



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HARDOX ÇELİĞİNİN KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ
KESİCİ TAKIMLARLA FREZELENMESİ**

Lokman GÜN

**Ocak-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HARDOX ÇELİĞİNİN KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ
KESİCİ TAKIMLARLA FREZELENMESİ**

Lokman GÜN

**Danışman
Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Prof. Dr. Hakan DİLİPAK

**Ocak-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Lokman GÜN tarafından hazırlanan “Hardox Çeliğinin Kriyojenik İşlem Uygulanmış Kesici Takımlarla Frezelenmesi” adlı tez çalışması 23/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

.....

Danışman

Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

.....

Üye

Prof. Dr. Hakan DİLİPAK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Lokman GÜN
Tarih: 23.01.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARDOX ÇELİĞİNİN KRIYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ KESİCİ TAKIMLARLA FREZELENMESİ

Lokman GÜN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2025, 54 Sayfa

Bu çalışmada, Hardox 450 çeliğinin kuru frezeleme işlemi sırasında farklı kesme parametreleri altında kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kesici takımların performansı deneysel olarak incelenmiştir. Kesici takımlara, 24 saat süreyle -196 °C sıcaklığında kriyojenik işlem uygulanmıştır ve ardından 2 saat süreyle 200 °C’de temperleme işlemi yapılmıştır. Frezeleme deneyleri, dört farklı ilerleme (0,03 – 0,06 – 0,09 ve 0,12 mm/diş), dört farklı kesme hızı (30 – 50 – 70 ve 90 m/dk) ve sabit kesme derinliği (1,2 mm) ile gerçekleştirilmiştir. Kesici takım aşınma testleri ise 0,12 mm/diş ilerleme, 90 m/dk kesme hızı ve 1,2 mm kesme derinliği parametrelerinde yapılmıştır. Deneyler sırasında Hardox 450 çeliğinin frezelenmesi üzerinde kriyojenik işlemin ve farklı kesme parametrelerinin etkilerini değerlendirebilmek için yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri, talaş morfolojisi, kesici takım aşınması ve mikrosertlik değerleri detaylı olarak incelenmiştir. Frezeleme deneylerinde ilerleme hızının artışıyla birlikte, esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı, buna karşılık kesme hızının artışıyla esas kesme kuvvetinin azaldığı, ancak yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Talaş kaldırma sırasında oluşan talaş türleri incelendiğinde, düşük kesme parametrelerinde süresiz talaşların (C tipi), yüksek kesme parametrelerinde ise yarı sürekli talaşların olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın genel bulguları, kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımların takım aşınması, esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha düşük değerler sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, kriyojenik işlemin kesici takım mikrosertlik değerini %9 oranında artırdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hardox 450, Frezeleme, Kriyojenik İşlem, Kesme Parametreleri, Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Aşınması, Esas Kesme Kuvveti, Mikrosertlik

ABSTRACT
MASTER THESIS
MILLING OF HARDOX STEEL WITH CRYGENIC PROCESSED
CUTTING TOOLS

Lokman GÜN

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2025, 54 Pages

In this study, the performance of cryogenically treated and untreated cutting tools was experimentally investigated during the dry milling process of Hardox 450 steel under different cutting parameters. Cutting tools were cryogenically treated at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 24 hours and then tempered at $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 2 hours. Milling experiments were conducted using four different feed rates (0.03, 0.06, 0.09, and 0.12 mm/tooth), four different cutting speeds (30, 50, 70, and 90 m/min), and constant depth of cut (1.2 mm). Cutting tool wear tests were performed under the parameters of a 0.12 mm/tooth feed rate, 90 m/min cutting speed, and 1.2 mm depth of cut. During the experiments, the effects of cryogenic treatment and various cutting parameters on the milling of Hardox 450 steel were evaluated by analyzing surface roughness, cutting forces, chip morphology, cutting tool wear and microhardness values in detail. The results revealed that an increase in feed rate led to higher main cutting forces and surface roughness, while an increase in cutting speed resulted in lower main cutting forces but higher surface roughness. Examination of chip formation indicated that discontinuous chips (C-type) were produced at lower cutting parameters, whereas semi-continuous chips were observed at higher cutting parameters. The overall findings demonstrated that cryogenically treated cutting tools exhibited lower cutting tool wear, main cutting forces, and surface roughness compared to untreated tools. Additionally, the cryogenic treatment was found to enhance the microhardness of the cutting tool by 9%.

Keywords: Hardox 450, Milling, Cryogenic Treatment, Cutting Parameters, Surface Roughness, Tool Wear, Main Cutting Force, Micro Hardness

ÖN SÖZ

“Hardox Çeliğinin Kriyojenik İşlem Uygulanmış Kesici Takımlarla Frezelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezi, toplamda altı ana bölümden oluşmaktadır: 1. bölüm Giriş, 2. bölüm Literatür Araştırması, 3. bölüm Genel Bilgiler, 4. bölüm Materyal ve Yöntem, 5. bölüm Araştırma Sonuçları ve Tartışma ile 6. bölüm Sonuçlar ve Öneriler.

Giriş bölümünde; Hardox 450 çelikleri, kriyojenik işlemler ve frezeleme işlemleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Literatür Araştırması bölümünde, bu çalışma ile ilgili daha önce yapılmış bilimsel araştırmalara yer verilerek, konunun mevcut bilgi birikimi içindeki yeri özetlenmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde; deneylerde kullanılan Hardox 450 çeliğinin özellikleri, kriyojenik ve temperleme işlemlerinin uygulanma süreçleri, deneylerde kullanılan kesici takımlar ve deney parametreleri ile birlikte, kullanılan tezgâh ve cihazlar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Araştırma ve Tartışma bölümünde ise yapılan deneylerden elde edilen veriler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda; yüzey pürüzlülük değerleri, esas kesme kuvvetleri, talaş morfolojisi ve kesici takım aşınması analiz edilmiştir. Ayrıca, kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kesici takımların mikrosertlik değerleri ile kesici takım ve talaşlara ait SEM ve EDS analizleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar ve Öneriler bölümünde, çalışma kapsamında elde edilen bulgulara yer verilmiş ve ileride yapılacak araştırmalar için öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışmam süresince, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ’e; çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Şehmus BADAY’a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yaşamımın her anında yanımda olan, bana maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen sevgili babam Sabri GÜN, değerli annem Türkiye GÜN ve biricik eşim Gülsüm GÜN’e sonsuz minnet ve sevgilerimi ifade etmek isterim.

Lokman GÜN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTARATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kriyojenik İşleme İlgili Yapılan Araştırmalar	3
2.2. Hardox Çeliğinin Frezelenmesi ile İlgili Yapılan Araştırmalar	7
3. GENEL BİLGİLER.....	11
3.1. Hardox Aşınma Çelikleri	11
3.1.1. Hardox çelik türleri	11
3.1.1.1. Hardox 400 çeliği.....	11
3.1.1.2. Hardox 450 çeliği.....	11
3.1.1.3. Hardox 500 çeliği.....	12
3.1.1.4. Hardox 600 çeliği.....	12
3.1.1.5. Hardox hituf çeliği	12
3.2. Frezeleme	12
3.2.1. Frezeleme çeşitleri	13
3.2.1.1. Alın frezeleme.....	13
3.2.1.2. Çevresel frezeleme	14
3.2.2. Frezeleme işlemlerinde kesme parametreleri.....	15
3.2.2.1. İlerleme hızı	15
3.2.2.2. Kesme hızı.....	15
3.2.2.3. Talaş derinliği	16
3.2.3. Frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetleri.....	16
3.2.4. Frezeleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü	17
3.2.5. Frezeleme işlemlerinde talaş kaldırma ve takım aşınması.....	18
3.3. Kriyojenik İşlem	19
3.3.1. Kriyojenik işlemin etkinliğine etki eden parametreler.....	20
3.3.1.1. Isıl işlem sıcaklığı	20
3.3.1.2. Isıl işlemin soğutma hızı	20
3.3.1.3. Kriyojenik ısıtıl işlemin uygulanma şekli	21
3.3.2. Kriyojenik işlemin etkileri	21
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22

4.1. İş Parçası Malzemesi.....	22
4.2. Kesici Takımlar ve Takım Tutucu	22
4.3. Takım Tezgâhı	23
4.4. Kriyojenik İşlem Uygulanması	24
4.5. Kesme Parametreleri	25
4.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	26
4.7. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü	27
4.8. Mikrosertlik Ölçümü	29
4.9. Kesici Takımlardaki Aşınma Tespiti	30
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	31
5.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi.....	31
5.2. Esas Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	34
5.3. Kesici Takım Aşınmasının Değerlendirilmesi	37
5.4. Mikrosertlik Analizi	41
5.5. Talaş Morfolojisinin Değerlendirilmesi.....	42
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
6.1. Sonuçlar	47
6.2. Öneriler	48
KAYNAKLAR	49

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 4. 1. Hordox 450 çeliğinin % kimyasal element bileşimi.....	22
Tablo 4. 2. Hartford CNC freze tezgahının özellikleri.....	24
Tablo 4. 3. İş Parçalarının işleme parametreleri	25
Tablo 4. 4. Frezeleme işlemlerinin deney şeması	26

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3. 1. a) Dikey Freze Tezgâhı, b) Yatay Freze Tezgâhı (Anonim, 2024).....	13
Şekil 3. 2. a) Çevresel Frezeleme, b) Alın Frezeleme (Groover, 2010)	13
Şekil 3. 3. Alın Frezeleme Biçimleri (Groover, 2010)	14
Şekil 3. 4. Çevresel Frezeleme Biçimleri (Groover, 2010)	14
Şekil 3. 5. Kesme hızına etki eden faktörler (Çakır, 2000)	16
Şekil 3. 6. Frezelemede kesici takım üzerinde oluşan kuvvetler (Çakır, 2000)	17
Şekil 3. 7. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan temel faktörler (Benardos ve Vosniakos, 2003)	18
Şekil 3. 8. Kesici takımlarda meydana gelen deformasyon bölgeleri (Davim vd., 2008)	19
Şekil 3. 9. Kriyojenik ısıtıl işlemin kontrollü olarak uygulanması (Akıncıoğlu ark., 2015)	21
Şekil 4. 1. Kesici takım ucunun görüntüsü ve geometrik ölçüleri.....	22
Şekil 4. 2. Takım tutucu.....	23
Şekil 4. 3. Hartford CNC freze tezgâhının iç görünümü	23
Şekil 4. 4. Hartford CNC freze tezgâhı dış görünüm	24
Şekil 4. 5. Kriyojenik ısıtıl işlemin kesici takımlara uygulanması	25
Şekil 4. 6. Yüzey ölçüm cihazı	27
Şekil 4. 7. İş parçası üzerinde yüzey pürüzlülük ölçümü	27
Şekil 4. 8. İş parçasının KISTLER marka dinamometreye bağlanma şekli	28
Şekil 4. 9. KISTLER KST 5070B model sinyal güçlendirici.....	28
Şekil 4. 10. Kuvvet ölçüm cihazı kablo bağlantıları.....	29
Şekil 4. 11. Kuvvet ölçüm cihazına bağlı bilgisayar	29
Şekil 4. 12. Sertlik ölçme cihazı	30
Şekil 4. 13. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	30
Şekil 5. 1. Farklı ilerleme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri	32
Şekil 5. 2. Farklı kesme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri ..	33
Şekil 5. 3. Farklı ilerleme hızlarında elde edilen esas kesme kuvvetlerinin değişim grafikleri.....	35
Şekil 5. 4. Farklı kesme hızlarında elde edilen esas kesme kuvvetlerinin değişim grafikleri.....	36
Şekil 5. 5. İş parçasının $V=90$ m/dk, $f_z=0,12$ mm/diş ve $a=1,2$ mm parametreleri ile 4301 mm ³ hacminde talaş kaldırılması sonucu kesici takımlarda oluşan aşınmanın SEM mikroskopu altındaki görüntüleri a) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım b) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım	37
Şekil 5. 6. Kesici takım aşınma deneylerinde kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takıma uygulanan EDS analiz yeri ve sonuçları	39
Şekil 5. 7. Kesici takım aşınma deneylerinde kriyojenik işlem uygulanmış kesici takıma uygulanan EDS analiz yeri ve sonuçları	40
Şekil 5. 8. Kesici takımların mikrosertlik değerleri.....	41
Şekil 5. 9. İş parçasının $V=30$ m/dk, $f_z=0,03$ mm/diş ve $a_p=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşlar a) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu	42

Şekil 5. 10. İş parçasının $V= 90$ m/dk, $f_z= 0,12$ mm/diş ve $a_p=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşlar a) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu	42
Şekil 5. 11. İş parçasının $f_z= 0,03$ mm/diş, $V= 30$ m/dk ve $a_p=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların SEM görüntüleri a) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu	43
Şekil 5. 12. İş parçasının $f_z= 0,12$ mm/diş, $V= 90$ m/dk ve $a=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların SEM görüntüleri a) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu	44
Şekil 5. 13. İş parçasının kriyojenik işlem uygulanmamış takım ile, $f_z= 0,03$ mm/diş, $V= 30$ m/dk ve $a_p=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların EDS analiz yeri ve sonuçları.....	45
Şekil 5. 14. İş parçasının kriyojenik işlem uygulanmış takım ile, $f_z= 0,03$ mm/diş, $V= 30$ m/dk ve $a_p=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların EDS analiz yeri	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
ap	: Kesme derinliği
B	: Bor
C	: Krom
Fc	: Esas kesme kuvveti
Ff	: İlerleme kuvveti
Fr	: Radyal kuvvet
fz	: İlerleme hızı
Mo	: Molibden
MoS ₂	: Molibden Disülfid
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülük
Rt	: En düşük ve en yüksek noktalar arasındaki fark
Rq	:Yüzey pürüzlülük değerlerinin karesel ortalamalarının karekök değeri
Rz	: Profil yüzeyindeki en yüksek ve en derin noktalar arası mesafe
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
TiAlCN	: Titanyum alüminyum karbonitrür
TiAlN	: Titanyum alüminyum nitrür
TiAlSiN	: Titanyum alüminyum silikon nitrür
TiN	: Titanyum nitrür
Ti6Al4V	: Titanyum, alüminyum, vanatyum Alaşımı
TiSiN	: Titanyum silikon nitrür
WC-Co	: Tungsten karbür - kobalt
µm	: Mikrometre

Kısaltmalar	Açıklama
SSAB	: Swedish Steel AB
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
BUE	: Kesici takımın kesme yüzeyinde biriken ve yapışan malzeme parçacıkları
CNC	: Bilgisayar Sayımlı Denetim
K	: Kriyojenik işlem görmüş kesici takım
ML	: Minimum Miktarda Yağlama
ML	: Minimum Miktarda Soğutma Yağlaması
NF-ML	: Azaltılmış miktarda çok katmanlı grafen bazlı nano akışkan
NK	: Kriyojenik işlem görmemiş kesici takım
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme

1. GİRİŞ

Talaşlı imalatla işlenmesi zor olan iş parçalarının uygun işleme parametrelerinde şekillendirilmesi oldukça önemlidir. İşlenmesi zor olan iş parçaları arasında Hardox çeliklerde yer almaktadır. Hardox çelikleri temperlenmiş martenzit mikroyapısı sayesinde yüksek sertlik ve aşınma direnci yanı sıra yüksek mukavemet ve süneklik özelliğine sahiptir (Emre, 2019). Hardox çeliğinin sahip olduğu yüksek sertlik, piyasadaki diğer çeliklere oranla onu aşınmaya karşı daha dirençli yapmaktadır. Ayrıca yüksek tokluğu sayesinde düşük sıcaklıklarda oluşan aşırı zorlamalardan etkilenmez (Yılmaz, 2010). Bu özellikleri aşırı aşınma ve darbelere maruz kalan uygulamalarda onu dayanıklı yapmaktadır. Böylelikle kullanıldığı alanlarda kullanım süresini arttırmakta ve bakım maliyetlerini düşürmektedir. Yüksek mukavemeti, aşırı yüklerde bile malzemede şekil değişimi ve çatlak oluşumunu engeller. Bu özellikleri nedeniyle kamyon kasası, madencilik ekipmanları, öğütme ve kırma makinaları gibi birçok alanda ve ayrıca aşınmaya maruz kalan kaplamalar, huniler vd. gibi birçok alanda da kullanılmaktadır. Hardox çeliği uygun maliyetli, uzun ömürlü ve dayanıklı ürünler oluşturmak isteyen endüstrilerde tercih nedenidir (Eksilmez vd., 2022; Emre, 2019). İşlenmesi zor olan iş parçalarının frezelenmesinde uygun kesme parametreleri ve kesici takım seçimi oldukça önemlidir. Uygun seçilemeyen işleme parametreleri yüksek kesme kuvvetlerine, istenmeyen yüzey pürüzlülük değerlerine ve kesici takım aşınmalarına sebep olmaktadır. Kesici takıma yüksek tokluk ve sertlik vermesi için son yıllarda kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmaktadır.

Kriyojenik ısıtma işlemi, malzemelere uygulanan tamamlayıcı bir ısıtma işlemi türüdür. Isıtma fırınında iş parçasına uygulanan kriyojenik işlem, sabit soğutma hızında aşamalı olarak çok düşük sıcaklıklara getirildikten sonra belli bir süre bekletilir. Sonra tekrar sabit ısıtma hızında oda sıcaklığına getirilir. Bu işlem soğuk işlem veya sıfır altı işlem adı da verilmektedir (Kıvak ve Şeker, 2015). Soğutma hızı, süresi, sıcaklığı ve tavlama işlemi kriyojenik işlemin verimliliği üzerinde önemli etken arasında yer almaktadır (Kurşuncu, 2020; Molinari vd., 2001; Vardhan vd., 2017). Kriyojenik işlem için uygulanan sıcaklığa göre -140 °C ve -196 °C arası derin, -80 °C ve -140 °C arası sığ kriyojenik işlem olarak isimlendirilir (Akıncıoğlu ve vd., 2015; Vardhan vd., 2017). Yapılan kriyojenik işlem, kesici takımların mikroyapısında östenit fazların martenzit faza dönüşmesini sağlar.

Böylelikle kesici takımında tokluk, sertlik ve aşınma direnci geliştirir (Gill vd., 2012; Kurşuncu vd., 2018; Mukkoti vd., 2018).

Frezeleme, geniş uygulama alanına sahip çok yönlü modern talaşlı imalat işlemidir. Üretim sürelerinin ve maliyetlerin azalması amacıyla kesici takımlar ve takım tezgâhları sürekli gelişim halindedir. Yüksek ilerlemeli kesici takımlar ara işleme işlemlerini azaltır. İşlenen parçanın istenilen toleranslarda olmasını sağlar. Ayrıca yüksek ilerlemeli kesici takımlar, son frezeleme işleminin verimliliğini arttırmaktadır (Coelho vd., 2009). Kesme parametreleri, iş parçası malzemesi ve tezgâhın özellikleri üretimin kalitesini etkileyen durumlardır. Kesici takım geometrisi, ilerleme hızı, kesme derinliği, kesme hızı ve işlenen malzeme, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkilidir (Demir vd., 2009). Hardox 450 çeliklerinin sahip olmuş oldukları yüksek aşınma dirençleri bu çeliklerin işlenmesini ve şekillendirmesini zorlaştırır ve bu da işleme parametrelerinin seçiminde daha fazla karmaşıklığa neden olmaktadır (Passari vd., 2022).

Frezeleme işlemlerinde en sık incelenen deneysel sonuçlar arasında kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, talaş morfolojisi ve kesici takım aşınması yer almaktadır. Bu deneysel sonuçlar, işleme maliyetleri üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalar, kriyojenik ısıl işlemin frezeleme süreçlerinde elde edilen deneysel sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. İşlenmesi zor olan yüksek aşınma direncine sahip Hardox 450 çeliğinin işlenmesinde kesici takımlara uygulanan kriyojenik ısıl işlemin katkıları olacağı düşünülmektedir. Bu deneysel tez çalışmasında, Hardox 450 çeliğinin işlenmesinde maliyetleri düşürmek ve işleme performansını artırmak amacıyla kesme parametreleri ve kriyojenik işlemin deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerini incelemek ve en uygun işleme parametrelerini belirlemektir. Bu amaçla, kriyojenik ısıl işlem görmüş kesici takımlar kullanılarak belirlenen kesme parametrelerine göre Hardox 450 çeliği üzerinde frezeleme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde, kriyojenik işlem görmüş kesici takımların yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri, talaş morfolojisi ve kesici takım aşınması üzerindeki etkileri detaylı olarak araştırılmıştır.

2. LİTARATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kriyojenik İşleme İlgili Yapılan Araştırmalar

Babu vd., (2024). TiAlSiN kaplı kesici takımlara derin ve sığ kriyojenik işlem uygulayarak C300 maraging çeliği üzerinde frezeleme deneyleri yapmışlardır. Kesici takımların bir kısmına 6 saat süreyle -145 °C’ de sığ kriyojenik işlem, diğer takımlara ise 24 süreyle -196 °C’ de derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. Kesme parametreleri olarak dört farklı iş mili hızı (1000, 2000, 3000 ve 4000 rpm), sabit ilerleme hızı (320 mm/dk) ve kesme derinliği (0,2 mm) seçmişlerdir. Sığ kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımın mikrosertlik değerinin diğer kesici takımlara oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca sığ kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünün, takım aşınmasının ve BUE oluşumunun daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Gürbüz ve Baday (2021), kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımlarla Inconel 718 iş parçası üzerinde frezeleme deneyleri yapmışlardır. Kesici takımlara, 24 saat süreyle -148°C’de sığ kriyojenik işlem uygulandıktan sonra, iki kez 2 saat süreyle 200°C’de temperleme işlemi yapmışlardır. Kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımların mikrosertlik değerlerinin diğer kesici takımlara oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla yapılan deneylerde, tüm işleme şartlarında kesme kuvvetlerinin, yüzey pürüzlülüğünün, takım aşınmasının ve titreşim değerlerinin düşük olduğunu ve BUE oluşumunun meydana gelmediğini tespit etmişlerdir.

Çelik vd. (2018), kaplanmış ve kaplanmamış sementite karbür (WC-Co) kesici takımlara kriyojenik işlem uygulayarak Ti6Al4V titanyum alaşımı üzerinde frezeleme deneyleri yapmışlardır. Kesici takımların her birine, -196 °C sıcaklıkta ve farklı sürelerde (12, 24 ve 36 saat) kriyojenik işlem uygulamışlardır. Frezeleme işlemlerini kuru işleme şartlarında kesme hızı 90 m/dk, ilerleme hızı 0,11 mm/diş, kesme derinliği 10 mm ve eksenel kesme derinliği 1 mm parametrelerini ile yapmışlardır. Deneyler sonucunda kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem süresinin artmasıyla takım aşınması, kesme ve sürtünme kuvveti değerlerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Takım aşınması, kesme ve sürtünme kuvvetleri açısından en iyi performansı 36 saat kriyojenik işlem uygulanması sonucu elde etmişlerdir.

Mukkoti vd. (2018), tungsten karbür parmak kesici takımların herbirine farklı sürelerde (24 - 36 saat) derin kriyojenik işlemler uygulamışlardır. Kriyojenik işlem uyguladıkları kesici takımlarla P20 kalıp çeliğini farklı kesme parametreleri ile CNC freze tezgâhında işlemişlerdir. Yaptıkları deneylerle kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem süresinin kesme kuvvetleri ve güç tüketimi üzerindeki etkilerini ANOVA yöntemi ile optimize etmeye çalışmışlardır. Deney sonuçlarına göre 36 saat kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla yapılan frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetlerinin ve güç tüketiminin azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlar üzerinde yaptıkları mikroyapı analizi sonucunda, derin kriyojenik işlemin, kesici takımların içyapısındaki taneciklerin uygun hizalanmasını sağladığını böylelikle termal iletkenliklerinin arttığını tespit etmişlerdir. Termal iletkenliğin artması sonucu, kesici takımların uç kısımlarındaki sıcaklıkların daha düşük olduğunu ve bu durumun deneylerde yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu etki yaptığını belirtmişlerdir.

Ekici ve Uzun (2022), kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla Ti6Al4V alaşımının frezelenmesi işleminde kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla kriyojenik işlem uygulanmış kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici takımlarla farklı kesme parametrelerde deneyler yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri sonuçları Taguchi yöntemi ve gri ilişkisel analiz yöntemleri ile optimize etmişlerdir. Kriyojenik işlemin takım ömrünü artırdığını fakat kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etki yapmadığını belirtmişlerdir.

Varghese vd. (2019a), kriyojenik işlem görmüş WC-Co kesici takımlarla Maranging çeliğinin frezelenmesi işleminde kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, takım ömrü ve mikrosertlik değerleri üzerinde etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Deneylerini kuru, ıslak ve kriyojenik soğutma yağlama şartlarında farklı iş mili hızları ile yapmışlardır. Kriyojenik işlemin, kesici takımların mikrosertlik değerini ve aşınma dirençlerini arttırdığını bunun sonucu olarak tüm işleme şartlarında takım ömrünün arttığını tespit etmişlerdir. En iyi takım ömrü 270 rpm' lik iş mili hızında kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarda elde etmişlerdir. Ayrıca tüm işleme şartlarında kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla yapılan deneylerde kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin daha düşük olduğunu görmüşlerdir.

Varghese vd. (2019b), yaptıkları başka bir çalışmada farklı sürelerde derin kriyojenik işlem görmüş WC-Co kesici takımlarla Maranging çeliğinin frezelenmesi

işleminde kesici takımların işleme performanslarını araştırmışlardır. Kesici takımların her birine, -196 °C sıcaklıkta 18, 24 ve 32 saat gibi farklı sürelerde kriyojenik işlem uygulamışlardır. Kesici takımlara 2,5 °C/dk hızında soğutma işlemi uygulayarak -196 °C sıcaklığına kadar düşürmüşlerdir. Soğutma işleminin ardından kesici takımlar tekrar 1,5 °C/dk hızında kontrollü olarak oda sıcaklığına getirilip 2 saat boyunca 150 °C’ de temperleme işlemine maruz bırakmışlardır. Deneylerini farklı iş mili hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Yapılan kriyojenik işlemin kesici takımların ömürlerini, termal iletkenliklerini ve mikrosertlik değerlerini arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla yapılan deneylerin, kriyojenik işlem görmemiş kesici takımlarla yapılan deneylere oranla kesme kuvveti, güç tüketimi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. En iyi aşınma direnci ve işleme performansını 24 saat kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla gerçekleştirdiğini bulmuşlardır. Kriyojenik işlem süresinin 32 saat çıkarılması kesici takımlarda aşınma dirençlerini ve işleme performanslarını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Sivalingam vd. (2018), Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş PVD TiAlN / NbN kaplı tungsten karbür kesici takımlarla frezeleme deneyleri yapmışlardır. Kesici takımların bir kısmına 24 saat, diğerlerine 48 saat -196 °C sıcaklığında derin kriyojenik işlem uygulandıktan sonra kesici takımları yavaşça oda sıcaklığına getirmişlerdir. Kriyojenik işlemden sonra kesici takımlara 300 °C’de 3 saat süreyle ısıtma işlemi uygulamışlardır. Tüm işleme koşullarında kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarda takım aşınmasının daha az olduğunu belirtmişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 48 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla elde etmişlerdir. Kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarda mikrosertliğin arttığı bunun sonucu olarak deneylerde takım aşınmasının ve titreşim değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Kurşuncu vd. (2018), kriyojenik işlem uygulanmış çok katmanlı nanokompozit sert kaplamalı kesici takımlar ile Inconel 718 süper alaşımı üzerinde yaptıkları frezeleme deneylerinde kesici takım performansını araştırmışlardır. Bu amaçla TiAlSiN, TiSiN ve TiAlN kaplı karbür kesici takımlara -196 °C sıcaklığında 24 saat kriyojenik ısıtma işlemi yapmışlardır. Kriyojenik işlemden sonra 2 °C/dk ısıtma hızıyla oda sıcaklığına getirilen kesici takımlara 200°C’de iki saat boyunca ısıtma işlemi uygulamışlardır. Deney parametreleri olarak üç farklı kesme hızı (20 - 30 ve 40 m/dk), iki farklı kesme derinliği (0,2 ve 15 mm) ve sabit 0,05 mm/diş ilerleme hızı seçmişlerdir. Kriyojenik işlem uygulanmış karbür kesici takımlardaki η fazının %18 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Yaptıkları analizlerle kriyojenik işlem görmüş kesici takımların kaplama yüzeylerinin

daha homojen ve pürüzsüz olduğunu belirtmişlerdir. Tüm işleme şartlarında kriyojenik işlemin kesici takım ömrünü arttırdığını tespit etmişlerdir. En iyi performansı kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla elde etmişlerdir.

Kurşuncu (2020), başka bir çalışmada, Inconel 718 süper alaşımının frezeleme işlemlerinde kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş sinterlenmiş karbür kesici takımlar kullanarak, kriyojenik işlem sıcaklığı ve süresinin kesici takımların işleme performansları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kesici takımlara iki farklı sıcaklıkta (-145 °C ve -196 °C) ve iki farklı sürede (24 ve 36 saat) kriyojenik işlem uygulamıştır. Kriyojenik işlemin takım aşınma direncini arttırdığını ve en yüksek sertlik değerinin, 24 saat süreyle -145 °C sıcaklığında kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarda olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla yapılan deneylerde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük olduğunu belirtmiştir. Yaptığı analizlerde kesici takım performansı açısından kriyojenik işlem süresinin, kriyojenik işlem sıcaklığına oranla daha etkili olduğunu tespit etmiştir.

Vardhan vd. (2017), farklı sıcaklıklarda kriyojenik işlem görmüş tungsten karbür kesici takımlarla P20 kalıp çeliği üzerinde frezeleme deneyleri yapmışlardır. Bu deneylerde farklı sıcaklıklarda yapılan kriyojenik işlemin kesici takımların işleme performansları üzerinde etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla deneylerde kullandıkları kesici takımlara sıg (-110 °C sıcaklıkta), orta (-150 °C sıcaklıkta) ve derin (-175°C sıcaklıkta) kriyojenik işlemler uygulamışlardır. Tüm kesme koşullarında derin kriyojenik işlemin takım ömrünü önemli derecede arttırdığını tespit etmişlerdir. Derin kriyojenik işlem görmüş kesici takımların, sıg ve orta kriyojenik işlem görmüş kesici takımlara oranla yüzey pürüzlülük değerleri ile takım aşınma miktarlarının daha düşük olduğunu ve malzeme kaldırma oranının daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Talaş kaldırma oranı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü bakımından en kötü performansı sıg kriyojenik işlem görmüş kesici takımların gösterdiğini bulmuşlardır.

Yong vd. (2007), kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş tungsten karbür kesici takımlarla ASSAB 760 orta karbonlu çeliği üzerinde frezeleme deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde kriyojenik işlemin kesici takımların işleme performansları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerini dört farklı kesme hızı (294,5 - 343,6 - 392,7- 409,9 - 540 ve 589 m/dk), sabit ilerleme hızı (0,15 mm/diş) ve sabit kesme derinliği (0,1 mm) parametreleri ile kuru ve ıslak işleme şartları altında gerçekleştirmişlerdir. Tüm işleme şartlarında kriyojenik işlem görmüş kesici takımların

takım ömürlerinin arttığını belirtmişlerdir. En iyi performansı ıslak işleme şartlarında kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla elde etmişlerdir.

Thamizhmanii vd. (2011), Inconel 718 süper alaşımının kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş PVD kaplamalı kesici takımlarla frezelenmesi esnasında kesici takımların işleme performanslarını yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından analiz etmişlerdir. Deneylerinde kullandıkları kesici takımlara -196°C sıcaklığında 20 saat kriyojenik işlem uygulamışlardır. Kriyojenik işlemten sonra kesici takımları 1°C/dk ısıtma hızıyla tekrar oda sıcaklığına getirmişlerdir. Tüm işleme şartlarında kriyojenik işlem görmüş kesici takımların kriyojenik işlem görmeyenlere oranla takım aşınmasının daha az olduğu dolayısıyla takım ömürlerinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla işlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Park vd. (2015), Inconel 718 süper alaşımının kaplamalı, kaplamsız ve kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla frezelenmesi esnasında kesici takımların işleme performanslarını araştırmışlardır. Tüm işleme şartlarında kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarda takım aşınmasının en az olduğunu belirtmişlerdir. Krater ve serbest yüzey aşınmasının en fazla kaplamsız kesici takımlarda gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

2.2. Hardox Çeliğinin Frezelenmesi ile İlgili Yapılan Araştırmalar

Turan vd. (2023), Hardox 450 çeliğini farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün değişimini deneysel ve istatistiksel olarak incelemişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülük değerinin $0,06\text{ mm/dk}$ ilerleme hızı, 60 m/dk kesme hızı ve $0,2\text{ mm}$ kesme derinliği seçilerek elde edilebileceğini bulmuşlardır. Taguchi kullanılarak yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızının önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Passari vd. (2022), Hardox 450 çeliğinin CVD kaplı kesici takımlarla frezelenmesi sırasında, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerin sonuçlarını optimize etmişlerdir. Deneylerde en iyi kesme parametreleri $V=89\text{ m/dk}$, $fz=0,1\text{ mm/diş}$ ve $ap=0,212\text{ mm}$ ile elde edildiğini ortaya koymuşlardır.

Passari vd. (2023a), yaptıkları başka bir çalışmada farklı yağlama soğutma yöntemleri altında Hardox 450 çeliğinin frezelemesiyle oluşan yüzey pürüzlülük değerlerini çok değişkenli optimizasyon kullanarak incelemişlerdir. Hardox 450 çeliğinin

frezeleme deneylerinde soğutma yağlama yöntemi olarak çok katmanlı grafen bazlı nano akışkan (NF-RQL) karışımını kullanmışlardır. Deneylerde elde ettikleri yüzey pürüzlülük değerlerini kuru ve ıslak soğutma yağlama şartlarındaki frezeleme deneyleri ile karşılaştırmışlardır. NF-RQL yöntemi, yüzey pürüzlülük değerleri ve daha iyi bir yüzey kalitesi açısından ıslak ve kuru işleme yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. Kuru işleme yönteminde en kötü yüzey pürüzlülük sonuçlarını elde etmişlerdir.

Passari ve Souza (2023b), yaptıkları başka bir çalışmada PVD TiAlN kaplamalı karbür kesici takımlar kullanılarak Hardox 450 çeliğinin farklı soğutma yağlama yöntemleri altında frezelemesiyle oluşan esas kesme kuvvetlerini çok değişkenli optimizasyon kullanarak incelemişlerdir. Deneylerinde NF-RQL, ıslak ve kuru soğutma yağlama yöntemlerini kullanmışlardır. Deneylerde elde ettikleri verilerle yaptıkları analizlerde üç soğutma yağlama yönteminde de esas kesme kuvvetleri arasında düşük farklılık olduğunu belirtmişlerdir. Kesme kuvvetlerini esas olarak kesme parametrelerine ve buna bağlı olarak kesme parametreleri ile soğutma yağlama ortamı etkileşimine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Kesme kuvvetleri üzerinde en etkili kesme parametrelerinin kesme derinliği sonrasında ilerleme hızı olduğunu ifade etmişlerdir.

Kara (2018), PVD kaplamalı karbür uçlar kullanarak Hardox 400 çeliğinde finiş frezeleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucu elde edilen sonuçlara göre kesme parametrelerinin optimizasyonunu yapmıştır. Taguchi analizinde yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuçları ıslak soğutma yöntemi altında 120 m/dk kesme hızında elde edilebileceğini bulmuştur.

Aslan (2024), farklı işleme şartları kullanarak Hardox 400 çeliği üzerinde frezeleme deneyleri yapmıştır. Deneylerde elde ettiği sonuçlar ışığında minimum miktarda yağlama (MQL) yönteminin kullanımı yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde düşürdüğünü ve yüzey dokusunu iyileştirdiğini tespit etmiştir. En iyi yüzey pürüzlülüğü değeri 1,97 μm olup, bu değeri ilerleme hızı 0,1 mm/diş ve kesme hızı 200 m/dk kesme parametreleri ile MQL koşulları altında elde etmiştir.

Krolczyk vd. (2016), Hardox 400 çeliği üzerinde frezeleme ve tornalama deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneylerle malzemenin yüzey morfolojisi ve topografyasını üç boyutlu optik ölçüm sistemi kullanılarak analiz etmişlerdir. Farklı işleme şartları kullanarak işlenmiş iş parçasının yüzey analizinde ortalama yüzey pürüzlülük değerinin ($R_a = 1,54 \mu\text{m}$) elde edilebileceğini görmüşlerdir.

Kuntoglu (2022), Hardox 500 çeliğinin frezelenmesinde farklı kesme parametreleri ile çeşitli soğutma ve yağlama yöntemlerinin işlenebilirlik üzerindeki etkisini araştırmıştır. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin kriyojenik ortamda, yüksek kesme hızında ve düşük ilerleme oranında olduğunu belirlemiştir.

Majerik vd. (2016), Hardox 500 çeliğini, TiAlCN+TiN kaplamalı karbür kesici uçlar kullanarak çeşitli kesme parametreleriyle frezeleme deneyleri yapmışlar ve bu kesici takımların ömürlerini belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan deneylerde kesici takım ömrünün ortalama 0,2 mm takım aşınması kabul etmişlerdir. Takım ömrü üzerinde en önemli etkiye sırasıyla kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği olduğunu bulmuşlardır.

Duc vd. (2021), farklı oranlarda Al_2O_3/MoS_2 nanopartiküllerini içeren karışımı kullanarak minimum miktarda soğutma yağlama (MQCL) yöntemi ile Hardox 500 çeliğinde sert frezeleme deneyleri yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara bağlı olarak Al_2O_3/MoS_2 nanopartiküllü minimum miktarda soğutma yağlama yönteminde en iyi yüzey kalitesinin elde edildiğini ve kesme hızının 140 m/dk' ya kadar çıkarılabileceğini bulmuşlardır.

Bensaid vd. (2021), Hardox 500 çeliğini kuru, sıvı ve kriyojenik soğutma yağlama yöntemleri ile frezeleme deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme ve yüzey sertleşmesi gibi özelliklerin nasıl değiştiğini bulmaya çalışmışlardır. Kriyojenik soğutma yöntemi uyguladıklarında Hardox 500 çeliğinin yüzey sertliğinin diğer soğutma yöntemlerine oranla arttığını görmüşlerdir. Bu sertleşme sonucu frezeleme işleminde kesme kuvveti bileşenlerinin ve özgül kesme enerjisinin diğer soğutma yöntemlerine oranla arttığını tespit etmişlerdir. Sıvı soğutma yönteminin, kuru ve kriyojenik soğutma yöntemlerine göre yüzey pürüzlülüğünün daha iyi olduğunu bulmuşlardır. Kriyojenik soğutma yönteminde yüksek seviyelerde artık gerilmeler meydana geldiğini görmüşlerdir.

Moayyedean vd. (2020), Hardox 600 çeliğinin frezelenmesinde farklı işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla kesme derinliği, mil ve ilerleme hızı olarak belirlemiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı kesme parametrelerde kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kesici takımlarla Hardox 450 çeliğinin frezelenmesi ile ilgili kesme kuvvetleri, talaş morfolojisi, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım mikrosertliğinin incelendiği kapsamlı bir bütün çalışma yapılmadığı belirlenmiştir.

Bu deneysel tez çalışmasında, literatürdeki mevcut araştırmalardan farklı olarak, Hardox 450 eliğinin belirlenen işleme parametreleri ile frezeleme deneylerinde kesme kuvvetlerini, yüzey pürüzlülük değeriğini ve takım aşınmasını düşürmeye yönelik bir çalışma ortaya koyulmuştur. Bu bağlamda, Hardox 450 eliğinin frezelenmesinde daha düşük maliyet, daha iyi yüzey kalitesi ve yüksek kaliteli ürünlerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın bu yönüyle literatüre önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Hardox Aşınma Çelikleri

Hardox aşınma çelikleri Swedish Steel AB (SSAB), firması tarafından ilk defa 1970 yılında üretilerek piyasaya sunulmuştur. Farklı ihtiyaçları karşılayacak şekilde sürekli geliştirilmiştir. Hardox çeliği yüksek sertliği, tokluğu, dayanıklılığı ve aşınma direnci olan bir çelik türüdür. Hardox aşınma çeliğinin sahip olduğu sertlik ve tokluğu kimyasal bileşimi ve su verilmiş martenzit içyapısıyla kazanmıştır. Bu çeliklerin sertliği 350 ile 640 HB arasında değişmektedir. Yüksek akma dayanımı uzun süre deforme olmadan büyük yükleri taşımasını sağlar. Ayrıca yüksek tokluğu sayesinde düşük sıcaklıklarda bile dayanıklılığını kaybetmez. Hardox çeliklerinin bu özellikleri endüstride geniş bir uygulama alanında kullanılmasını sağlamıştır. Özellikle madencilik, inşaat, tarım ve enerji sektöründe kullanılan makinaların, ağır iş şartları altında uzun süre bozulmadan çalışmalarında Hardox çeliği etkili olmuştur Swedish Steel AB (SSAB), “Hardox Aşınma Plakaları” (Erişim 01 Aralık 2024).

3.1.1. Hardox çelik türleri

3.1.1.1. Hardox 400 çeliği

Karbon oranı düşük olan bu çelik iyi kaynak edilebilme özelliğine sahiptir. Sertlik değeri 400 HB brinell ölçüsündedir. Hardox 450 çeliğinin bükülebilme, kaynak edilebilme, plastik esnekliği ve yüksek tokluk değeri sayesinde, orta düzeyde aşınmaya maruz kalan uygulamalarda kullanılabilmektedir SSAB, “Hardox Aşınma Plakaları” .

3.1.1.2. Hardox 450 çeliği

Hardox çelikleri içerisinde en çok tercih edilen çeliktir. Sertlik değeri 450 HB olduğundan dirençli bir dış yapı çeliği olarak kullanılmaktadır. Yüksek darbe dayanıklılığı, bükülebilme ve kaynak edilebilme özellikleri nedeniyle aşınmaya maruz kalan yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Hardox 450 çeliğinin sahip olduğu iyi aşınma direnci ve daha uzun aşınma ömrü nedeniyle kullanıldığı sistemlerde maliyet açısından daha fazla tasarruf sağlayabilmektedir SSAB, “Hardox Aşınma Plakaları”.

3.1.1.3. Hardox 500 çeliği

Sertlik değeri 500 HB olan bu çelik yüksek düzeyde aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bükülebilme, kaynak edilebilme, ağır yük taşıyabilme ve yüksek darbe tokluğu özelliklerine sahiptir. Hardox 500 çeliği ağır aşınmaya maruz kalan uygulamalarda kullanılan makinaların uzun ömürlü olmasını sağlar SSAB, “Hardox Aşınma Plakaları”.

3.1.1.4. Hardox 600 çeliği

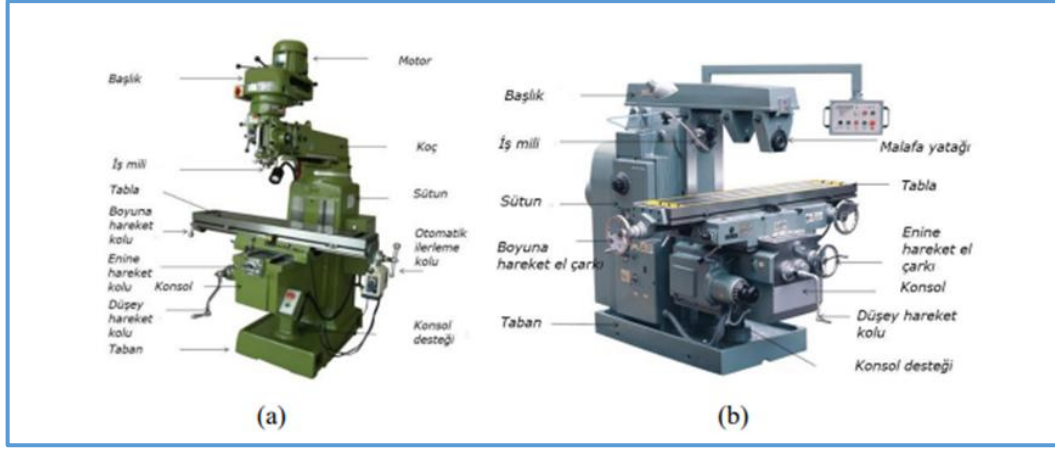
Hardox 600 aşınma plakası çok yüksek seviye aşınma direncine sahip bir dış yapı plakasıdır. Daha üst düzey tokluk ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca diğer Hardox çelikleri gibi kesilebilme ve kaynaklanabilme kabiliyeti sebebiyle yüksek mukavemet uygulamaları için tercih edilen bir çeliktir SSAB, “Hardox Aşınma Plakaları”.

3.1.1.5. Hardox hituf çeliği

Sertlik değeri 350 HB olan bu çelik aşırı ısınma sonucunda meydana gelebilecek çatlamları önlemek amacıyla özel olarak imal edilmiştir. Özellikle aşırı ısınmalara ve zorlanmalara maruz kalan kırım makine parçaları, bıçak, yıkım makinesi elemanı ve parçalayıcı makine elemanları yapımında kullanılır SSAB, “Hardox Aşınma Plakaları”.

3.2.Frezeleme

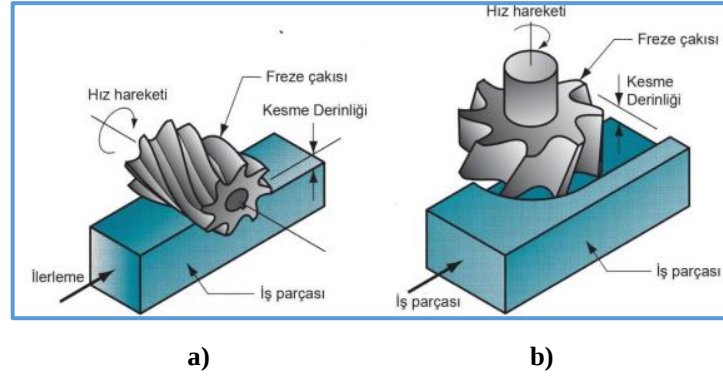
Tanımlı devir sayısında dönen freze çakısının altında, iş parçasının eksenel hareketleri ile yapılan talaş kaldırma işlemidir. Frezelemede kesme işlemini genellikle kesici takım yaparken, ilerleme hareketi ise eksenel hareket ettirilebilen iş parçası ile yapılır. Freze tezgâhında dişli çarklar, eğrisel yüzeyler, düz yüzeyler ve kanallar açılır. Frezeleme tezgâhları bağlandığı iş milinin yönüne göre isimlendirilir. İş mili yönü yatay olan tezgâhlara yatay freze tezgâhı, dik olanlara ise dikey freze tezgâhı adı verilmektedir. Freze tezgâh türleri Şekil 3.1’de verilmiştir. İki yönde de frezeleme yapabilen tezgâhlara Universal Freze tezgâhı adı verilmektedir (Groover, 2010).



Şekil 3. 1. a) Dikey Freze Tezgâhı, b) Yatay Freze Tezgâhı (Anonim, 2024)

3.2.1.Frezeleme çeşitleri

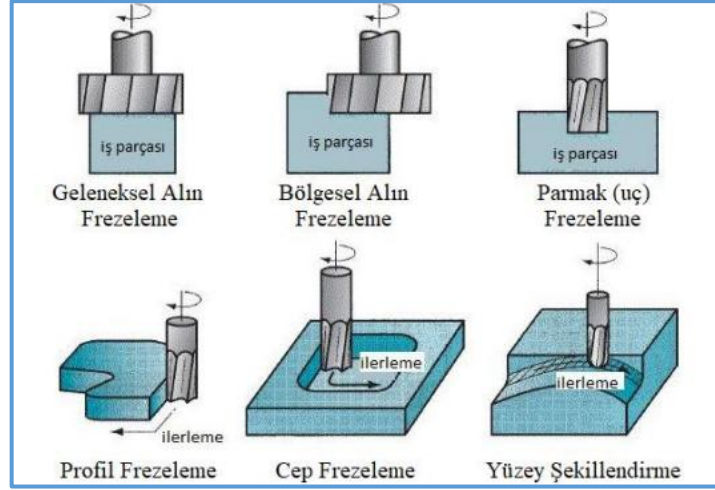
Frezeleme işlemlerinde, kesme işleminin yapıldığı bölgedeki kesici takımların kesme pozisyonuna göre alın ve çevresel frezeleme diye iki şekilde adlandırılır (Groover, 2010). Frezeleme türleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3. 2. a) Çevresel Frezeleme, b) Alın Frezeleme (Groover, 2010)

3.2.1.1. Alın frezeleme

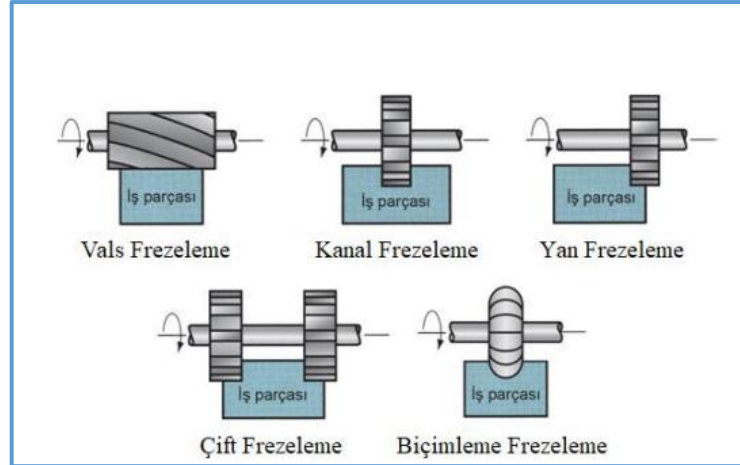
Bu frezeleme türünde, kesici takımın uçları ve dönme eksenini iş parçasının yüzeyine dik olacak şekilde bulunur. Kesme işlemi kesici takımın alın bölgesindeki kesici uçlar ile yapılır (Groover, 2010). Alın frezeleme biçimleri Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3. 3. Alın Frezeleme Biçimleri (Groover, 2010)

3.2.1.2. Çevresel frezeleme

Bu frezeleme türünde, kesici takımın uçları ve dönme eksenini iş parçasının yüzeyine paralel olacak şekilde bulunur. Kesme işlemi kesici takımın çevresindeki kesici uçlar ile yapılır (Groover, 2010). Çevresel frezeleme biçimleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 4. Çevresel Frezeleme Biçimleri (Groover, 2010)

3.2.2. Frezeleme işlemlerinde kesme parametreleri

3.2.2.1. İlerleme hızı

Kesici takımın, işlenen malzeme üzerinde doğrusal olarak bir dakika aldığı yolun uzunluğudur. Kesici takım üzerinde birden fazla kesici uç bulunabilir. İş parçasına temas eden bir kesici ucun kesme kenarı ile bir sonraki kesici ucun kesme kenarının iş parçasına temas etmesi sırasında geçen sürede, malzeme üzerinde alınan yol, diş başına ilerleme olarak adlandırılır (Çakır, 2000). İlerleme hızı yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir parametredir. İlerleme hızı aşağıda verilen formül ve birimler kullanılarak hesaplanır.

$$f_z = V_f / n.z \quad (3.1)$$

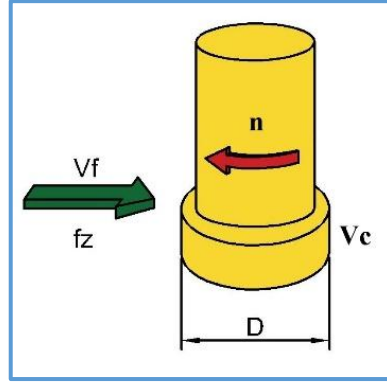
Eşitlik 3.2’de verilen z: kesici uç sayısını, f_z : diş başına ilerleme miktarı (mm/diş), V_f : ilerleme hızı (mm/dk) ve n: devir sayısı (dev/dk) ifade etmektedir.

3.2.2.2. Kesme hızı

Kesici takımın, iş parçası üzerinde bir dakika aldığı yolun metre cinsinden değeridir. Kesme hızı iş milinin devir sayısı ile doğru orantılıdır. Kesme hızı, işleme süresi üzerinde önemli bir parametredir. Kesme hızı arttıkça işleme süresi düşer. Fakat artan kesme hızlarında oluşan aşırı ısı ve yükler kesici takımların deforme olmasına sebep olur. Bu durum kesici takımların ömrünü kısaltır (Çakır, 1999; Çiftçi, 2005). Bundan dolayı işlenecek malzemenin özelliklerine göre en uygun kesme parametrelerinin seçilmesi işlem süresi ve verimlilik açısından önemlidir (Gezgin, 2007). Kesme hızına etki eden faktörler Şekil 3.5’te verilmiştir. Kesme hızı aşağıda verilen formül ve birimler kullanılarak hesaplanır.

$$V = (\pi . D . n) / 1000 \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1’de verilen V: Kesme hızı (m/dk), D: Kesici takım çapı (mm) ve n: Devir sayısı (dev/dk) ifade etmektedir.



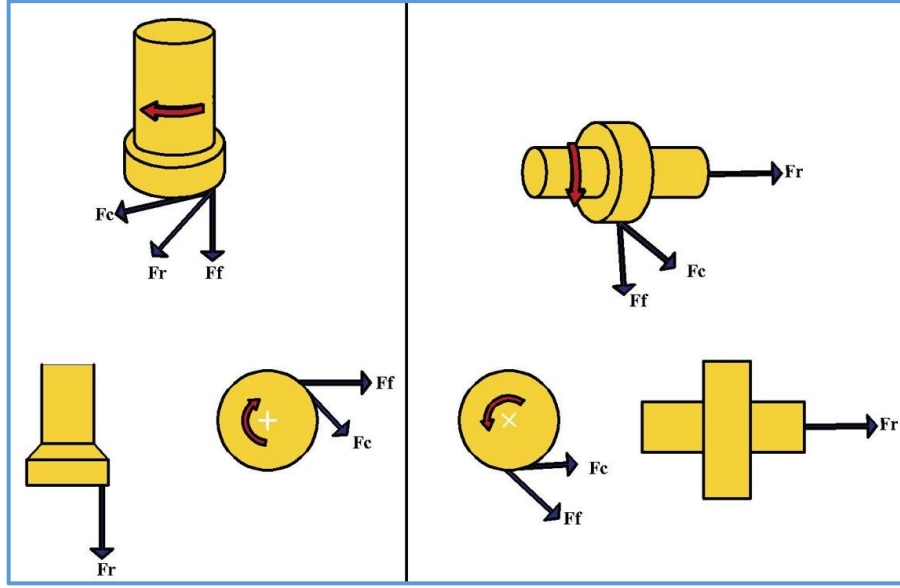
Şekil 3. 5. Kesme hızına etki eden faktörler (Çakır, 2000)

3.2.2.3. Talaş derinliği

Kesme işlemi esnasında, kesici takımın kendi eksenine dik olarak iş parçası içinde aldığı mesafedir. Talaş derinliği, frezeleme işlemlerinde zaman ve maliyet açısından önemli bir parametredir. Yeterli talaş derinliği seçilmediğinde, imalat işleminin tamamlanması için birden fazla paso yapılması gerekecek bu da zaman kaybına sebep olacaktır (Şahin, 2003). Talaş derinliğinin fazla olması durumunda, birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artacak buda, kesici takım üzerindeki termal ve mekanik yüklerin yükselmesine neden olacaktır. Yüksek termal ve mekanik yükler takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz etki yapmaktadır (Choudhury ve Baradie, 1997).

3.2.3. Frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetleri

Frezeleme işlemleri yapılırken kesici takım ve iş parçası üzerinde farklı kuvvetler oluşmaktadır. Bu kuvvetler kesme parametrelerine, iş parçası malzemesine, kesici takım yapısına, frezeleme işleminin türüne ve talaş kalınlığına bağlıdır. Bu kuvvetler teğetsel, radyal ve eksenel olmak üzere üç bileşene sahiptir. Takımın dönme yönünde teğetsel kuvvetler, teğetsel kuvvetlere dik yönde radyal kuvvetler ve kesici takımın ilerleme yönünde eksenel kuvvetler oluşur. Frezeleme işlemlerinde teğetsel ve radyal kuvvetler ön plana çıkmaktadır (Çakır, 2000). Frezelemede kesici takım üzerinde oluşan kuvvetler Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

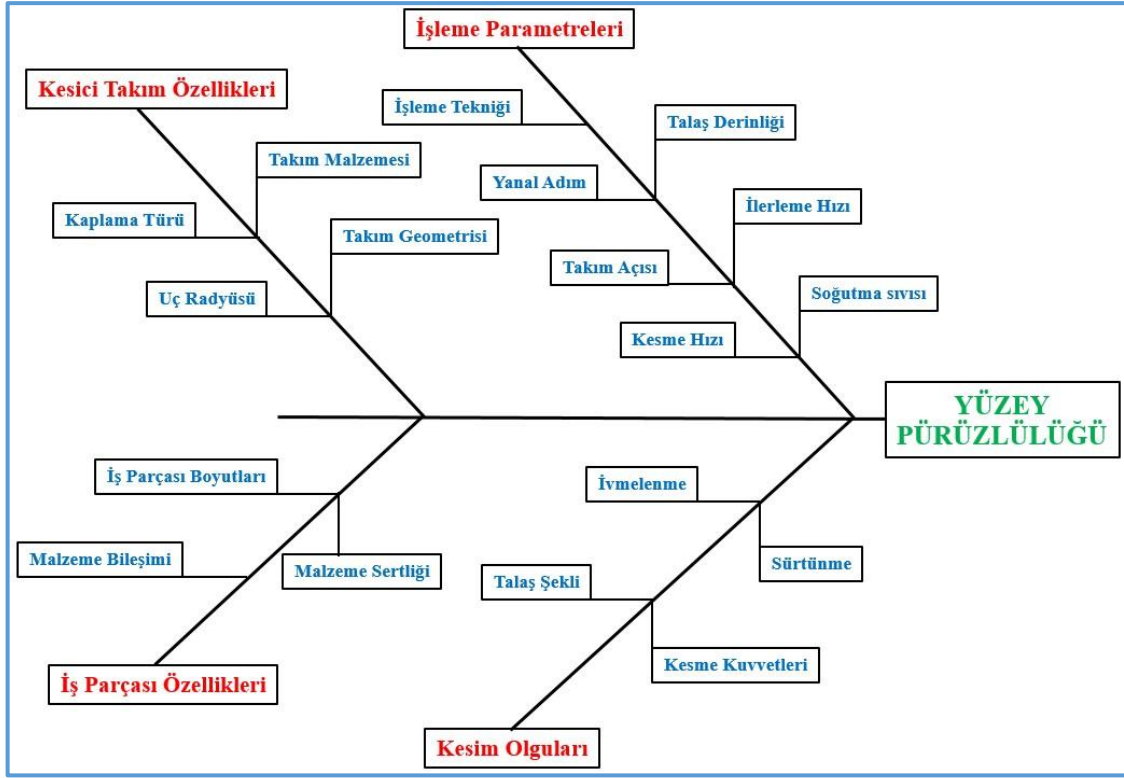


Şekil 3. 6. Frezelemede kesici takım üzerinde oluşan kuvvetler (Çakır, 2000)

3.2.4. Frezeleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, iş parçasının işlenen yüzeyinde meydana gelen mikro düzeydeki düzensizliklerdir. İşlenen malzemenin fonksiyonlarını yapabilmesi ve uzun süre verimli çalışmasında yüzey pürüzlülüğü önemli bir etmendir. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok etmen vardır. Bu etmenler Şekil 3.7’de verilmiştir. Doğru seçilen ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliği parametreleri minimum yüzey pürüzlülüğü elde etmede etkilidir. Genel olarak ilerleme hızı ve kesme derinliği artınca yüzey pürüzlülüğü artar, kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü düşer (Kwon, 2000).

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde dört farklı yüzey pürüzlülük ölçütü bulunmaktadır. Bunlar; en düşük ve en yüksek noktalar arasındaki fark (R_t), yüzey pürüzlülük aritmetik ortalaması (R_a), karesel ortalamanın karekök değeri (R_q) ve ortalama yüzey pürüzlülük yüksekliğidir (R_z).



Şekil 3. 7. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan temel faktörler (Benardos ve Vosniakos, 2003)

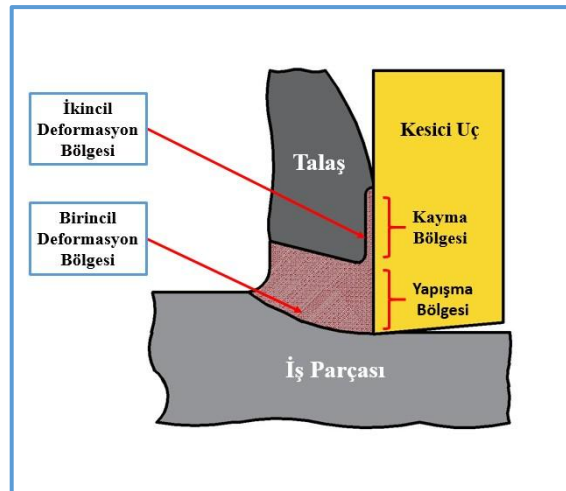
3.2.5. Frezeleme işlemlerinde talaş kaldırma ve takım aşınması

Talaş kaldırma işlemi, frezeleme ve tornalama gibi işlemlerle iş parçası yüzeyinden malzeme kaldırarak, iş parçasının istenen şekle getirme sürecidir. Kesici takımlar, iş parçasına temas ettiği yüzeylerde malzemeyi deforme ederek talaş kaldırır. Bu işlem sırasında, seçilen iş parçası malzemesi, kesici takım malzemesi, kesme sıvısı, kesme hızı ve ilerleme hızı gibi parametrelere bağlı olarak takım aşınması meydana gelir. Takım aşınması, talaş kaldırma işlemleri sırasında kesici takım malzemesinin aşınması, kopması veya deformasyona uğraması sonucu kesici takımın şeklinin değişmesidir. Kesici takımlarda oluşan aşınmalar adhezyon, abrazyon, kimyasal aşınma ve ısıl yorulma nedeniyle olmaktadır. Talaş kaldırma işlemlerinde, burun aşınması, serbest yüzey aşınması, çentik aşınması, ağız birikimi (BUE), kenar çentiklenmesi, plastik deformasyon ve takım kırılması gibi çeşitli takım aşınma türleri oluşmaktadır. Kesici takım aşınmasını etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir.

- İş parçasının türü ve kimyasal yapısı
- Kesici takım malzemesi ve mikroyapısı
- İşlem süresi

- Kesici takım kaplaması
- Sıcaklık
- Kriyojenik işlem ve ısıtma işlemi gibi kesici takıma uygulanmış işlemler
- Seçilen kesme parametreleri
- Kesici takım sertliği

Talaş kaldırma işlemlerinde, meydana gelen deformasyon bölgeleri birincil ve ikincil deformasyon bölgesi olarak ikiye ayrılır. Birincil deformasyon bölgesi, kesici takımın iş parçasına temas ettiği noktanın ilerisinde talaşın kaldırıldığı bölgedir. Kesici takımın, malzemeden kaldırılan talaşa temas ettiği bölgeye ise ikincil deformasyon bölgesi denir. İkincil deformasyon bölgesinde de yapışma ve kayma bölgeleri bulunmaktadır. Yapışma bölgesi, kesme işlemi sırasında kesici takımla kaldırılan talaşın birlikte hareketi yaptığı bölgedir. Kesici takımlara yapışan talaşların, kesici takım üzerinde kayma hareketi yaptıkları bölgeye ise kayma bölgesi adı verilir (Davim vd., 2008). Kesici takımlarda meydana gelen deformasyon bölgeleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3. 8. Kesici takımlarda meydana gelen deformasyon bölgeleri (Davim vd., 2008)

3.3. Kriyojenik İşlem

Kriyojenik işlem, malzemelerin sıcaklığını kontrollü olarak çok düşük sıcaklıklara getirilip belli bir süre beklendikten sonra tekrar kontrollü olarak oda sıcaklığına getirmektir (Özbek vd., 2016). Yapılan kontrollü soğutma ve ısıtma işlemlerinin amacı, ani termal şoklar nedeniyle malzemelerde mikro çatlakların oluşmasının önlenmesidir.

(Akıncioğlu vd., 2016). Üretim maliyetlerinin azaltılmasında, kesici takımların performansı önemli bir etmendir. Kesici takımların performansını artırmak amacıyla kesici takımlara ısıtma işlemi ve kaplama uygulamaları yapılmaktadır. Kriyojenik işlem, kesici takım iç yapısındaki kalıntı östenitin martenzite dönüştürmesini ve ikincil karbür çökeltilerinin oluşmasını sağlar (Gill vd., 2009; Özbek vd., 2014). Kriyojenik işlem uygulamaları, kesici takımların aşınma direnci, takım ömrü ve ürün kalitesi bakımından önemli etki yapabilmektedir (Firouzdor vd., 2008). Kriyojenik işlemler, kesici takımlara uygulanan ısıtma işlemlere tamamlayıcı bir etki yapmaktadır. Şiddetli aşınmaya maruz kalan kesici takımların aşınma direncini arttırmak amacıyla yapılmaktadır (Kara vd., 2020). Kesici takımların etkinliğini artırmak amacıyla yapılan kriyojenik işlemlerin en önemli parametreleri uygulama ısı, soğutma hızı, uygulama süresi ve temperleme işlemidir (Kalsi vd., 2010).

3.3.1. Kriyojenik işlemin etkinliğine etki eden parametreler

3.3.1.1. Isıtma işlem sıcaklığı

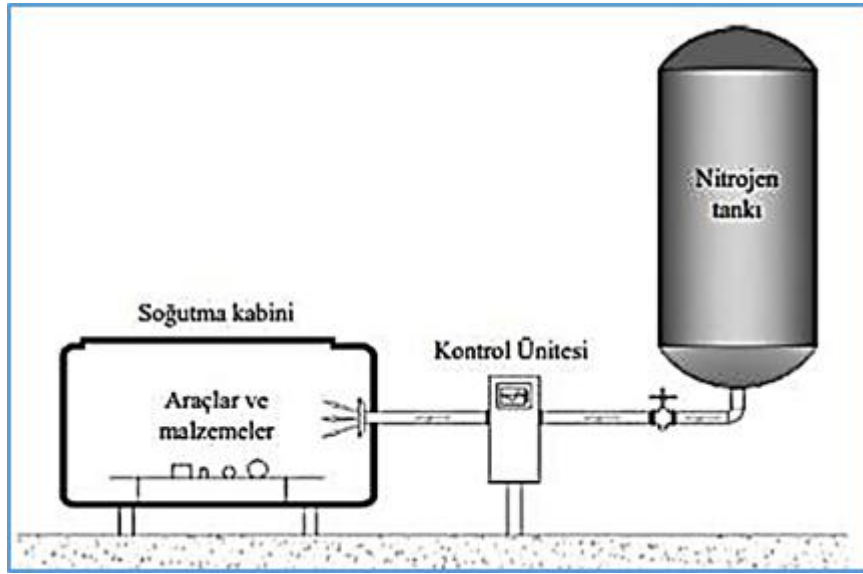
Kriyojenik işlem sıcaklığı, uygulandığı kesici takımın türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem sıcaklığının, takımların sertlik, tokluk ve aşınma direnci özellikleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğu bilinmektedir (Babu vd., 2024; Shirbhate vd., 2012; Vardhan vd., 2017). Daha önce yapılan araştırmalara göre en iyi kriyojenik ısıtma aralığının -80 °C ile -196 °C arasında olduğu belirlenmiştir (Poomari vd., 2012; Yong vd., 2007). Derin kriyojenik işlem ise -125 °C ile -196 °C, sığ kriyojenik işlem -50 °C ile -100 °C arasında uygulanmaktadır. Karbür kesici takımlara -196 °C sıcaklığında uygulanan kriyojenik işlemin kesici takımların aşınma direnci ve ısıtma iletkenliği üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir (Kurşuncu vd., 2018; Thamizhmanii vd., 2011).

3.3.1.2. Isıtma işlemin soğutma hızı

Kriyojenik işlem uygulaması esnasında, malzemelerin ani termal şoklara uğramaması amacıyla kontrollü olarak belli bir soğutma ve ısıtma hızında işlem uygulanmalıdır. Ani termal şoklara maruz kalan kesici takımlarda mikro çatlaklar oluşmaktadır (Akıncioğlu vd., 2016).

3.3.1.3. Kriyojenik ısıt işlemin uygulanma şekli

Malzemeler oksijen, helyum ve nitrojen gibi gazlar kullanılarak kontrollü bir soğutma hızında soğutulur. Bu ısıda belli bir süre durduktan sonra tekrar kontrollü olarak oda sıcaklığına getirilirler. Kriyojenik uygulamalarda genellikle nitrojen gazı kullanılmaktadır. Nitrojen gazı renksiz ve kokusuz bir gaz olup -195°C kaynama ve -210°C erime noktasına sahiptir (Varghese vd., 2019). Kontrollü şekilde yapılan kriyojenik ısıt işlemin uygulama şeması Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3. 9. Kriyojenik ısıt işlemin kontrollü olarak uygulanması (Akıncioğlu ark., 2015)

3.3.2. Kriyojenik işlemin etkileri

Daha önce yapılan çalışmalar ışığında, kriyojenik işlemin malzemeye kazandırdığı özellikler aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Sertlik ve tokluğun artması
- Aşınma direncinin artması
- Kesici takım geometrisinin korunması
- Termal iletkenlik değerinin artması
- Korozyon direncinin artması

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. İş Parçası Malzemesi

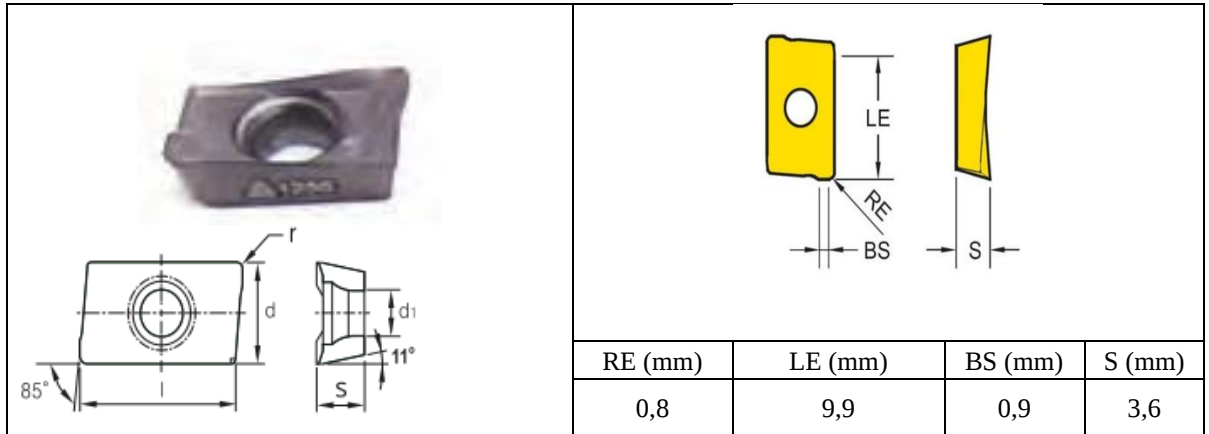
Frezeleme deneylerinde, iş parçası malzemesi olarak “SSAB” firmasından temin edilen yüksek aşınma direncine sahip “Hardox 450” çeliği kullanılmıştır. İki adet plaka şeklinde eni 130 mm, boyu 250 mm ve yüksekliği 12 mm boyutlarında deney numuneleri seçilmiştir. İş parçaları Ege Aşınmaz Metal A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Kullanılan iş parçalarının üretici firmadan temin edilen sertifikaya göre ortalama Brinell sertlik değeri 443 HB’ dir. İş parçasının kimyasal element bileşimi Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 1. Hordox 450 çeliğinin % kimyasal element bileşimi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,18	0,25	1,2	0,12	0,001	0,06	0,05	0,009	0,001

4.2. Kesici Takımlar ve Takım Tutucu

Deneylerde çift köşeli pozitif talaş açısına sahip APKT 100308 PDTR YG602 kodlu karbür kesici uçlar kullanılmıştır. Kesici takımlar “YG-1” kesici takım firmasından satın alınmıştır. Kesici takım ucunun geometrik ölçüleri ve görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir. Kesici takım tutucu olarak EM90 D12 W12 L120 Z01 kodlu tek takma uçlu (insert) saplı tarama kullanılmıştır. Kesici takımlar PVD TiAlN kaplıdır. Takım tutucu “MBC” kesici takım firmasından satın alınmıştır. Deneylerde kullanılan ve Şekil 4.2’ de gösterilen takım tutucuya bir adet kesici uç takılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



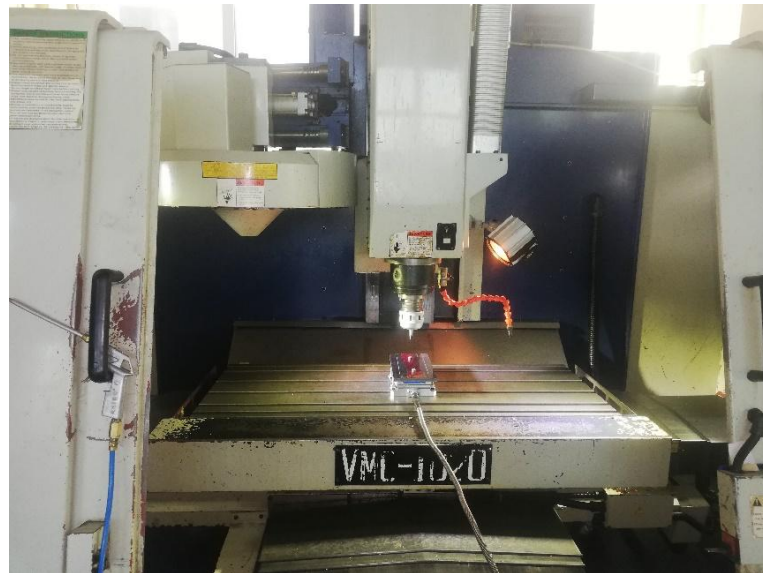
Şekil 4. 1. Kesici takım ucunun görüntüsü ve geometrik ölçüleri



Şekil 4. 2. Takım tutucu

4.3. Takım Tezgâhı

Deneylerde kullanılan iş parçaları, Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde (YETEM) bulunan “Hartford VMC-1020 SP” marka 4 (3+1) eksene sahip CNC freze tezgâhında işlenmiştir. Kullanılan tezgâhın özellikleri Tablo 4.2’de, iç görüntüsü Şekil 4.3’te ve dış görüntüsü Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Hartford CNC freze tezgâhının iç görünümü



Şekil 4. 4. Hartford CNC freze tezgâhı dış görünüm

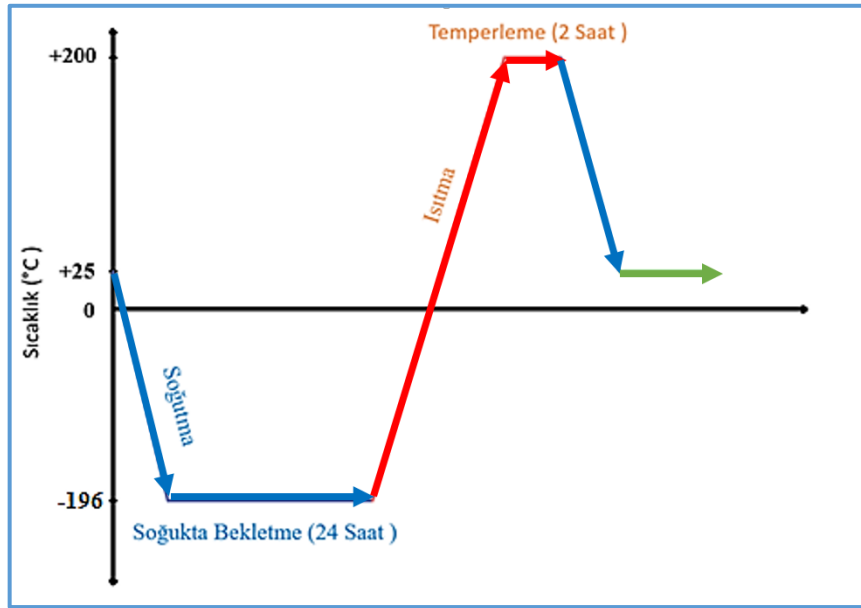
Tablo 4. 2. Hartford CNC freze tezgahının özellikleri

Tezgâh Özellikleri	Değerler
Maksimum devir sayısı	6000 dev/dk
X Eksen mesafesi	1020 mm
Y Eksen mesafesi	510 mm
Z Eksen mesafesi	400 mm
Kontrol ünitesi	Mitsubishi
Magazin kapasitesi	20 takım

4.4. Kriyojenik İşlem Uygulanması

Deneylerde kullanılan kesici takımlara uygulanan kriyojenik ısıtma işlemi “MMDTEKNO” firması tarafından yaptırılmıştır. Kesici takımların sıcaklıkları, oda sıcaklığından 0,5 °C/dk soğutma hızıyla kontrollü olarak soğutularak -196 °C’ye düşürülmüştür. Bu sıcaklıkta 24 saat bekletilen kesici takımlar tekrar 0,5 °C/dk ısıtma hızıyla kontrollü olarak oda sıcaklığına getirilmiştir. Oda sıcaklığına getirilen kesici takımlar 0,5 °C/dk ısıtma hızıyla 200 °C sıcaklığına getirilmiş ve bu sıcaklıkta 2 saat boyunca temperleme işlemine alınmıştır. Temperleme işlemi sonrası kesici takımlar

tekrar kontrollü olarak oda sıcaklığına getirilmiştir. Kesici takımlara uygulanan ısıl işlemin grafiği Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4. 5. Kriyojenik ısıl işlemin kesici takımlara uygulanması

4.5. Kesme Parametreleri

Frezeleme deneylerinde iş parçaları için kullanılan kesme parametreleri, kesici takım üreticisinin önerisi ve ISO 3685 standartları dikkate alınarak belirlenmiştir. Deneylerde, sabit bir kesme derinliği kullanılarak dört farklı ilerleme ve dört farklı kesme hızı seçilmiştir. Belirlenen kesme parametreler Tablo 4.3’te ve frezeleme işlemlerinin deney şeması Tablo 4.4’te gösterilmiştir. İşleme deneylerinde, kriyojenik ısıl işlem uygulanmış kesici takım (K) ve kriyojenik ısıl işlem uygulanmamış kesici takım (NK) olmak üzere iki tip kesici takım kullanılmıştır. İş parçaları Tablo 4.4’te verilen deney parametrelerine göre ve her deney için bir kesici uç kullanılarak işlenmiştir. Böylelikle her bir işleme şartı için (K ve NK) toplam 32 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. 3. İş Parçalarının işleme parametreleri

Kesme hızı, V (m/dk)	30 - 50 -70 - 90
İlerleme hızı, fz (mm/diş)	0,03 – 0,06 – 0,09 – 0,12
Kesme derinliği, ap (mm)	1,2

Tablo 4. 4. Frezeleme işlemlerinin deney şeması

Deney No	Kesme Hızı (V)	İlerleme Hızı (fz)	Kesme Derinliği (ap)
	m/dk	mm/diş	mm
1	30	0,03	1,2
2	30	0,06	1,2
3	30	0,09	1,2
4	30	0,12	1,2
5	50	0,03	1,2
6	50	0,06	1,2
7	50	0,09	1,2
8	50	0,12	1,2
9	70	0,03	1,2
10	70	0,06	1,2
11	70	0,09	1,2
12	70	0,12	1,2
13	90	0,03	1,2
14	90	0,06	1,2
15	90	0,09	1,2
16	90	0,12	1,2

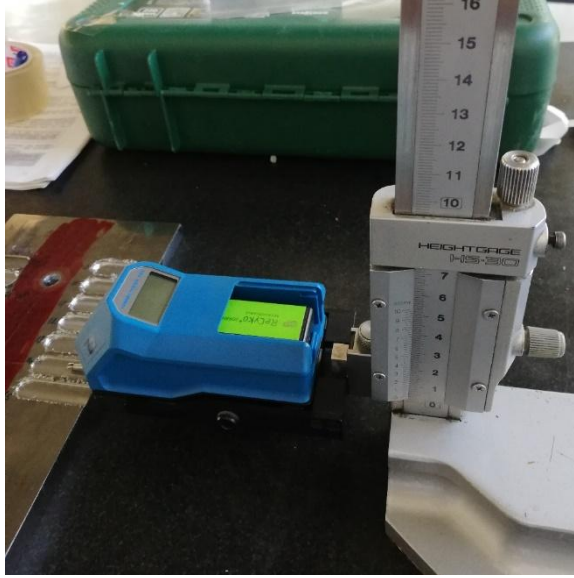
Kesici takımlarda meydana gelen aşınma düzeylerini karşılaştırmak amacıyla, kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kesici takımlarla sabit hacimde talaş kaldırılarak takım aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Takım aşınma deneylerinde, Tablo 4.4'te verilen 16. deneyin kesme parametreleri kullanılmıştır.

4.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Hardox 450 çeliği iş parçalarının frezelenmesi sonucu oluşan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri YETEM laboratuvarında bulunan “HOMMEL Tester T 500” yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Yapılan her bir deney sonrası işlenmiş yüzeylerin dört farklı noktasından 4,8 mm boyunda ölçüm alınmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) bulunmuştur. Yüzey pürüzlülük cihazı Şekil 4.6'da, yüzey pürüzlülük cihazı ile iş parçası üzerinde yapılan yüzey pürüzlülük ölçüm işlemi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4. 6. Yüzey ölçüm cihazı



Şekil 4. 7. İş parçası üzerinde yüzey pürüzlülük ölçümü

4.7. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

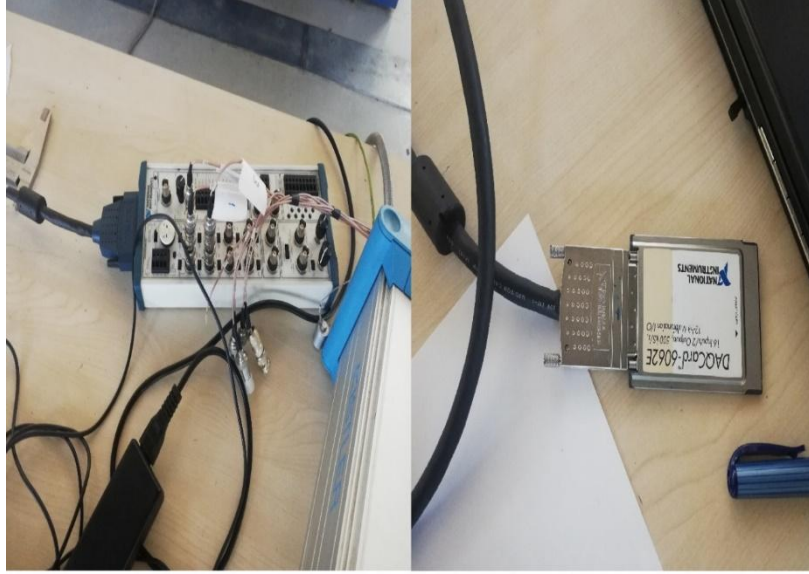
İşleme deneylerinde oluşan kesme kuvvetleri, YETEM laboratuvarında bulunan “Kistler Tip 9257B” marka üç eksenli dinamometre ile ölçülmüştür. Dinamometre cihazı ile esas kesme kuvvetleri F_x (F_c), ilerleme kuvvetleri F_y (F_f) ve radyal kuvvetler F_z (F_r) ölçülebilmektedir. Cihaz -5 ile 5 kN ölçüm aralığında ölçüm alma özelliğine sahiptir. Dinamometreden elde edilen veriler “KİSTLER KST 5070B” 4 kanallı sinyal güçlendirici (ampfikatör) ile güçlendirilerek RS 232 kablo bağlantısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bu bilgiler “CutPro” yazılımı ile bilgisayarda işlenmektedir. Dinamometre cihazı Şekil 4.8’de sinyal güçlendirici Şekil 4.9’da, kablo bağlantıları Şekil 4.10’da ve bağlı bilgisayarın görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4. 8. İş parçasının KISTLER marka dinamometreye bağlanma şekli



Şekil 4. 9. KISTLER KST 5070B model sinyal güçlendirici



Şekil 4. 10. Kuvvet ölçüm cihazı kablo bağlantıları



Şekil 4. 11. Kuvvet ölçüm cihazına bağlı bilgisayar

4.8. Mikrosertlik Ölçümü

Kesici takımların mikrosertlik ölçüm değerleri, YETEM laboratuvarında bulunan “TTS Matsuzawa HWMMT-X3” marka mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kesici takımların üzerinden beş farklı noktadan mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak kesici takımların mikrosertlik değerleri belirlenmiştir. Mikrosertlik ölçüm cihazının görüntüsü Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4. 12. Sertlik ölçme cihazı

4.9. Kesici Takımlardaki Aşınma Tespiti

Takım aşınma deneyleri sonrası son aşınma düzeyinin belirlenmesi amacıyla kesici takımların SEM (taramalı elektron mikroskopu) görüntüleri ve EDS (Enerji dispersiv spektrum) analizleri yapılmıştır. Bu amaçla YETEM Laboratuvarındaki “FEI QUANTA FEG 250” marka SEM cihazı kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskopu görüntüsü Şekil 4.13’te verilmiştir.



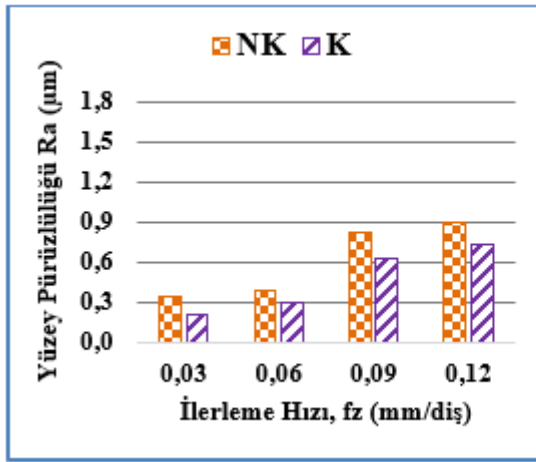
Şekil 4. 13. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

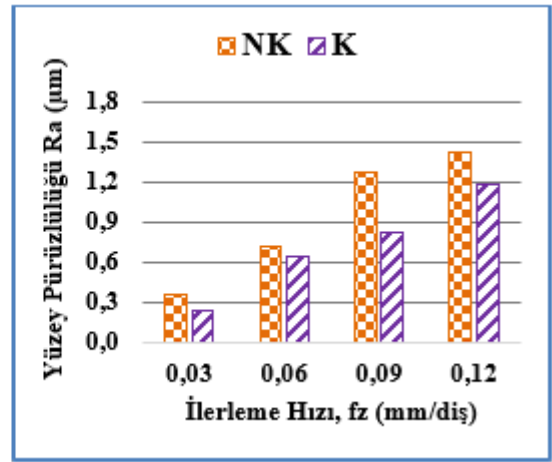
Hardox 450 iş parçası üzerinde, sabit kesme derinliğinde farklı ilerleme ve kesme hızlarında, kriyojenik işlem uygulanmış (K) ve uygulanmamış (NK) kesici takımlar kullanılarak kuru işleme koşullarında frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde işleme deneylerinde oluşan yüzey pürüzlülüğü, esas kesme kuvvetleri, kesici takım aşınması ve talaş morfolojisi kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca kesici takım mikrosertlik değerleri de incelenmiştir.

5.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

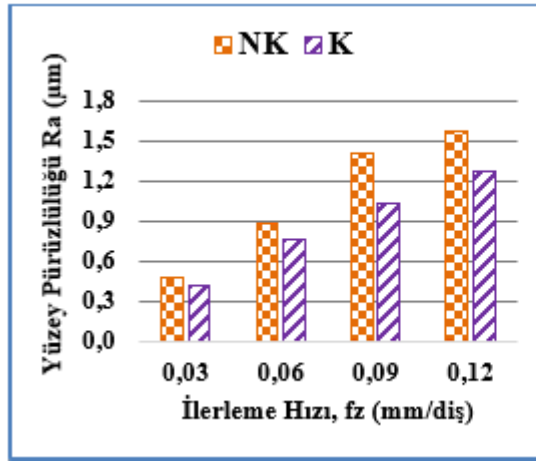
Bu bölümde farklı ilerleme ve kesme hızı oranlarında kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımlarla işlenen Hardox 450 iş parçasının frezelenmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) sonuçları değerlendirilmiştir. Dört farklı ilerleme (0,03 - 0,06 - 0,09 ve 0,012 mm/diş), dört farklı kesme hızı (30 - 50 - 70 ve 90 m/dk) ve sabit kesme derinliği (1,2 mm) parametreleri ile frezeleme deneyleri yapılarak kesme parametrelerin ve kesici takımların yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Her deney esnasında kullanılmamış kesici uç takılarak en uygun deney şartları sağlanmıştır. Frezeleme işlemleri sonrası işlenmiş yüzeylerinin dört farklı noktasından yüzey pürüzlülük ölçümleri alınarak bulunan değerlerin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Farklı kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir.



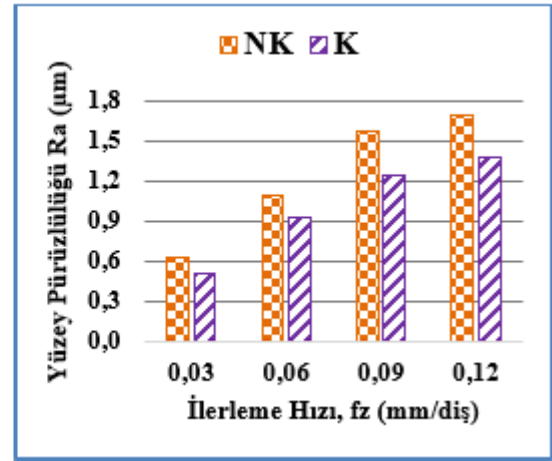
a) V=30 m/dk



b) V=50 m/dk



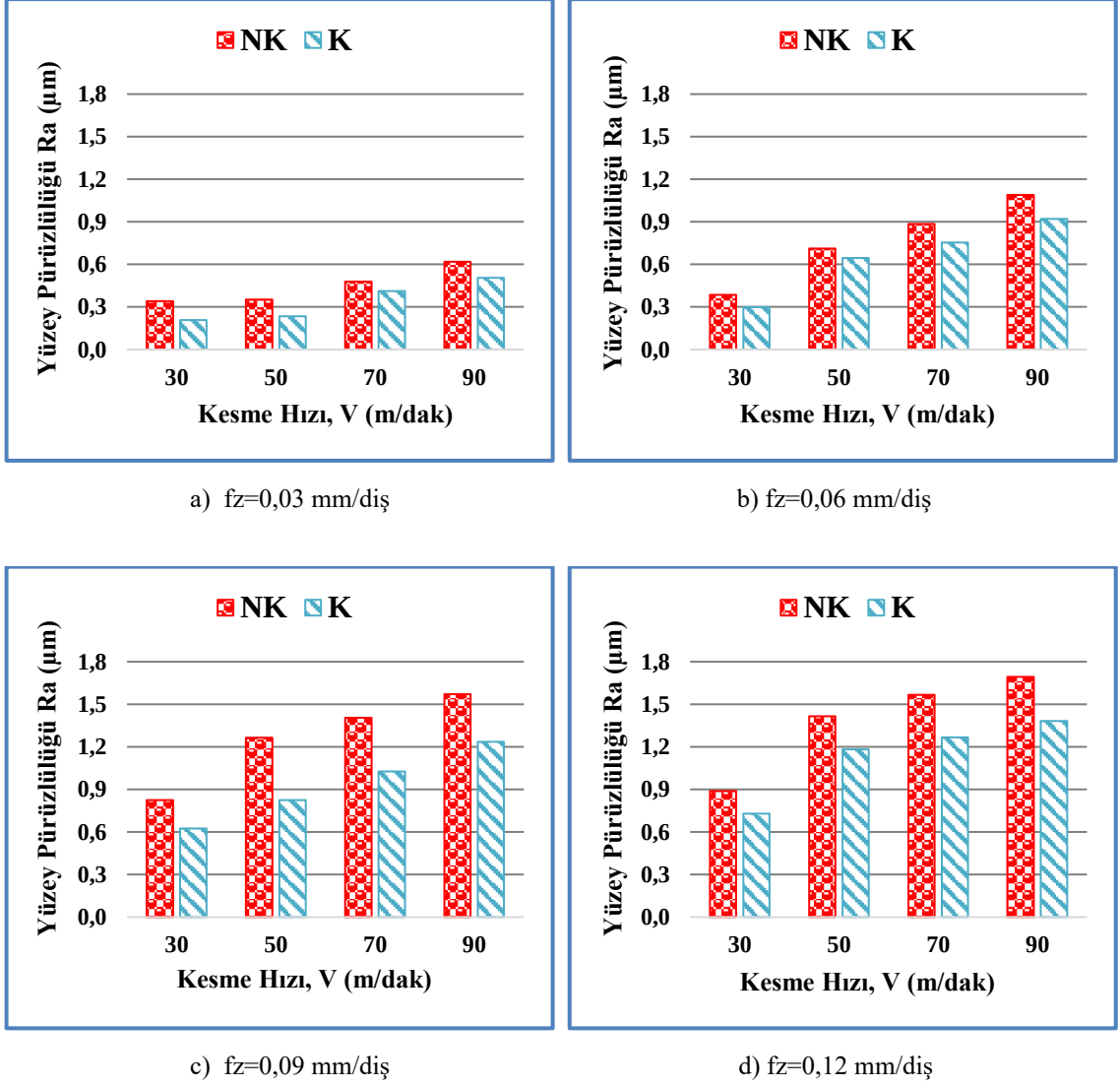
c) V=70 m/dk



d) V=90 m/dk

Şekil 5. 1. Farklı ilerleme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri

Farklı ilerleme hızlarında elde edilen Ra değerleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.1’de verilen Ra grafikleri incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar ile literatürdeki sonuçlar birbirleriyle benzerlik göstermiştir (Duc vd., 2021; Gürbüz ve Gönülaçar, 2022; Passari vd., 2022). İlerlemenin artması ile birim zamanda kesilen talaş miktarı artar. Buda yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına sebep olur (Duc vd., 2021; Gürbüz ve Gönülaçar, 2022; Passari vd., 2022).



Şekil 5. 2. Farklı kesme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri

Farklı kesme hızlarında elde edilen Ra değerleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2’de verilen Ra grafikleri incelendiğinde kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmektedir. Farklı tür çeliklerin ayrı ayrı mekanik özellikleri vardır. Bu özelliklerine bağlı olarak farklı işlenebilirliklere sahiptirler. İşlenen çeliğin bu özellikleri işleme şartlarına bağlı olarak yüzeyin pürüzlülüğünü etkileyebilir (Değirmenci ve ark., 2023). İşlenmesi zor bir malzeme işlenirken kesici takıma aşırı termal ve mekanik yükler biner. Bu yükler kesici takım ile iş parçası arasında sürtünmeye ve aşınmaya yol açar (Aslan, 2024). Kesme hızının artması, daha hızlı hareket sebebiyle sürtünme katsayısını artırır ve yüksek kesme sıcaklıkları oluşturur (Aslan, 2024). Kesme sıcaklığı işlenmiş yüzeyin kalitesini etkiler. Yüksek kesme sıcaklıkları işlenmiş yüzeyde termal deformasyonlara ve talaş yapışmasına sebep olabilir, bu da yüzey pürüzlülüğünü

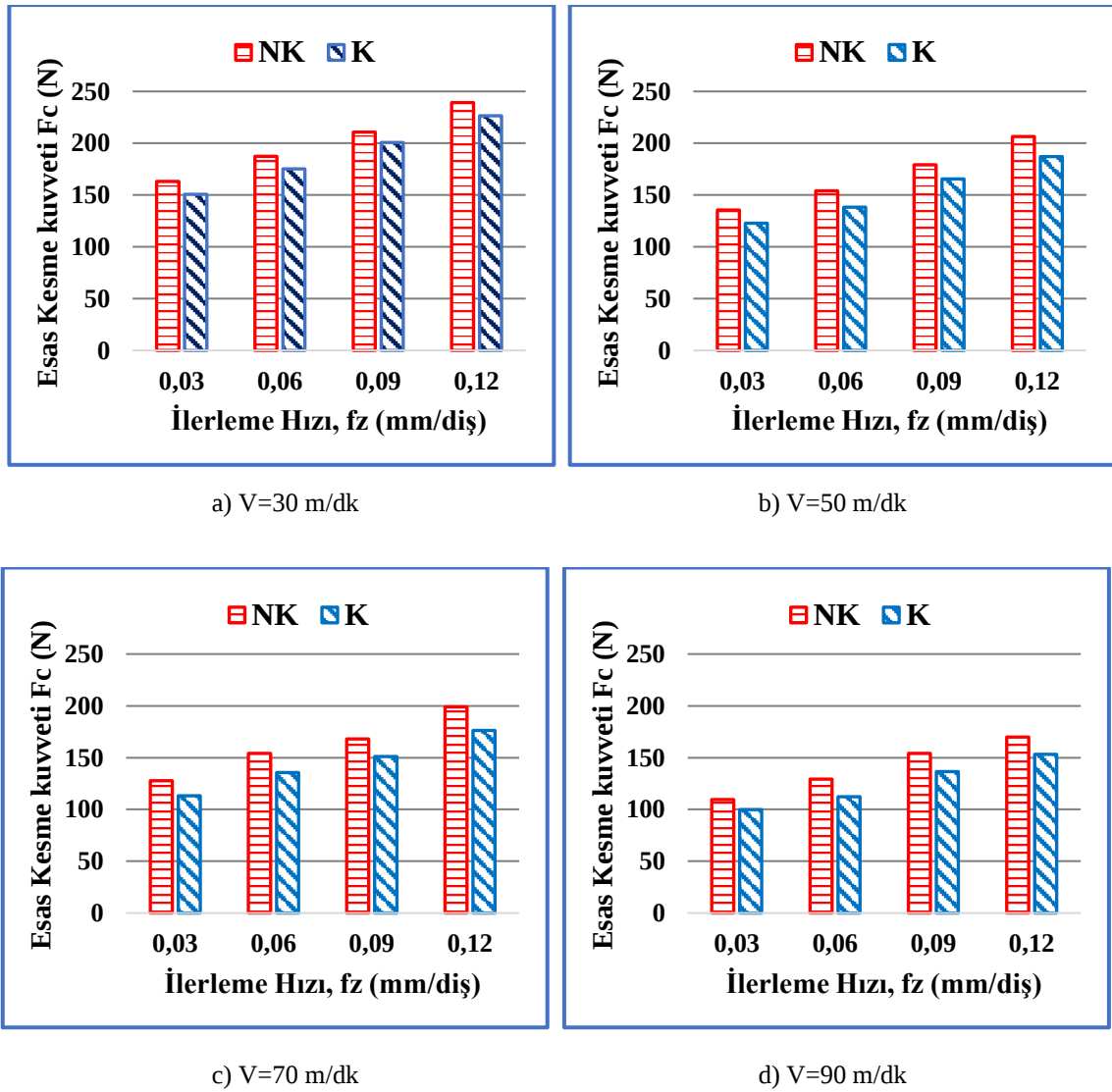
artırabilir (Değirmenci ve ark., 2023). Bu sebeple kesme hızının artması işlenmiş yüzeylerde oluşan yüzey pürüzlülük değerlerini arttırmıştır.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'deki Ra grafikleri değerlendirildiğinde en düşük Ra değeri kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımla 0,03 mm/diş ilerleme ve 30 m/dk kesme hızında elde edilirken en yüksek Ra değeri ise kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takımla 0,12 mm/diş ilerleme ve 90 m/dk kesme hızında elde edilmiştir. Kriyojenik işlemin etkisini görmek için Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'deki Ra grafikleri incelendiğinde kriyojenikli kesici takım ile işlenmiş yüzeylerden elde edilen Ra değerleri kriyojeniksiz kesici takımlarla işlenmiş yüzeylerden elde edilen Ra değerlerinden daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Bu sonuç literatür ile paralellik göstermektedir (Dhananchezian ve vd., 2011; Mavi ve Korkut, 2014; Mukkoti vd.,2018; Patil vd.,2020). Kriyojenik işlem uygulama, kesici takımların ısı iletkenliklerini iyileştirmesi, düşük kesme sıcaklıkları oluşturması ve aşınma dirençlerinin arttırılmasını sağlar. Bu özelliklerinden dolayı kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla işlenen malzemelerde daha düşük yüzey pürüzlülükleri oluşur (Dhananchezian ve vd., 2011; Mavi ve Korkut, 2014; Mukkoti vd., 2018; Patil vd., 2020).

5.2. Esas Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

Sabit kesme derinliğinde, farklı ilerleme ve kesme hızlarında kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımlarla işlenen HARDOX 450 iş parçasının frezelenmesi sonucu esas kesme kuvvetleri (F_c) elde edilmiştir. Dört farklı ilerleme (0,03 - 0,06 - 0,09 - 0,12 mm/diş), dört farklı kesme hızı (30 - 50 - 70 ve 90 m/dk) ve sabit kesme derinliğinde (1,2 mm) frezeleme deneyleri yapılmıştır. Her bir deney esnasında kesici uç değiştirilerek eşit deney şartları sağlanmıştır. Kesme parametrelerinin ve kriyojenik işlemin F_c üzerindeki etkisini görmek için elde edilen F_c değerleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekil 5.3'teki F_c değerleri incelendiğinde ilerleme hızının artışına bağlı olarak F_c değerleri artmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür çalışmalarındaki sonuçlar ile benzerlik göstermiştir (Coşkun vd., 2021; Gökçe vd., 2019; Korkut ve Dönertaş, 2003). İlerleme hızının artması talaş kesitinin ve birim zamanda kaldırılan talaş miktarının artmasına sebep olmaktadır. Bu durumda talaş kaldırmak için gerekli enerjiyi artırarak F_c değerinin artmasına sebep olmaktadır (Coşkun vd., 2021; Gökçe vd., 2019; Korkut ve Dönertaş, 2003).

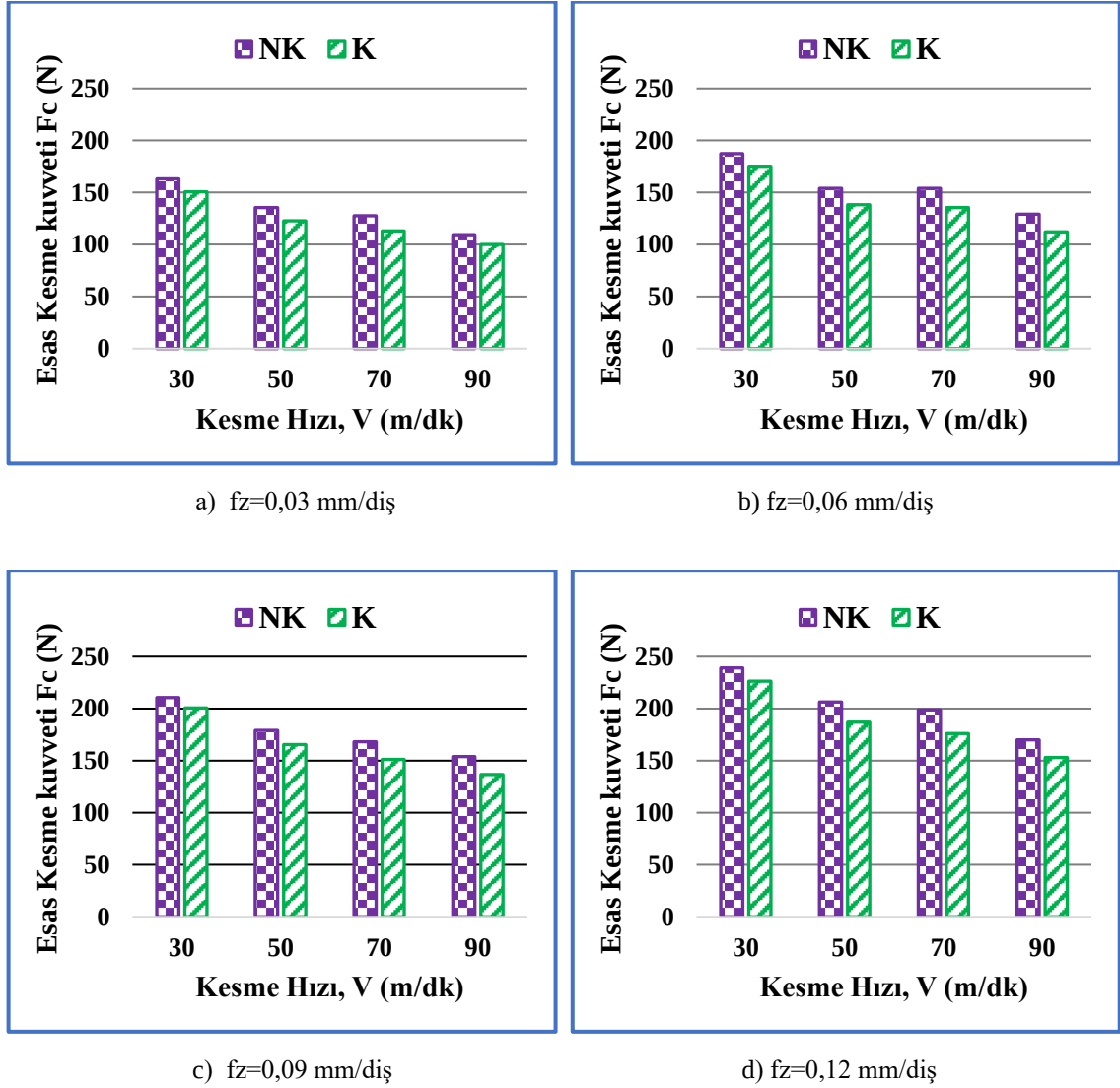
Kesme hızındaki değişikliklere bağlı olarak elde edilen esas kesme kuvvetlerindeki değişim, Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekil 5.4'teki grafikler incelendiğinde kesme hızı arttıkça F_c değerinin düştüğü görülmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında sonuçlar paralellik göstermektedir (Coşkun vd., 2021; Yılmaz vd., 2014). Kesme hızındaki artışa bağlı olarak F_c değerlerinde gözlenen azalma, takım-talaş arayüzündeki temas alanının küçülmesi ve artan kesme hızıyla birlikte oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle takım-talaş arayüzüne yapışan malzemenin kayma dayanımının azalmasıyla ilişkilendirilebilir (Coşkun vd., 2021; Yılmaz vd., 2014).



Şekil 5. 3. Farklı ilerleme hızlarında elde edilen esas kesme kuvvetlerinin değişim grafikleri

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilen grafikler incelendiğinde en düşük F_c değerinin (99,9 N) kriyojenik işlem görmüş takımlarla, en yüksek F_c değerinin (239 N) ise

kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takımlarla işleme sonucu meydana geldiği görülmektedir. Literatürde çalışmaları buna paralellik göstermektedir (Akıncıoğlu ve ark., 2015; Mavi ve Korkut, 2014; Varghese vd., 2019). Bunun nedeni kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımlarda mikroyapının daha kararlı duruma gelmesi, kesici takımın aşınmasının azalması ve işleme esnasında kesici kısmın az bozulması ile açıklanabilir (Akıncıoğlu ve ark., 2015; Mavi ve Korkut, 2014; Varghese vd., 2019).

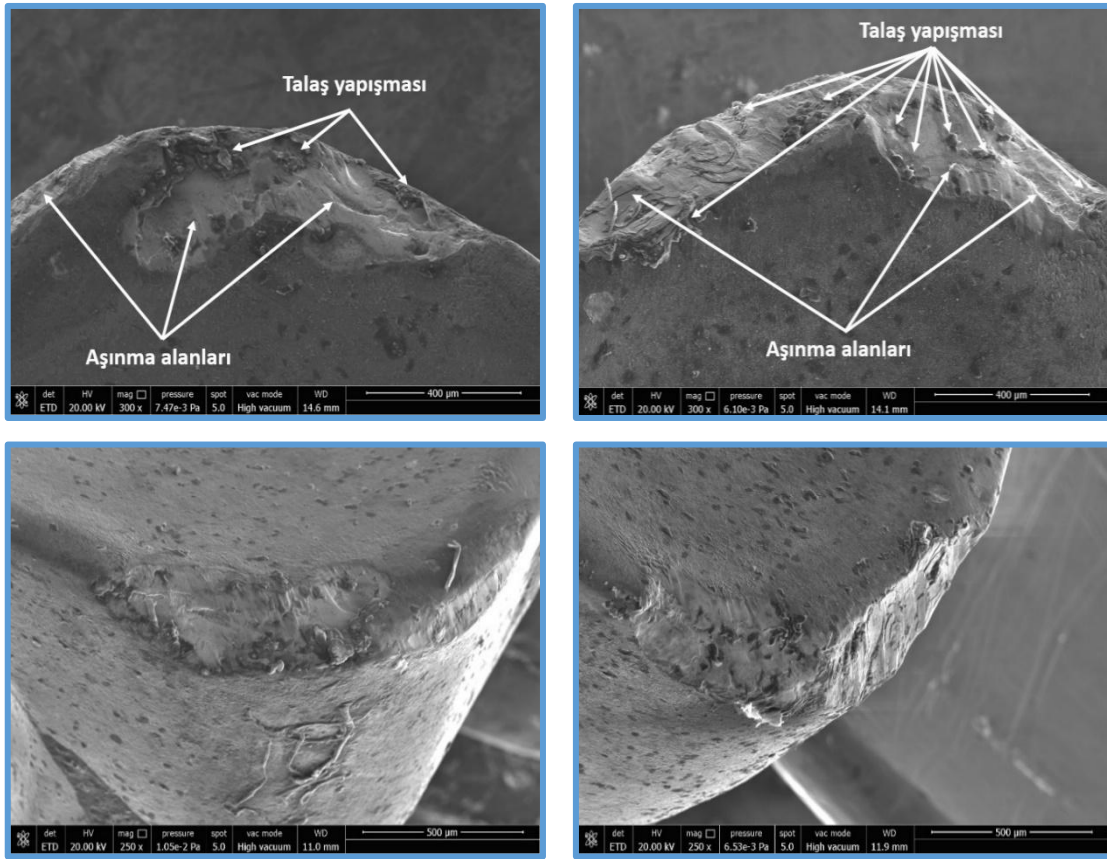


Şekil 5. 4. Farklı kesme hızlarında elde edilen esas kesme kuvvetlerinin değişim grafikleri

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'teki grafikler değerlendirildiğinde kesme parametreleri bakımından en düşük Fc değeri, 0,03 mm/diş ilerleme ve 90 m/dk kesme hızı parametreleri ile kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımlarda meydana gelmiştir. En yüksek Fc değeri ise 0,12 mm/diş ilerleme ve 30 m/dk kesme hızı parametreleri ile kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takımlarda olduğu görülmüştür.

5.3. Kesici Takım Aşınmasının Değerlendirilmesi

Bu bölümde kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımlarla Hardox 450 çeliğinin frezelenmesi sonucu kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar değerlendirilmiştir. Kesici takım aşınma deneyleri, kuru işleme şartlarında 0,12 mm/diş ilerleme, 90 m/dk kesme hızı ve 1,2 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımlarda meydana gelen aşınma düzeylerini karşılaştırmak amacıyla iş parçalarından 300 mm işleme boyuyla eşit hacimde (4301 mm^3) talaş kaldırılmıştır. Bu işlemler sonrasında kesici takımların aşınma düzeyini belirlemek için SEM görüntüleri alınmış ve ayrıca EDS analizleri yapılmıştır. Kesici takımların SEM görüntüleri Şekil 5.5'te, EDS analizleri ve sonuçları Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmiştir.

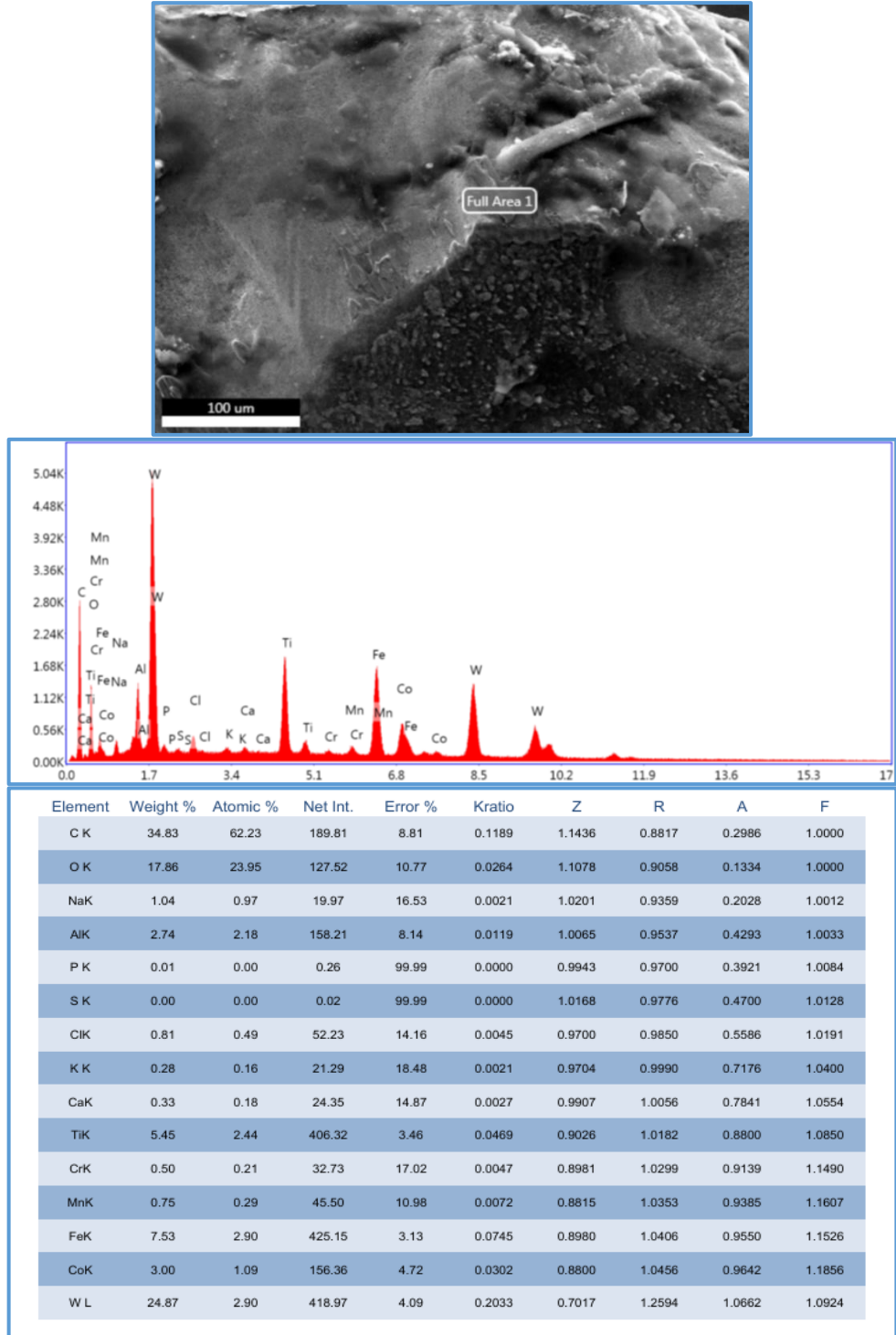


a)

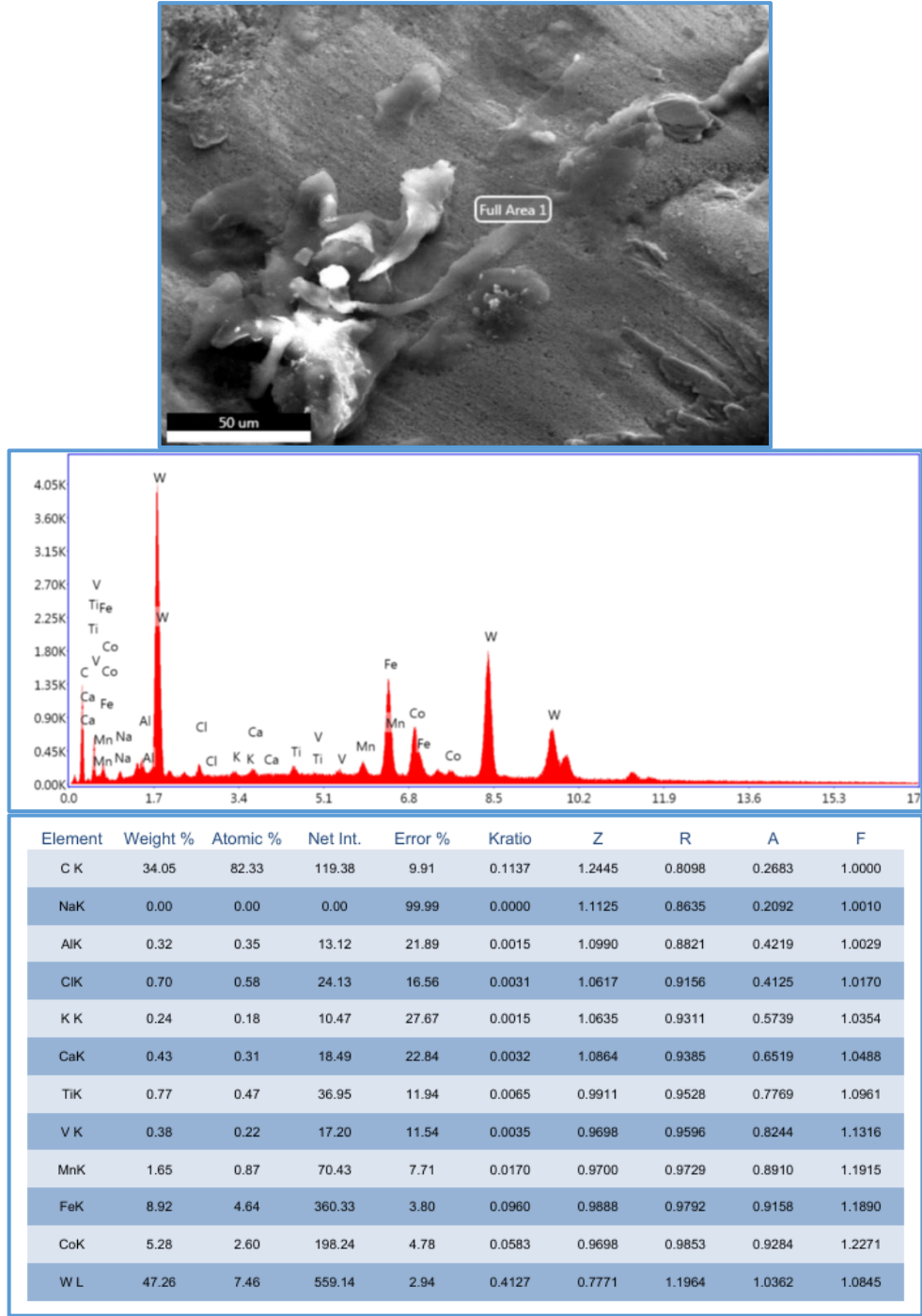
b)

Şekil 5.5. İş parçasının $V=90 \text{ m/dk}$, $f_z=0,12 \text{ mm/diş}$ ve $a=1,2 \text{ mm}$ parametreleri ile 4301 mm^3 hacminde talaş kaldırılması sonucu kesici takımlarda oluşan aşınmanın SEM mikroskopu altındaki görüntüleri a) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım b) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım

Şekil 5.5'e bakıldığında kriyojenik işlem gören ve görmeyen takımlarda meydana gelen tüm aşınmalarının genellikle burun ve krater aşınması olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem görmemiş kesici takımlarda meydana gelen aşınma miktarının kriyojenik işlem görmüş kesici takıma göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarda meydana gelen düşük aşınmalar literatür ile benzerlik göstermektedir. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem, kesici takımların tokluğunu, mikrosertlik değerini ve aşınma dirençlerini artırır. Bunun sonucu olarak kesici takımların ömürleri artar (Gürbüz ve Baday, 2021; Varghese vd., 2019). Ayrıca kriyojenik işlem kesici takımların iç yapısındaki taneciklerin uygun hizalanmasını sağlar bu da kesici takımın termal iletkenliğinin artmasına ve takımın uc kısmındaki sıcaklıkların daha az olmasına sebep olur. Kesici takımın uc kısmında meydana gelen sıcaklıkların daha düşük olması takımın yüksek kesme hızlarında daha az plastik deformasyona uğramasını sağlar (Mukkoti vd., 2018). Kriyojenik işlem görmemiş kesici takımın, kriyojenik işlem görmüş kesici takıma göre yüzeyinde daha fazla BUE (Yığıntı talaş oluşumu) oluşumundan dolayı talaş yapışmaları olduğu görülmektedir. Bu durum literatürle benzerlik göstermektedir (Babu vd., 2024; Gürbüz ve Baday, 2021). Talaş kaldırma işlemi esnasında kesici takım ile iş parçası arasında oluşan yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle malzeme eriyerek kesici takım kenarında yığıntı talaş oluşur. Bu olay kesici takımın kesme performansını düşürür. Kriyojenik işlem görmüş kesici takımın ısı iletkenliği, tokluğu ve aşınma direnci kesme esnasında BUE oluşumunu azaltır (Babu vd., 2024; Gürbüz ve Baday, 2021). Kesici takım üzerinde yapılan EDS analiz sonuçları Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmiştir. EDS analizi sonucu elde edilen element bileşiminin kesici takım bileşimine benzer olduğu görülmektedir.



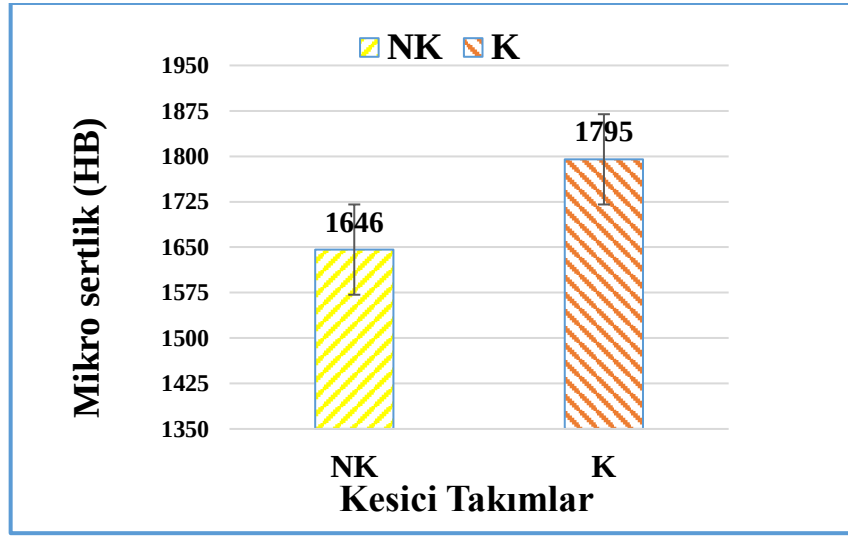
Şekil 5. 6. Kesici takım aşınma deneylerinde kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takıma uygulanan EDS analiz yeri ve sonuçları



Şekil 5. 7. Kesici takım aşınma deneylerinde kriyojenik işlem uygulanmış kesici takıma uygulanan EDS analiz yeri ve sonuçları

5.4. Mikrosertlik Analizi

Hardox 450 çeliğinin frezelenmesinde kullanılan kriyojenikli ve kriyojeniksiz kesici takımların mikrosertlik değerleri Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Şekil 5.8’de gösterilen bu mikrosertlikler kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımların üzerinden beş farklı noktadan ölçülen değerlerdir. Ölçülen değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak kesici takımların mikrosertlik değerleri hesaplanmıştır. Buna göre kriyojenik işlem görmüş kesici takımın mikrosertlik değeri 1795 HB, kriyojenik işlem görmemiş takımın mikrosertlik değeri 1646 HB olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında kriyojenik işlemin kesici takımın mikrosertlik değerini % 9 oranında arttırdığı ortaya çıkmıştır. Literatürde kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin mikrosertliği arttırdığı yer almaktadır. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem, kalıntı östenit yapının martenzite dönüşmesi ve ikincil karbür çökelmelerinin oluşmasıyla malzemede yüksek aşınma direnci oluşturur (Mukkoti vd., 2018; Özbek vd., 2014; Varghese vd., 2019).



Şekil 5. 8. Kesici takımların mikrosertlik değerleri

5.5. Talaş Morfolojisinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, iş parçası üzerinde yapılan deneylerde kullanılan en yüksek ve en düşük kesme parametreleri ile elde edilen talaşlar incelenmiştir. İşleme deneyleri K ve NK kesici takımlarla kuru işleme şartlarında yapılmıştır. Talaşlar, en düşük ($V = 30$ m/dk, $f_z = 0,03$ mm/diş ve $a_p = 1,2$ mm) ve en yüksek ($V = 90$ m/dk, $f_z = 0,12$ mm/diş ve $a_p = 1,2$ mm) kesme parametrelerinde elde edilmiştir. Elde edilen talaşların fotoğrafları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da, SEM görüntüleri, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de ve EDS analizleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir.



a)



b)

Şekil 5. 9. İş parçasının $V = 30$ m/dk, $f_z = 0,03$ mm/diş ve $a_p = 1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşlar a) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu



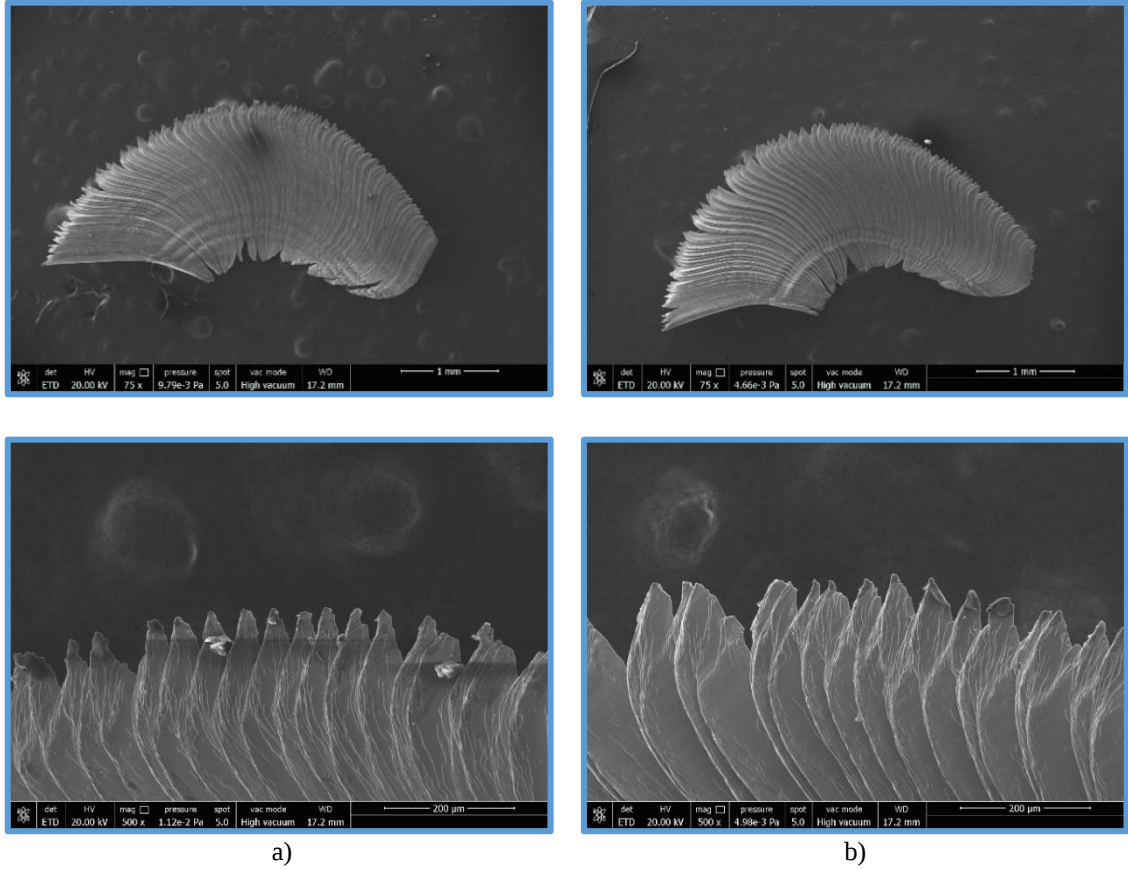
a)



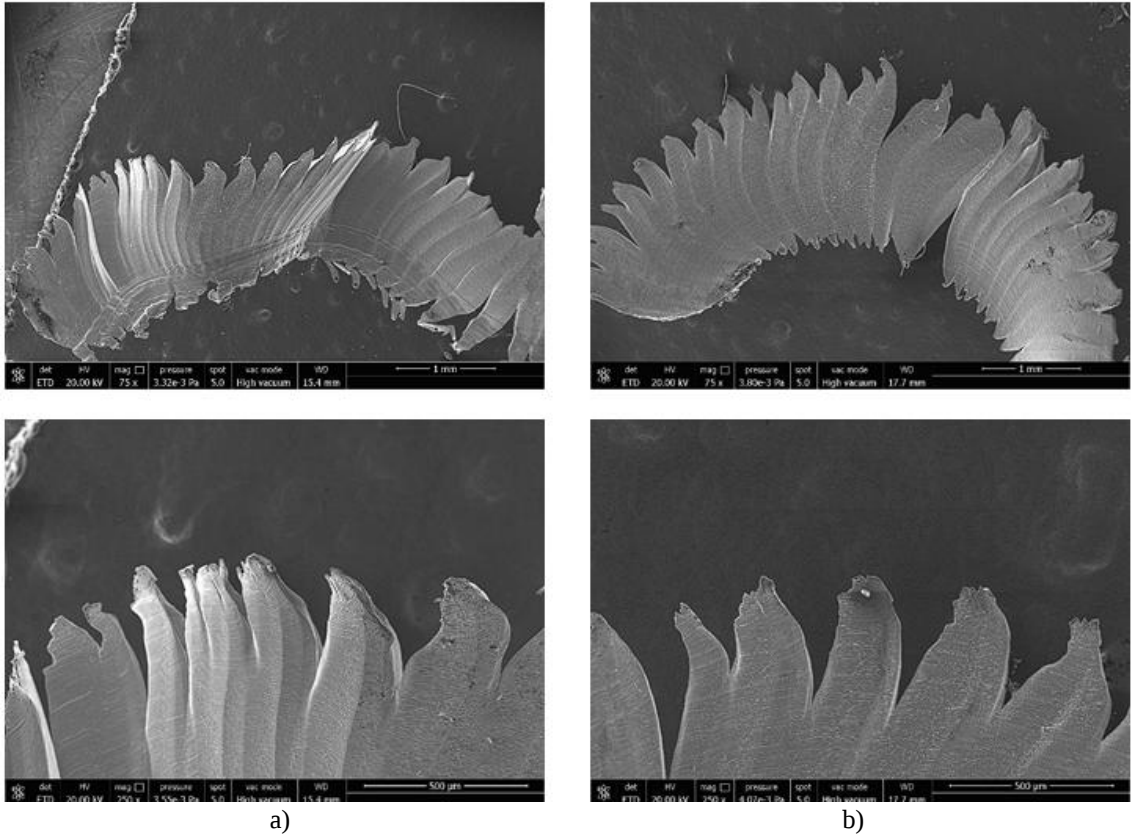
b)

Şekil 5. 10. İş parçasının $V = 90$ m/dk, $f_z = 0,12$ mm/diş ve $a_p = 1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşlar a) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'daki talaş örnekleri incelendiğinde yapılan deneylerin en düşük ($V= 30$ m/dk, $f= 0,03$ mm/diş ve $a=1,2$ mm) parametresi ile elde edilen talaşın süreksiz talaş (c tipi) olduğu görülmektedir. En yüksek ($V= 90$ m/dk, $f= 0,12$ mm/diş ve $a=1,2$ mm) parametreleri ile yapılan deneylerde ise yarı sürekli talaş tipine doğru eğilim gösterdiği görülmektedir. Yapılan işleme deneyleri sonucunda elde edilen talaş tipi üzerinde ilerleme ve kesme hızının etkili olduğu tespit edilmiştir.



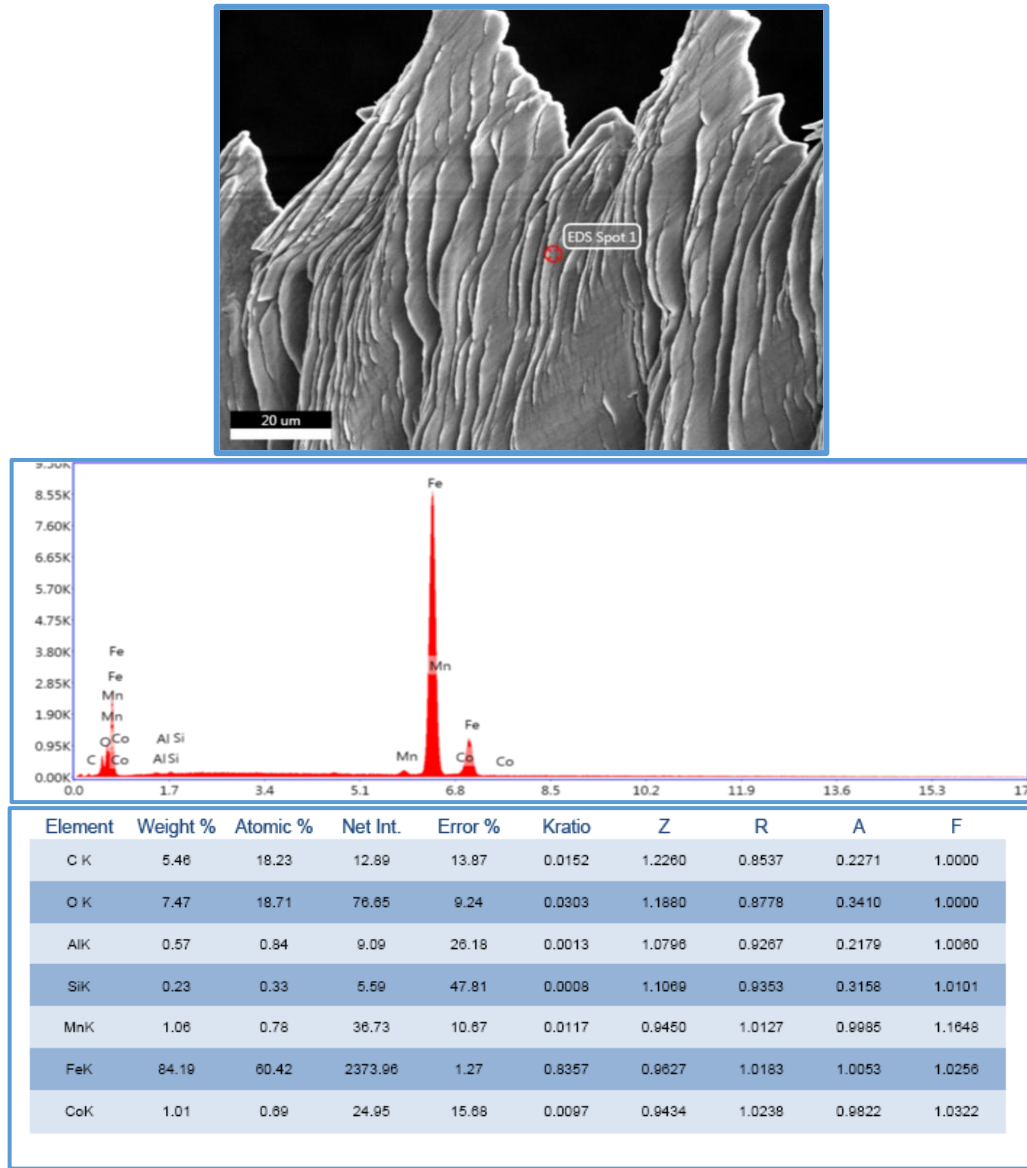
Şekil 5. 11. İş parçasının $f_z= 0,03$ mm/diş, $V= 30$ m/dk ve $a_p=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların SEM görüntüleri a) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu



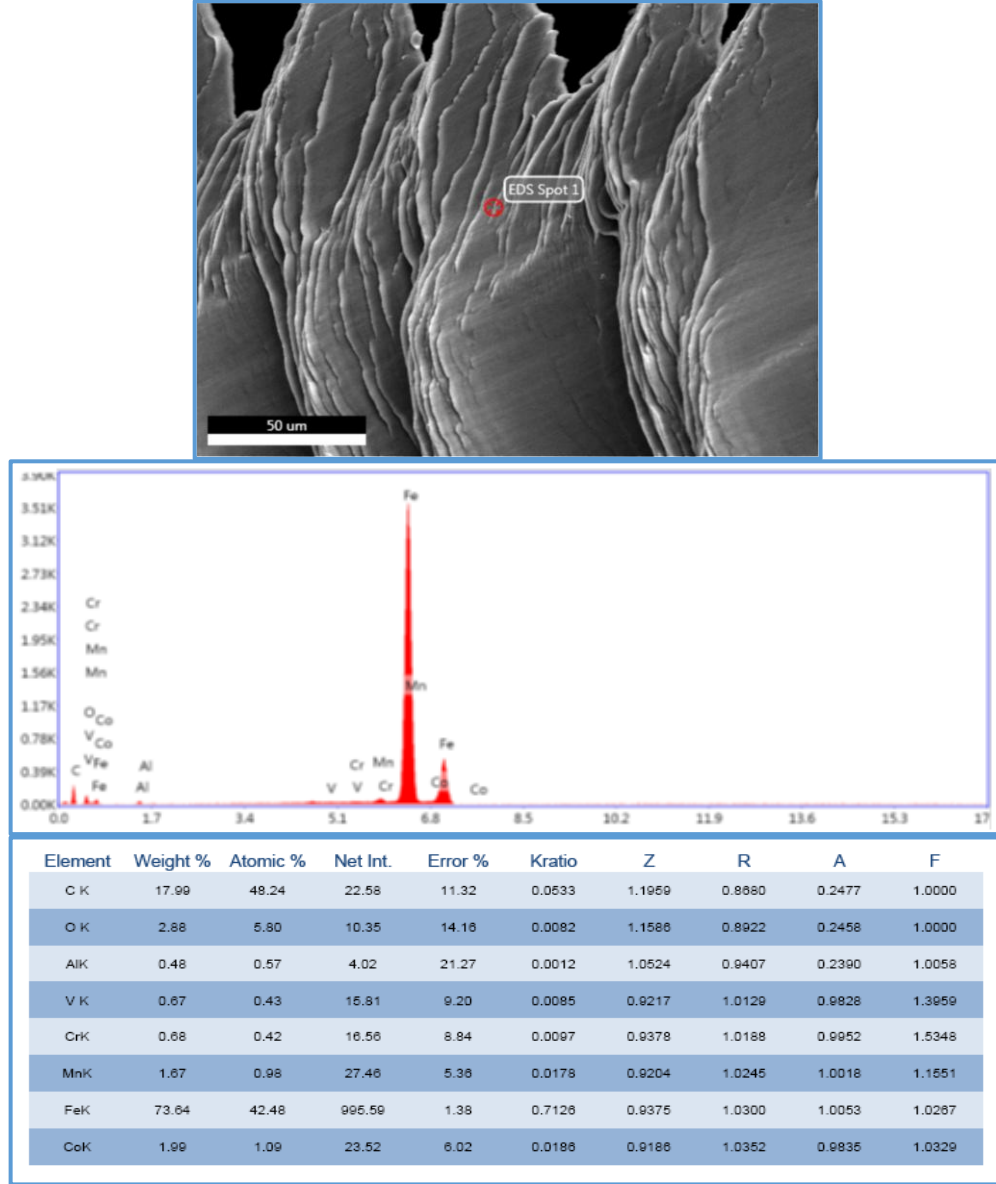
Şekil 5. 12. İş parçasının $f_z = 0,12$ mm/diş, $V = 90$ m/dk ve $a = 1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların SEM görüntüleri a) kriyojenik işlem uygulanmış kesici takım ile işleme sonucu b) kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takım ile işleme sonucu

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'deki SEM görüntülerine bakıldığında oluşan talaşların testere tip (tırtıklı) talaş ve lamelli yapıda olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuç literatür ile benzerlik göstermektedir. Kesilmesi zor malzemelerde derin ve düzensiz tırtıklar oluşmaktadır. Bu talaşlar genellikle “c” tipi ve kırık talaş şeklindedir (Khanna vd., 2022; Kuntoğlu, 2022). Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilen görüntüler incelendiğinde kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla elde edilen talaşların tırtıklı yapıları ise daha düzenli ve lamel derinliklerinin az olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanmamış takımlarla elde edilen talaşların ise lamel yapıları daha derin ve düzgün olmayan tırtıklı bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca talaş üzerinde eriyerek başka bölgelere yapışan parçacıkların bulunduğu görülmektedir. Şekil 5.12 incelendiğinde daha yüksek kesme ve ilerleme şartlarında tırtıklı yapının daha fazla bozulduğu görülmektedir. Lamelli yapının derinliğinin ve lameller arası boşluğun arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç literatür ile benzerlik göstermektedir (Khan vd., 2017; Patil vd., 2020). Kesme hızındaki artış talaş genişliğini artırarak tırtıklı talaş boyunu genişletmiştir. Kriyojenik takımın

sahip olduğu yüksek aşınma direnci, sertliği ve tokluğu talaşın daha az tırtıklı yapıda olmasını sağlamıştır (Khan vd., 2017; Patil vd., 2020).



Şekil 5. 13. İş parçasının kriyojenik işlem uygulanmamış takımla, $f_z = 0,03$ mm/diş, $V = 30$ m/dk ve $a_p = 1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların EDS analiz yeri ve sonuçları



Şekil 5. 14. İş parçasının kriyojenik işlem uygulanmış takımla, $f_z=0,03$ mm/diş, $V=30$ m/dk ve $a_p=1,2$ mm parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan talaşların EDS analiz yeri

En düşük ($f_z=0,03$ mm/diş, $V=30$ m/dk ve $a_p=1,2$ mm) ve en yüksek ($f_z=0,12$ mm/diş, $V=90$ m/dk ve $a_p=1,2$ mm) kesme parametreleri ile elde edilen talaşların EDS analizleri yapılmıştır. EDS analizlerinin yapıldığı bölgeler ve element içeriğini veren sonuçlar Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir. EDS analizi sonucu elde edilen element bileşiminin “Hardox 450” çeliğinin bileşimine benzer olduğu görülmektedir. Elde edilen bu bulgular ışığında en düşük ve en yüksek deney parametreleri ile yapılan frezeleme işlemlerinde çıkan talaşların “Hardox 450” çeliğine ait olduğu tespit edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Yapılan bu deneysel çalışmada, Hardox 450 çeliğinin kuru işleme şartlarında ve farklı kesme parametreleri kullanılarak kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kesici takımlarla frezelenmesi deneylerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü, talaş morfolojisi, esas kesme kuvveti, takım aşınması ve mikrosertlik sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yapılan deneylerde ilerleme ve kesme hızlarının artması ile Ra değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla yapılan tüm deneylerde genel olarak Ra değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- En düşük Ra değeri 0,03 mm/diş ilerleme ve 30 m/dk kesme hızı parametreleri ile kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımla, en yüksek Ra değeri ise 0,12 mm/diş ilerleme ve 90 m/dk kesme hızı parametreleri ile kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takımla elde edilmiştir.
- Farklı kesme parametrelerinde yapılan deneylerde, kesme hızı arttıkça Fc değerlerinin düştüğü ve ilerleme hızı arttıkça Fc değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Tüm işleme şartlarında kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla yapılan deneylerde Fc değerlerinin genel olarak azaldığı tespit edilmiştir.
- En düşük Fc değeri, 0,03 mm/diş ilerleme ve 90 m/dk kesme hızı parametreleri ile kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımla, en yüksek Fc değeri ise 0,12 mm/diş ilerleme ve 30 m/dk kesme hızı parametreleri ile kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takımla elde edilmiştir.
- Takım aşınma deneylerinde, kriyojenik işlem görmemiş kesici takımın aşınmasının, kriyojenik işlem görmüş kesici takıma göre daha fazla olduğu görülmüştür. Yapılan deneylerde kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar genel olarak burun aşınması, krater aşınması ve BUE olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlem görmüş kesici takımların mikrosertlik değerinin 1795 HB, kriyojenik işlem görmemiş kesici takımların mikrosertlik değerinin

ise 1646 HB olduğu tespit edilmiştir. Buna göre kriyojenik işlemin mikrosertlik değerini %9 oranında arttırdığı görülmüştür.

- En düşük kesme parametrelerinde yapılan deneylerde elde edilen talaşlar süreksiz (c tipi) talaş türünde olduğu, en yüksek kesme parametrelerinde yapılan deneylerde ise yarı sürekli (yarı spiral) talaş türünde olduğu tespit edilmiştir.
- Talaşların SEM görüntüleri incelendiğinde kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla elde edilen talaşların yapısındaki lamellerin daha düzgün ve lamel derinliklerinin daha az olduğu görülmüştür. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olmasını desteklemektedir.
- Yapılan tüm deneylerde en iyi deney sonuçları kriyojenik işlem görmüş kesici takımlarla elde edilmiştir.

6.2 Öneriler

Hardox 450 iş parçasının frezeleme işlemlerinde kriyojenik işlemin ve kesme parametrelerinin deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla elde edilen bulgular doğrultusunda, gelecekteki çalışmalara katkı sağlayabilecek aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Kriyojenik işlemin talaş kaldırma sürecinde oluşan sıcaklık ve titreşim üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılabilir.
- Farklı soğutma yöntemlerinde Hardox 450 iş parçasının frezelenmesi araştırılabilir.
- Kriyojenik işlemin özellikle işlenmesi zor olan iş parçalarına uygulanarak işlenebilirlik üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Hem iş parçasına hem de kesici takıma kriyojenik işlem uygulanarak deneysel sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Aslan, A. (2024). Machine learning models and machinability analysis for comparison of various cooling and lubricating mediums during milling of Hardox 400 steel. *Tribology International*, 1-15.
- Akıncioğlu, S., Gökkaya, H., & Uygur, İ. (2015). A review of cryogenic treatment on cutting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 1609-1627.
- Akıncioğlu, S., Gökkaya, H., & Uygur, İ. (2016). The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 303-314.
- Babu, N., Nair, K. V., Kallorath, K. K., Arulprakasam, S., & Ullattil, S. (2024). Performance Analysis of TiAlSiN Coated Tungsten Carbide End Milling Tool Subjected to Shallow and Deep Cryogenic Treatments *Materials Research*, 27, e20240133.
- Bal, K. S. (2012). *Performance appraisal of cryo-treated tool by turning operation* (Doctoral dissertation).
- Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(8), 833-844.
- Bensaid, K., Dhiflaoui, H., Bouzaïene, H., Yahyaoui, H., & Fredj, N. B. (2021). Effects of the cooling mode on the integrity and the multi-pass micro-scratching wear resistance of Hardox 500 ground surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2865-2882.
- Choudhury, I. A., & El-Baradie, M. A. (1997). Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. *Journal of materials processing technology*, 67(1-3), 55-61.
- Coelho, R. T., de Souza, A. F., Roger, A. R., Rigatti, A. M. Y., & de Lima Ribeiro, A. A. (2010). Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 1103-1111.
- Coşkun, M., Çiftçi, İ., & Demir, H. (2021). AISI P20S kalıp çeliğinin işlenebilirliğinin incelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(2), 1-9.
- Çakır, M. C. (1999). *Modern talaşlı imalatın esasları*. Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayınları, Bursa, 140, 1-110.
- Çakır, M. C. (2000). *Modern talaşlı imalat yöntemleri*. Vipaş, Bursa, 219-346.

- Celik, O. N., Sert, A., Gasan, H., & Ulutan, M. (2018). Effect of cryogenic treatment on the microstructure and the wear behavior of WC-Co end mills for machining of Ti6Al4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 2989-2999.
- Çiftçi, İ. (2005). Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2), 205-209.
- Davim, J. P., Astakhov, V. P., & Davim, J. P. (2008). Tools (geometry and material) and tool wear. *Machining: fundamentals and recent advances*, 29-57.
- Değirmenci, Ü. Usca, Ü.A. ŞAP, S. (2023). *Determination of Tool Wear, Surface Roughness and Cutting Temperature Parameters in Milling St37 Steel*. 7th International Conference on Engineering Technologies (ICENTE) (233-237). Konya, Turkey
- Demir, H., Ulaş, H. B., & Zeyveli, M., (2009). *Stavax Esr Çeliğinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetleri Açısından Değerlendirilmesi*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Turkey
- Dhananchezian, M., Kumar, M. P., & Sornakumar, T. (2011). Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(5), 781-785.
- Duc, T. M., Long, T. T., & Tuan, N. M. (2021). Novel uses of Al₂O₃/MoS₂ hybrid nanofluid in MQCL hard milling of Hardox 500 steel. *Lubricants*, 9(4), 45.
- Ekici, E., & Uzun, G. (2022). Effects on machinability of cryogenic treatment applied to carbide tools in the milling of Ti6Al4V with optimization via the Taguchi method and grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(7), 270.
- Eksilmez, N., Özlü, B., & Demir, H. (2022). Hardox 500 Çeliğinin Lazerle İşlenmesinde Kesme Geometrisine ve İşleme Parametrelerine Bağlı Kesim Kalitesinin Değerlendirilmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 301-314.
- Emre, İ. E. (2019). *Kırma ve öğütme sistemlerinde hardox 450 ve 20mncr5 çeliklerinin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu* (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- Firouzdor, V., Nejati, E., & Khomamizadeh, F. (2008). Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill. *Journal of materials processing technology*, 206(1-3), 467-472.
- Gezgin, A., (2007). *Prizmatik Parçaların Frezelenmesi Esnasında, Kesici Uç Sayısının Takım Ömrü ve Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Değerlendirilmesi*. Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112s, Ankara.

- Gill, S. S., Singh, R., Singh, H., & Singh, J. (2009). Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3-4), 256-260.
- Gill, S. S., Singh, J., Singh, H., & Singh, R. (2012). Metallurgical and mechanical characteristics of cryogenically treated tungsten carbide (WC-Co). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, 119-131.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- Gökçe, H., Çiftçi, İ., & Gökçe, H. (2019). Frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi: saf molibdenin işlenmesi üzerine bir çalışma. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 947-954.
- Gürbüz, H., & Baday, Ş. (2021). Inconel 718 iş parçasını kriyojenik olarak işlenmiş ve işlenmemiş kesici aletlerle frezeleme. *Uluslararası İleri İmalat Teknolojisi Dergisi*, 116, 3135-3148.
- Gürbüz, H. Gönülaçar, Y. E. (2022). Experimental and statistical investigation of the effects of MQL, dry and wet machining on machinability and sustainability in turning of AISI 4140 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(5), 1808-1823.
- Kalsi, N. S., Sehgal, R., & Sharma, V. S. (2010). Cryogenic treatment of tool materials: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(10), 1077-1100.
- Kara, F. (2018). Optimization of cutting parameters in finishing milling of Hardox 400 steel. *Int J Anal Exp Finite Elem Anal*, 5(3), 44-49.
- Kara, F., Karabatak, M., Ayyıldız, M., & Nas, E. (2020). Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 969-983.
- Kıvak, T., Şeker, U., 2015, Effect of cryogenic treatment applied to M42 HSS drills on the machinability of Ti-6Al-4V alloy, *Materials and technology*, 49 (6), 949–956.
- Khanna, N., Airao, J., Nirala, C. K., & Krolczyk, G. M. (2022). Novel sustainable cryo-lubrication strategies for reducing tool wear during ultrasonic-assisted turning of Inconel 718. *Tribology International*, 174, 107728.
- Khan, A., & Maity, K. (2017). Comparative study of some machinability aspects in turning of pure titanium with untreated and cryogenically treated carbide inserts. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 272-284.
- Korkut, İ., & Dönertaş, M. A. (2003). Kesme parametrelerinin frezelemede oluşan kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri. *Politeknik dergisi*, 6(1), 385-391.

- Krolczyk, G. M., Krolczyk, J. B., Maruda, R. W., Legutko, S., & Tomaszewski, M. (2016). Metrological changes in surface morphology of high-strength steels in manufacturing processes. *Measurement*, 88, 176-185.
- Kuntoglu, M. (2022). Machining induced tribological investigations in sustainable milling of Hardox 500 steel: A new approach of measurement science. *Measurement*, 201, 111715.
- Kursuncu, B., Caliskan, H., Guven, S. Y., & Panjan, P. (2018). Improvement of cutting performance of carbide cutting tools in milling of the Inconel 718 superalloy using multilayer nanocomposite hard coating and cryogenic heat treatment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 467-479.
- Kurşuncu, B. (2020). Kriyojenik ısıtma işlemi ısıtma periyodu ve sıcaklığının Inconel 718 frezelemede sinterlenmiş karbür kesici takımların performansına etkisi. *Uluslararası Refrakter Metaller ve Sert Malzemeler Dergisi*, 92, 105323.
- Kwon, Y. (2000). *Robust control of surface roughness in a turning operation*. The University of Iowa.
- Majerik, J., & Barenji, I. (2016). Experimental investigation into tool wear of cemented carbide cutting inserts when machining wear resistant steel Hardox 500. *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva*, 36(2), 167-174.
- Mavi, A., Korkut, I., 2014, Machinability of a Ti-6Al-4V alloy with cryogenically treated cemented carbide tools, *Materials and technology*, 48 (4), 577–580.
- Moayyedean, M., Mohajer, A., Kazemian, M. G., Mamedov, A., & Derakhshandeh, J. F. (2020). Surface roughness analysis in milling machining using design of experiment. *SN Applied Sciences*, 2, 1-9.
- Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini, G., & Stiasny, K. H. (2001). Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. *Journal of materials processing technology*, 118(1-3), 350-355.
- Mukkoti, V. V., Sankaraiah, G., & Yohan, M. (2018). Effect of cryogenic treatment of tungsten carbide tools on cutting force and power consumption in CNC milling process. *Production & Manufacturing Research*, 6(1), 149-170.
- Özbek, N. A., Çiçek, A., Gülesin, M., & Özbek, O. (2014). Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 86, 34-43.
- Özbek, N. A., Çiçek, A., Gülesin, M., & Özbek, O. (2016). Application of deep cryogenic treatment to uncoated tungsten carbide inserts in the turning of AISI 304 stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 6270-6280.

- Park, K. H., Yang, G. D., & Lee, D. Y. (2015). Tool wear analysis on coated and uncoated carbide tools in inconel machining. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 16, 1639-1645.
- Passari, É. S., Amorim, H. J., & Souza, A. J. (2022). Multi-objective optimization of cutting parameters for finishing end milling Hardox® 450. *ITEGAM-JETIA*, 8(34), 20-28.
- Passari, É., & João de Souza, A. (2023). Multivariate Optimization of Machining Forces Generated by End Milling of Hardox® 450 Steel Under Different Lubricooling Conditions. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 16(6).
- Passari, É., de Souza, A. J., & Vilanova, A. M. (2023). Surface roughness analysis in finishing end milling of Hardox® 450 steel using multilayer graphene-based nanofluid. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(3), 147.
- Patil, N., Gopalakrishna, K., & Sangmesh, B. (2020). Performance evaluation of cryogenic treated and untreated carbide inserts during machining of AISI 304 steel. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17(1), 7709-7718.
- Poomari, A., Mohan, B., Rajadurai, A., & Senthilkumar, A. (2012). Study on tool life of coated, cryogenically treated and coated and plain cermet cutting tools while machining steel. *Eur J Sci Res*, 85(3), 394-407.
- Sivalingam, V., Sun, J., Yang, B., Liu, K., & Raju, R. (2018). Machining performance and tool wear analysis on cryogenic treated insert during end milling of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 188-196.
- Shirbhate, A. D., Deshpande, N. V., & Puri, Y. M. (2012). Effect of cryogenic treatment on cutting torque and surface finish in drilling operation with AISI M2 high speed steel. *Int. J. Mech. Eng. Rob. Res*, 1(2), 50-58.
- SSAB, Swedish Steel AB. "Hardox Aşınma Plakaları". Erişim 01 Aralık 2024. <https://www.ssab.com/tr-tr>
- Şahin, Y., (2003). *İmal Usulleri*, Gazi Yayınevi, Ankara, 269–280.
- Thamizhmanii, S., Nagib, M., & Sulaiman, H. (2011). Performance of deep cryogenically treated and non-treated PVD inserts in milling. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng*, 49(7).
- Trdine, O. O. I. K. (2014). Machinability of a Ti-6Al-4V alloy with cryogenically treated cemented carbide tools. *Materiali in tehnologije*, 48(4), 577-580.
- Turan, Z. Ürgün, S. Fidan, S. Bora, M.Ö. (2024). *Investigation of The Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in The Manufacturing of Hardox 450 Material by Milling Method*. 3rd International Congress on Engineering and Sciences (245-255). İstanbul, Turkey.

- Vardhan, M. V., Sankaraiah, G., & Yohan, M. (2017). Performance evaluation of deep cryogenic treated tools at different temperatures in CNC milling. *ARPJ. Eng. Appl. Sci*, 12, 24.
- Varghese, V., Ramesh, M. R., & Chakradhar, D. (2019). Experimental investigation of cryogenic end milling on maraging steel using cryogenically treated tungsten carbide-cobalt inserts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 2001-2019.
- Varghese, V., Ramesh, M. R., & Chakradhar, D. (2019). Influence of deep cryogenic treatment on performance of cemented carbide (WC-Co) inserts during dry end milling of maraging steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 242-250.
- Yılmaz, T. (2010). *Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri* (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C. Y., & Özdemir, M. (2014). Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 30(4), 220-226.
- Yong, A. Y. L., Seah, K. H. W., & Rahman, M. (2007). Performance of cryogenically treated tungsten carbide tools in milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 638-643.