner Production*, 42, 159-166.
57. Çetin, M.H., Özçelik, B., Kuram, E., Demirbaş, E. (2011). Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 19, 2049-2056.

58. Khan, M.M.A., Mithu, M.A.H., Dhar, N.R. (2009). Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5573-5583.
59. Zhang, S., Li, J.F., Wang, Y.W. (2012). Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 32, 81-87.
60. Lawal, S.A., Choudhury, I.A., Nukman, Y. (2013). A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*, 41, 210-221.
61. Rahman, M., Kumar, S.A., Salam, M.U. (2011). Evaluation of minimal quantities of lubricant in end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18, 235-241.
62. Obikawa, T., Kamata, Y., Shinozuka, J. (2006). Highspeed Grooving with Applying MQL. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1854-1861.
63. Rahman, M., Kumar, S.A., Salam, M.U. (2002). Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 539-547.
64. De Lacalle, L.L.N., Angulo, C., Lamikiz, A., Sanchez, J.A. (2006). Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 172 (1), 11-15.
65. Diniz, A.E., Ferreira, J.R., Filho, F.T. (2003). Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 317-326.
66. Kishawy, H.A., Dumitrescu, M., Ng, E.G., Elbestawi, M.A. (2005). Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 219-227.
67. Itoigawa, F., Childs, T.H.C., Nakamura, T., Belluco, W. (2006). Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. *Wear*, 260, 339-344.
68. Ezugwu, E.O., Bonney, J., Da Silva, R.B., Çakır, O. (2007). Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 884-891.
69. Attanasio, A., Gelfi, M., Giardini, C., Remino, C. (2006). Minimal quantity lubrication in turning: effect on tool wear. *Wear*, 260, 333-338.
70. Bruni, C., Forcellese, A., Gabrielli, F., Simoncini, M. (2006). Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface

- finish and tool wear in finish turning of AISI 420b. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1547-1554.
71. Hüseyinoğlu, M. (2008). *Alüminyum Alaşımının Freze İle İşlenmesinde Minimum Soğutma Sıvısı Kullanmanın Performans Karakteristiklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
 72. De Chiffre, L., Andreasen, J.L., Lagerberg, S., Thesken, B. (2007). Performance testing of cryogenic Co₂ as cutting fluid in parting/grooving and threading austenitic stainless steel. *Annals of the CIRP*, 56 (1), 101-104.
 73. Umbrello, D., Pu, Z., Caruso, S., Outeiro, J.C., Jayal, A.D., Dillon, O.W., Jawahir, I.S. (2011). The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining. *Procedia Engineering*, 19, 371-376.
 74. Umbrello, D., Micari, F., Jawahir, I.S. (2012). The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: A comparison with dry machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 103-106.
 75. Yıldız, Y., Nalbant, M. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 947-964.
 76. Dhananchezian, M., Kumar, M.P. (2011). Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts. *Cryogenics*, 51, 34-40.
 77. Ravi, S., Kumar, P.M. (2011). Experimental investigations on cryogenics cooling by liquid nitrogen in the end milling of hardened steel. *Cryogenics*, 51, 509-515.
 78. Hong, S.Y., Ding, Y., Ekkens, R.G. (1999). Improving low carbon steel chip breakability by cryogenic chip cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 1065-1085.
 79. Paul, S., Dhar, N.R., Chattopadhyay, A.B. (2001). Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning AISI 1060 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 44-48.
 80. Hong, S.Y., Markus, I., Jeong, W. (2001). New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 2245-2260.
 81. Hong, S.Y., Ding, Y. (2001). Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 1417-1437.
 82. Dhar, N.R. (2007). Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 754-759.
 83. Pusavec, F., Kopac, J. (2011). Sustainability assessment: cryogenic machining of inconel 718. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 57 (9), 637-647.

84. Pusavec, F., Hamdi, H., Kopac, J., Jawahir, I.S. (2011). Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy - Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 773-783.
85. Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T., Imani-Asrai, R. (2012). An initial study of the effect of using liquid nitrogen coolant on the surface roughness of Inconel 718 nickel-based alloy in cnc milling. *Procedia CIRP*, 3, 121-125.
86. Jerold, B.D., Kumar, M.P. (2012). Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-di- oxide cooling. *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (10), 1059-1065.
87. Bicek, M., Dumont, F., Courbon, C., Pusavec, F., Rech, J., Kopac, J. (2012). Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2609-2618.
88. Dhananchezian, M., Kumar, M.P., Rajadurai, A. (2009). Experimental investigation of cryogenic cooling by liquid nitrogen in the orthogonal machining process. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1 (5), 55-59.
89. Ravi, S., Kumar, P. (2012). Experimental investigation of cryogenic cooling in milling of AISI D3 tool steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (10), 1017-1021.
90. Fratila, D.F., Caizar, C. (2012). Assessment of cooling effect and surface quality to face milling of AlMg₃ using several cooling lubrication methods. *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 291-296.
91. Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H. (2010). Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 50, 521-531.
92. Hadad, M.J., Tawakoli, T., Sadeghi, M.H., Sadeghi, B. (2012). Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication - MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 54-55, 10-17.
93. Hadad, M., Sadeghi, B. (2012). Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 63, 1-15.
94. Liu, J., Han, R., Zhang, L., Guo, H. (2007). Study on lubricating characteristic and tool wear with water vapor as coolant and lubricant in gren cutting. *Wear*, 262, 442-452.
95. Xavior, M.A., Adithan, M. (2009). Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 900-909.
96. Yuan, S.M., Yan, L.T., Liu, W.D., Liu, U. (2011). Effects of cooling air temperature on cryogenic machining of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 356-362.

97. Fratila, D., Caizar, C. (2012). Investigation of the influence of process parameters and cooling method on the surface quality of AISI-1045 during turning. *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (10), 1123-1128.
98. Li, K.M., Liang, S.Y. (2007). Performance profiling of minimum quantity lubrication in machining. *Int J Adv Manuf Technol.*, 35, 226-233.
99. Ezugwu, E.O., Bonney, J. (2004). Effect of high pressure coolant supply when machining nickel-base, inconel 718, alloy with coated carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 1045-1050.
100. Ezugwu, E.O., Da Silva, R.B., Bonney, J., Machado, A.R. (2005). Evaluation of the performance of cbn tools when turning ti-6al-4v alloy with high pressure coolant supplies, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1009-1014.
101. Machado, A.R., Wallbank, J., Pashby, I.R., Ezugwu, E.O. (1998). Tool performance and chip control when machining Ti6Al4V and inconel 901 using high pressure coolant supply. *Machining Science and Technology: An International Journal*, 2 (1), 1-12.
102. Courbon, C., Kramar, D., Krajnik, P., Pusavec, F., Rech, J., Kopac, J. (2009). Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: an experimental study. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 1114-1125.
103. Courbon, C., Sajn, V., Kramar, D., Rech, J., Kosel, F., Kopac, J. (2011). Investigation of machining performance in high pressure jet assisted turning of Inconel 718: a numerical model. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1834-1851.
104. Inada, A., Min, S., Ohmori, H. (2011). Micro cutting of ferrous materials using diamond tool under ionized coolant with carbon particles. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 60, 97-100.
105. Marksberry, P.W., Jawahir, I.S. (2008). A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 878-886.
106. Lacelle, L.N.L., Bilbatua, J.P., Sanchez, J.A., Llorente, J.I., Gutierrez, A., Alboniga, J. (2000). Using high pressure coolant in the drilling and turning of low machinability alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 16, 85-91.
107. An, Q.L., Fu, Y.C., Xu, J.H. (2011). Experimental study on turning of TC9 titanium alloy with cold water mist jet cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51, 549-555.
108. Tosun, N., Kuru, C., Altıntaş, E., Erdin, O.E. (2010). Hava ve geleneksel soğutma yöntemi ile frezelemede yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 25 (1), 141-146.

109. Abukhshim, N.A., P.T. Mativenga, ve M.A. Sheikh. (2006). Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (7-8), 782-800.
110. Kitagawa, T., Kubo, A., Maekawa, K. (1997). Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn. *Wear*, 202 (2), 142-148.
111. Yang, X., Liu, C.R. (2002). A new stres-based model of friction bahaivor in machining and its significant impact on residual stresses computed by finite element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 703-732.
112. Yardımoğlu, B., Kılıçaslan, C. (2011). Sürtünme modellerinin ve katsayılarının talaşlı imalatın sonlu elemanlar benzetimine etkisi. *Mühendis ve Makina*, 52 (612), 59-65.
113. Lin, J., Lee, S., Weng, C. (1992). Estimation of cutting temperature in speed machining. *ASME J. Eng. Mater. Technol.*, 114, 289-296.
114. Arndt, G., Brown, R.H. (1967). On the temperature distribution in orthogonal machining. *Int. J. Mach. Tools Des. Res.*, 7, 39-53.
115. Trent, E.M., Wright, P.K. (2000). "Metal cutting", 4th ED., *Butterworth-Heinemann*, Boston, USA, 446.
116. Lin, J. (1990). Development of the infrared pyrometer with fiber optic for measuring cutting temperature at high speed cutting. *Monit. Control Manuf. Process*, 44, 17-32.
117. Al Huda, M., Yamada, K., Hosokawan, A., Ueda, T. (2002). Investigation of temperature at tool-chip interface in turning using two-color pyrometer. *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 200.
118. Carvalho, S.R., Lima e Silva, S.M.M., Machado, A.R., Guimaraes, G. (2006). Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder. *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 97-104.
119. Radulescu, R., Kapoor, S.G. (1994). An analytical model for prediction of tool temperature-fields during continuous and interrupted cutting. *J. Eng. Ind.*, 116, 135-143.
120. Tay, A.A.O. (1993). A review of methods of calculating machining temperature. *J. Mater. Process. Technol.* 36, 225-257.
121. Jen, T.C., Gutierrez, G. (2000). Numerical heat transfer analysis in transient cutting tool temperatures. *Proceedings of the 34th National Heat Transfer Conference*, 34 Pittsburgh/Pennsylvania.
122. Stephenson, D.A., Jen, T.C., Lavine, A.S. (1997). Cutting tool temperatures in contour turning: transient analysis and experimental verification. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 119, 494-501.

123. Shet, C., Deng, X. (2000). Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process. *J. Mater. Process. Technol.*, 105, 95-109.
124. Lazoglu, I., Altintas, Y. (2002). Prediction of tool chip temperature in continuous and interrupted machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 42, 1011-1022.
125. Ren, X.J., Yang, Q.X., James, R.D., Wang, L. (2004). Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling. *J. Mater. Process. Technol.* 147, 38-44.
126. Singamneni, S.B. (2005). A mixed solution for the three-dimensional temperature distribution in turning inserts using finite and boundary element techniques. *J. Mater. Process. Technol.*, 166, 98-106.
127. Chen, M., Sun, F.H., Wang, H.L., Yuan, R.W., Qu, Z.H. (2003). Experimental research on the dynamic characteristics of the cutting temperature in the process of high speed milling. *J. Mater. Process. Technol.* 138, 468-471.
128. Liang, L., Xu, H., Ke, Z. (2013). An improved three-dimensional inverse heat conduction procedure to determine the tool-chip interface temperature in dry turning. *International Journal of Thermal Sciences*, 64, 152-161.
129. Melo, A.C.A., Guimarães, G., Machado, A.R. (1999). Evaluation of the behavior of estimated cutting temperature with the main machining parameter using inverse heat conduction. *Proceedings of the Behavior of Materials on Machining: Opportunities and Prospects for Improved Operations*, London, UK, 311-320.
130. Yen, D.W., Wright, P.K. (1986). A remote temperature sensing technique for estimating the cutting interface temperature distribution. *J. Eng. Ind.*, 108, 252-263.
131. Lin, J. (1995). Inverse estimation of the tool-work interface temperature in end milling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 35, 751-760.
132. Kwon, P., Shiemann, T., Kountanya, R. (2001). An inverse estimation scheme to measure steady-state tool-chip interface temperatures using an infrared camera. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1015-1030.
133. Cheng, H.H., Li, C.J., Rui, L., Albert, J.S. (2007). A three-dimensional inverse problem in estimating the applied heat flux of a titanium drilling-theoretical and experimental studies. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50, 3265-3332.
134. Liang, L., Quan, Y. (2013). Investigation of heat partition in dry turning assisted by heat pipe cooling. *Int J Adv Manuf Technol*, 66 (9-12), 1931-1941.
135. Kusiak, A., Battaglia, J., Marchal, R. (2005). Influence of CrN coating in wood machining from heat flux estimation in the tool. *Int. J. Thermal Sci.*, 44, 289-301.

136. Lima, F.R.S., Machado, A.R., Guimaraes, G. (2001). Experimental heat flux and cutting temperature estimation. *in: Proceedings of the Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining*, Metz, 1, 25–34.
137. Chen, W.C., Tsao, C.C., Liang, P.W. (1997). Determination of temperature distributions on the rake face of cutting tools using a remote method. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 24, 161–170.
138. Beck, J.V., Blackwell, B., Clair, C.R. (1985). Inverse heat conduction ill-posed problems. *Wiley Interscience Publication*, New York.
139. Odabaşı, A. (2010). *Süper Alaşımların Karbondioksit Lazer Kaynak Şartlarının Optimizasyonu*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-130.
140. Altın, A. (2005). *Nikel Esaslı Inconel 718 Süper Alaşımının İşlenebilirliğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-207.
141. Erdem, M. (2007). *Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Ni Esaslı Bir Süperalaşımın Üretilmesi Ve Mikro Yapı, Mekanik Ve Oksitlenme Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-201.
142. Bradley, E.F. (1988). Superalloys: A technical guide. *ASM International, Materials Park, Ohio, USA*.
143. Sims, C.T., Hagel, W. C. (1972). The Superalloys. *John Wiley & Sons*, New York, NY, USA.
144. Motorcu, A.R. (2009). Nikel esaslı süperalaşımların ve titanyum alaşımlarının işlenebilirliği 1. bölüm: sinterlenmiş karbür takımların performanslarının değerlendirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25 (1-2), 302-330.
145. Tyler, D.E., Black, W.T. (1990). Metals handbook, 10th edition. *ASM International, Materials Park*, 2, 216.
146. Arunachalam, R., Mannan, M. A. (2000). Machinability of nickel-based high temperature alloys. *Machining Science and Technology*, 4(1), 127-168.
147. Brandt, G., Gerendas, A., Mikus, M.W. (1990). Car mechanics of ceramic cutting tools when machining ferrous and non-ferrous alloys, *J. European Ceramic Soc.*, 6(5), 273-290.
148. Kaçal, Y. (2008). *Azdırma Freze Çakılarında Kesme Kuvvetlerinin Ve Takım Aşınmasının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-186.
149. Pul, M. (2010). *Al Matrisli Mgo Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi Ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-191.

150. Akkurt, M. (1992). Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgâhları. *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
151. Sur, G. (2008). *Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler Ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-242.
152. Groover, M.P. (1996). Fundamentals of modern manufacturing. *Prentice-Hall Inc.*, 251–260, 430–639.
153. Zhang, J.H. (1991). Theory and technique of precision cutting, *Pergamon Press*, Oxford, 1-50.
154. Günay, M. (2009). *Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmiş Al-Si/Sicp Kompozitlerin Mekanik Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-209.
155. Kalpakjian, S., Schmid, S. R. (2010). Manufacturing processes for engineering materials. *Pearson Education*, New York, USA.
156. Çakır, M.C. (2006). Modern talaşlı imalatın esasları 1. Bölüm. *Nobel yayın dağıtım*. Ankara.
157. Trent, E.M. (1989). Metal cutting. *Butterworths Press*, London, 1-171.
158. Sandvik Coromant. (2008). Turning Catalog. *Sandvik Coromant*, Sweden, 8-300.
159. ISO 3685. (1993). Tool-life testing with single-point turning tools, *ISO Standart*, 1-12.
160. Patankar, S.V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. *Hemisphere Publishing Corporation*, USA.
161. Sandvik Coromant. (2009). Carbide comparison H13A-HM-H10F. *Sandvik unpublished internal report*.
162. ThyssenKrupp Materials, accessed February 06/2013. Web: www.onlinemetals.com
163. Remacle, J.F. (2013). Difisek: Research fund for coal and steel”, accessed February 06/2013 Web: www.infosteel.be/difisekPlus/04_Partie2_Transfert_thermique_JFR.pdf
164. Davis, J.R., Davis & Associates. (2000). Nickel, cobalt, and their alloys. *ASM Specialty Handbook*.
165. Mfield (1968). Machining aerascope alloys. *Iron and Steel Institute*, Special Report 94, 15, 1-160.
166. Şeker, U. (2008). Takım tasarımı. *Gazi Üniversitesi Ders Notları*, Ankara.

167. König, W., Gerschwiler, K. (1994). Machining nickel-based super alloys with PCBN and ceramic tools. *Report to CIRP STC "C"*.
168. Çiftçi, İ., Türker, M., Seker, U., (2004). CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs. *Wear*, 1041-1046.
169. Özçatalbas, Y., Ercan, F. (2003). The effects of heat treatment on the machinability of mild steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 136 (1-3), 227-238.
170. Ezugwu, E. O., Wang, Z. M. (1996). Performance of PVD and CVD coated tools when nickel-based machining Inconel 718 alloy. *IN: N.Narutaki et al. Progress of Cutting and Grinding*, 111, 102-107.
171. Wang, Z. M. (1997). Ph.D Thesis, *South Bank University*, London, 78-79.
172. Ezugwu, E. O., Machado, A. R. (1988). Face milling of aerospace material. *Proceedings of the 1st Int. Conf. on Behaviour of Materials in Machining*, Stratford-Upon-Avon, England, 3.1-3.11.
173. Kaynak, Y., Karaca, H.E., Noebe, R.D., Jawahir, I.S. (2013). Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. *Wear*, 306, 51-63.
174. Sandvik Coromant, (1994). Modern metal cutting—A practical handbook. English Edition, *Sandvik Coromant*, Sweden, I-III.
175. Cantero, J.L., Diaz-Alvarez, J., Miguelez, M.H., Marin, N.C. (2013). Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718, *Wear*, 297, 885-894.
176. Kramer, B. M., Hartung, P. D. (1980). Proc. Int. Conf. Of Cutting Tool Mat. *Fort Mitchell*, 57-74.
177. Çiftçi, İ. (2007). AISI 304 ostenitik paslanmaz çeliğin kaplanmış sementit karbür kesici takımla işlenmesi esnasında oluşan takım aşınması. *Teknoloji*, 7(3), 89-95.
178. Özçatalbaş, Y. (2003). Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al4C3-Al composites. *Materials and Design*, 24, 215–221.
179. Venugopal K.A., et al. (2007). Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. *Wear*, 262, 1071-1078.
180. Çiftçi, İ. (2003). *Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı Ve Boyutunun Mekanik Özellikler Ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-90.
181. El-Gallab, M., Sklad, M. (2000). Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites, Part III: Comprehensive tool wear models. *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 10–20.

182. Çiftçi, İ., Türker, M., Şeker, U. (2004). Evaluation of tool wear when machining SiCp reinforced Al-2014 alloy matrix composites. *Materials and Design*, 25, 251-255.
183. Gökkaya H., Sur, G., Dilipak, H. (2004). PVD ve CVD kaplamalı sementit karbür kesici takımların işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Karabük Üniversitesi Teknoloji Dergisi*, 7 (3): 473-478.
184. Shaw, M.C. (1989). Metal cutting principles. *Oxford University Press*, Oxford, 1-9.
185. Garmo, De E.P., Black, J.T., Kohser, R.A. (1997). Materials and processes in manufacturing, *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, 214-652.
186. Şahin, Y. (2000). Talaş kaldırma prensipleri I. *Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti.*, Ankara.
187. Lalwani, D. M. (2008). Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (1-3), 167-179.
188. Bawa H.S. (1995). Workshop technology. *Technological Education Series, Vol. II Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd.*, New Delhi.
189. Habalı, K., Gökkaya, H. (2005). Kaplamasız sementit karbür kesici takımlarda takım-talaş ara yüzey sıcaklığının deneysel olarak araştırılması. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 115-121.
190. Özçelik, B., Demirbaş, E., Bayramoğlu, M., Kobya, M. (2010). Bitkisel yağ esaslı metal işleme sıvısının geliştirilmesi ve talaşlı imalatıta uygulaması. *TÜBİTAK 107M164 Nolu Proje*, Ankara.
191. Çetin, M.H. (2010). *Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Tornalamadaki Performansının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
192. Isık, A. (2006). Uygulamalı istatistik II. *Beta Basım Yayın*, İstanbul, 5-100.
193. Ross, R. P. (1988). Taguchi techniques for quality engineering-loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. *Mc Graw-Hill*, 102-179.
194. Akkuş, H. (2010). *Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel Ve Yapay Zeka Yöntemleriyle Tahmin Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
195. Biçkici, B. (2007). *Çok Değişkenli Varyans Analizi Ve Çoklu Doğrusal Regresyon Analizinin Uygulamalı Olarak Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
196. Boothroyd, G. (1981). Fundamentals of metal machining and machine tools. *International Student ed. 5th Printing, McGraw-Hill*, New York.
197. Shaw, M. C. (1984). Metal cutting principles, *Oxford University Press*, London, 594.

198. Trent, E. M. (1988). Metal cutting and the tribology of seizure: I. seizure in metal cutting. *Wear*, 128, 29-45.

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SARIKAYA, Murat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.10.1984 - Kaman
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (368) 271 57 42 / 6633
 Faks : 0 (368) 271 57 40
 e-posta : msarikaya@sinop.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Eğt. Böl.	2010
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Eğt. Böl.	2006
Lise	Kırıkkale Teknik Lisesi / CNC Bölümü	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006 - 2008	Kırıkkale Üniversitesi	İdari Personel
2008 – Halen	Sinop Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI, SCI-Expanded, SSCI, AHCI tarafından taranan bilimsel dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Sarıkaya, M., Güllü, A. (2014). Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *Journal of Cleaner Production*, 65, 604-616.
2. Sarıkaya, M., Dilipak, H., Gezgin, A. Optimization of process parameters for surface roughness and tool life in face milling using the Taguchi analysis, *Materials and Technology*, accepted, 2015 / 2.

3. Dilipak, H., Özdemir, M., Sarıkaya, M. (2013). Effect of material properties and punch tip radius on spring-forward in 90° bending processes. *International journal of Iron and Steel Research*, 20 (10), 64-69.

Engineering Index tarafından taranan dergilerde yayınlanan makaleler:

1. Sarıkaya, M. Güllü, A. Analysis of Process Parameters in Turning of Cobalt-Based Super Alloy Haynes 25 / L 605 using Design of Experiment, Solid State Phonema, Accepted for publication.
2. Yavuz, C., Sarıkaya, M., Yılmaz, S., Kaya, M. (2012). Taguchi method based evaluation of process parameters effects on system performance in the computer controlled cold-hot therapy device with thermoelectric module. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, Volume (issues) Special Issue: 491-502.

Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan makaleler:

1. Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H. (2011). Delik delme uygulamalarında delik kalitesinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 52 (619), 42-49.
2. Meral, G., Dilipak, H., Sarıkaya, M. (2011). Modeling with regression methods of the thrust forces and the surface roughness in the drilling of AISI 1050 material. *Tubav Journal of Science*, 4 (1), 31-41.
3. Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H. (2011). Delme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27.
4. Meral, G., Dilipak, H., Sarıkaya, M. (2011). The modeling of drilling parameters effect on the hole quality in drilling of aisi 1050 material via multiple regression method. *Electronic Journal of Machine Technologies*, 8 (1), 37 – 46.
5. Sarıkaya, M., Güllü, A., Seyman, M.N. (2009). Meslek yüksekokullarında iş sağlığı ve güvenliği eğitimi verilmesinin önemi. *Tubav Bilim Dergisi*, 3 (2), 386-391.
6. Güllü, A., Sarıkaya, M. (2009). İş hayatına yeni başlayacak olan gençlerin iş sağlığı ve güvenliğine bakışı. *İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 43 (9).
7. Yılmaz, V. Dilipak, H. Sarıkaya, M. Yılmaz, C.Y., Meral, G. (2014). Frezeleme işlemlerinde titreşimi ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerin optimizasyonu. *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 4(1), 37-44.

Uluslararası Bildiriler:

1. Sarıkaya, M. Gullu, A. (2013). Analysis of process parameters in turning of cobalt-based super alloy Haynes 25 / L 605 using design of experiment. *The 9th International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM-2013*, 1-3 July, Vilnius, Litvanya.
2. Sarıkaya, M., Demir, Ö., Balki MK (2010). Chassis and body design for solar powered car. *5th International Ege Energy Symposium and Exhibition*, 27-30 June, Denizli-Türkiye.

Projeler

1. “Kobalt Esaslı Haynes 25 Süper Alaşımının Tornada İşlenebilirliğinin Araştırılması ve İşleme Verimini Arttırmak İçin Soğutma Tekniklerinin Geliştirilmesi”, **TÜBİTAK**, Ankara.
Proje Kodu: 112M029
Proje Yöneticisi: Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ
Projedeki Görevi: Bursiyer

Hobiler

Futbol, Voleybol, Bilgisayar teknolojileri



GAZİ GELECEKTİR..