



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ISIL İŞLEM YARDIMIYLA MEKANİK
ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ GGG70
DÖKME DEMİRİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Muhammet Talha ADIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Talha ADIR tarafından hazırlanan “Isıl İşlem Yardımıyla Mekanik Özellikleri İyileştirilmiş GGG70 Dökme Demirin İşlenebilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 09/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Murat DİLMEÇ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

Üye

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından **201010024** nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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 bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Muhammet Talha ADIR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ISIL İŞLEM YARDIMIYLA MEKANİK ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ GGG70 DÖKME DEMİRİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammet Talha ADIR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ
Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM**

2021, 86 Sayfa

**Jüri
Dr. Öğr. Üy. Mevlüt TÜRKÖZ
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Doç. Dr. Murat DİLMEÇ**

Küresel grafitli dökme demire östenitleme ve östemperleme ısııl işlemi uygulanarak üretilen östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir (ÖKGDD), yüksek mukavemet/ağırlık oranı, tokluk, süneklik, aşınma direnci ve yorulma mukavemeti gibi üstün özellikler sergilemektedir. Bu özellikleri ile dövme çelik, dökme demir ve karbonlu çeliklerin yerlerini almakta, özellikle otomotiv endüstrisinin ilgisini çekmektedir. Ancak üstün mekanik özellikleri ÖKGDD'nin işlenebilirlik kabiliyetini azaltmaktadır. Bu nedenle sahip olduğu üstün özelliklerine rağmen ÖKGDD'nin uygulamaları sınırlı olarak genişlemektedir. Bu sebeple ÖKGDD'nin başarılı bir şekilde işlenebilmesi için gerekli araştırmaların yapılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada özellikle otomotiv sektöründe krank imalatında kullanılması planlanan Östemperlenmiş GGG-70 küresel grafitli dökme demirin işlenebilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda iş parçası numunelerinin döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Döküm işleminden sonra kimyasal bileşimi tespit edilmiştir. Numuneler 930°C'de 120 dk. östenitleme, daha sonra 350°C'de 120 dk. östemperleme ısııl işlemine tabi tutulmuştur. İşlenebilirlik deneyleri CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Farklı talaş derinlikleri, kesme ve ilerleme hızları uygulanarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınmasına kesme koşullarının etkisi belirlenmiştir.

İşlenebilirlik deneyleri sonucunda, talaş derinliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkiye sahip parametre olduğu görülmüştür. Kesme hızının artması ile kesme kuvveti düşerken yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur. İlerleme hızının artmasıyla kesme kuvvetinin de arttığı ancak yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişimin olmadığı belirlenmiştir. Talaş derinliğinin artması ile hem kesme kuvveti hem de yüzey pürüzlülüğü önemli oranda artmıştır. Yapılan deneylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü en fazla 1,90 μm iken en düşük 0,59 μm değerinde elde edilmiştir. Takım aşınması deneylerinde yan yüzey aşınmasından ziyade krater aşınmasının daha hakim olduğu bulunmuştur. Krater genişliği (K_B) değerinin 0,36 mm'ye ulaşması ile takım ömrünün tamamlandığı belirlenmiştir. Östemperlenmiş GGG70 malzeme, AlTiN/TiN PVD kaplamalı tungsten karbür kesici uçlar ile 0.5 mm talaş derinliği ve 130 m/dk gibi düşük seviyede kesme hızlarında işlendiğinde oldukça pürüzsüz yüzeyler elde edilebildiği yani işlenebilirliğin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kesme hızı 130 m/dk seviyesinde tutulduğunda da 35 dakika gibi makul düzeyde takım ömrü elde edilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GGG-70, İşlenebilirlik, Kesici takım aşınması, Kesme kuvveti, Östemperlenmiş grafitli dökme demir, Yüzey pürüzlülüğü

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION ON THE MACHINABILITY OF GGG70 CAST IRON THAT MECHANICAL PROPERTIES HAVE BEEN IMPROVED WITH HEAT TREATMENT

Muhammet Talha ADIR
Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering

Advisor: Asst. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ
Assoc. Prof. Mehmet YILDIRIM

2021, 86 Pages

Jury
Asst. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ
Assoc. Prof. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Assoc. Prof. Murat DİLMEÇ

Austempered ductile cast iron (ADI), produced by applying austenitization and austempering heat treatment to spheroidal graphite cast iron, exhibits superior properties such as high strength to weight ratio, toughness, ductility, wear resistance and fatigue strength. With these features, it takes the place of forged steel, cast iron and carbon steels and it attracts the attention of the automotive industry especially. However, its superior mechanical properties reduce the machinability of ADI. For this reason, despite its superior features, the applications of ADI are expanding in a limited way. For this reason, it is important to carry out the necessary research for the successful machining of ADI.

In this study, the machinability of Austempered GGG-70 spheroidal graphite cast iron, which is planned to be used in crank manufacturing in the automotive industry, was investigated. In this context, samples were casted. After casting, its chemical composition was determined. Samples at 930°C for 120 min. austenitized, then 120 min at 350°C. austempered. Machinability tests were carried out in CNC vertical machining center. The effects of cutting conditions on cutting force, surface roughness and cutting tool wear were determined by applying different depths of cut, cutting and feed rates.

As a result of the machinability experiments, it was seen that the depth of cut was the parameter that has the most effect on the cutting force and surface roughness. It was found that the surface roughness increased with the increase in cutting speed, while the cutting force decreased. It was determined that the cutting force increased with the increase of the feed rate, but there was no significant change in the surface roughness. With increasing depth of cut, both cutting force and surface roughness increased significantly. In the experiments carried out, the average surface roughness was 1.90 μm at the most and 0.59 μm at the lowest. In the tool wear tests, it was found that crater wear was more dominant than flank wear. It was determined that the tool life was completed when the crater width (KB) value reached 0.36 mm. It has been concluded that when austempered GGG70 material is machined with AlTiN/TiN PVD coated tungsten carbide inserts, 0.5 mm depth of cut and low cutting speeds such as 130 m/min, very smooth surfaces can be obtained, that is, the machinability is high. A reasonable level of tool life, such as 35 minutes, was achieved when the cutting speed was kept at 130 m/min.

Keywords: Austempered ductile cast iron, ADI, Cutting force, Cutting tool wear, GGG-70, Machinability, Surface roughness

ÖNSÖZ

Tezimin fikir aşamasından sonuçlanmasına kadar geçen süreçte bilgi ve tecrübesiyle ban yol gösteren değerli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ'e, ikinci danışman hocam Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM'a, kesici takımların temini için Taegutec Kesici Takımlar A.Ş. Firmasından Vatan ÖZKAYA'ya, üzerimde emeği olan tüm hocalarıma, deneysel çalışmalarımda hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Mevlüt AYDIN'a, tez çalışmamda gerekli teknik ve materyal desteğini sağlayan Motus A.Ş ve yardımlarını esirgemeyen Ar-Ge Mühendisi Muhammet KIRICI'ya, çalışmama katılan ve destek veren arkadaşım Dedecan EVCEN'e teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım süresince maddi manevi her türlü konuda yanımda olup desteğini esirgemeyen eşime ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Muhammet Talha ADIR
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demir	5
2.1.1. KGDD’lerin Üretimi	5
2.1.2 KGDD’lerin Mikro Yapıları	6
2.1.3. KGDD’lerin Mekanik Özellikleri	7
2.1.4. Östemperleme Isıl İşlemi	8
2.1.5. ÖKGDD’lerin Mekanik Özellikleri	9
2.1.6. ÖKGDD’lerin Avantajları ve Kullanım Alanları.....	10
2.2. Talaş Kaldırma Prensipleri ve İşlenebilirlik	12
2.2.1 Frezeleme İşlemleri ve Kullanılan Kesici Takımlar	14
2.2.2. Kesme Kuvvetleri	15
2.2.3. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler	18
2.2.4. Kesici Takımlarda Aşınma.....	19
2.2.5. İşlenebilirlik	24
2.3. Dökme Demirlerin İşlenebilirliği.....	25
2.3.1. KGDD’lerin İşlenebilirliği.....	25
2.3.2. ÖKGDD’lerin İşlenebilirliği.....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	31
3.1.1. Östemperleme Isıl İşlemi	34
3.2. Kesici Takım ve Kesici Takım Ucu	35
3.3. CNC Dik İşleme Tezgâhı	36
3.4. Kesme Parametreleri	37
3.5. Kesme Kuvvetinin Ölçümü.....	40

3.6. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi	42
3.7. Takım Aşınmasının Ölçümü	44
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	46
4.1. Malzemeye Ait Mekanik Özellikler.....	46
4.2. Kesme Kuvveti Ölçüm Sonuçları	47
4.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	54
4.4. Takım Aşınması Ölçüm Sonuçları.....	60
4.5. Talaş Morfolojisi.....	72
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
5.1 Sonuçlar	76
5.2 Öneriler	78
KAYNAKLAR	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

µm: Mikrometre

~ : Yaklaşık

Hz: Hertz

Kg: Kilogram

N: Newton

mm²: Milimetrekare

Mpa: Megapaskal

HRB: Brinell sertlik derecesi

°C: Santigrat derece

J: Joule

R_a: Ortalama pürüzlülük değeri

%: Yüzde

mm: Milimetre

Kısaltmalar

dk: Dakika

ÖKGDD: Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir

KGDD: Küresel grafitli dökme demir

dev: Devir

Si: Silisyum

C: Karbon

Mo: Molibden

Cu: Bakır

Ni: Nikel

Mn: Mangan

Sn: Kalay

Mg: Magnezyum

Ce: Seryum

Al: Alüminyum

sn: Saniye

1. GİRİŞ

Günümüzün rekabetçi pazarında, maliyet ve ağırlık açısından etkin, üstün mekanik özelliklere sahip, daha yüksek mühendislik standartlarını ve yeni tasarım şartlarını karşılamak için otomotiv ve savunma sanayisi gibi birçok endüstride yeni mühendislik malzemelerine olan talep artmaktadır. Bu gereksinim, ya şu anda kullanılan mevcut malzemelere göre benzer mekanik özelliklere, daha düşük ağırlık ve üretim maliyetine sahip yeni malzemelerin geliştirilmesiyle ya da geleneksel malzemelerin mekanik özelliklerini arttırmak için bu malzemelere alaşımlandırma veya ısıtılma uygulamalarıyla karşılanmaktadır. Alternatif malzemelerin belirlenebilmesi bunların yanında üretim maliyetleri, geri dönüştürülebilirlik ve işlenebilirlik gibi parametrelere bağlıdır (Klocke ve ark., 2007).

Günümüzde halen sanayimizin büyük bir bölümünde demir esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Bunların içinde süneklik ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle çelikler ön plana çıkmaktadır. Son zamanlarda demir esaslı başka bir malzeme olan küresel grafitli dökme demirler çeliğe rakip olmaya ve birçok alanda yerini almaya başlamıştır (Yalçın ve Özel, 1999).

Sanayinin gelişmesiyle birlikte; dökümcülük sektörünü de kapsayan pek çok alanda yeni teknolojik gelişmeler olmuştur. Özellikleri çok iyi olmayan normal dökme demire küreleştirme işlemi uygulanarak çok daha iyi mekanik özelliklere sahip olan küresel grafitli dökme demirler üretilmiştir. KGDD'lerin çeliklere göre %10 daha hafif olmaları, üretim yönteminin çeliklere göre daha kolay ve maliyetinin daha uygun olması nedeniyle kullanım alanları oldukça fazladır. Küresel grafitli dökme demirler diğer dökme demirlere göre daha yüksek süneklik, tokluk, daha yüksek mukavemet ve işlenebilirlik özelliklerine sahiptir.

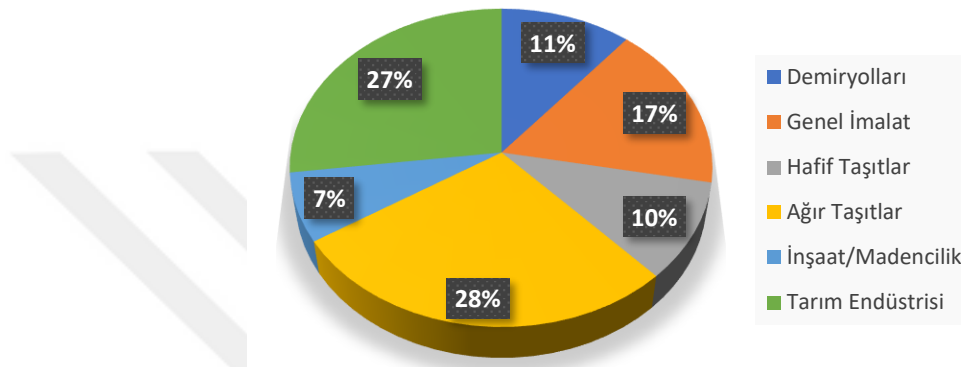
Küresel Grafitli Dökme Demir aynı zamanda Düktil Dökme Demir ya da Nodüler Dökme Demir olarak da adlandırılan demir döküm grubuna dahil edilmektedir. Isıl işlem ve soğutma hızına göre KGDD mikroyapısı, ferrit, perlit, martenzit veya bainit olarak matris ve matris içinde dağılım gösteren Küresel grafit içermektedir (ASM Handbook, 2008).

Çeliklere yakın mekanik özellikler göstermesi, yüksek dayanım ve aşınma direncinin yanında çeliğe göre daha karmaşık şekillerde daha iyi dökülebilmeleri

sayesinde küresel grafitli dökme demirler son yıllarda endüstride sayısız uygulamada yer bulmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2013). Krank milleri de genellikle küresel grafitli dökme demirlerden imal edilir. Küresel grafitli dökme demirden imal edilen krank ve krank millerinin maliyetleri dövme çeliklere göre yaklaşık %30 daha düşüktür (Lin ve ark., 2002; Thomas, 1982). Alman Standardı DIN GGG 70 küresel grafitli dökme demirler de tatmin edici işlenebilirliğe, iyi yüzey kalitesine sahip olmasının yanı sıra titreşim ve ses sönümleme özelliklerinden kaynaklanan yüksek dayanımlı dişlilerde, otomotiv sanayinde, rot kolları ve süspansiyon parçalarında, makine dişlilerinde, krank ve eksantrik millerinde, savunma sanayi (top mermileri gibi) ve havacılık (uçak iniş takımları), tavan vinçlerinin tekerlekleri, demiryolları, tarım aletleri, iş makineleri vb. birçok dinamik çalışan parça ve yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir (Smith, 2000; Yang ve Putatunda, 2005).

Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (ÖKGDD), geleneksel küresel grafitli dökme demir malzemenin östemperlenmesi ile üretilir. ÖKGDD malzeme kimi zaman Östemperlenmiş Sünek Demir (Austempered Ductile Iron, ADI) olarak da adlandırılır. Östemperleme işlemi, sfero demire uygulandığında, diğer geleneksel ısıt işlemlerle üretilen dökme döküm yapılardan veya ısıt işlemden geçirilmiş yapılardan daha güçlü ve daha sert olan benzersiz bir yapı üreten izotermal bir ısıt işlemdir. Yüksek mukavemet / ağırlık oranı, tokluk, süneklik, aşınma direnci ve yorulma mukavemeti gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler geleneksel küresel grafitli demir dökümlerin yerini almaya başlamıştır (Putatunda ve ark., 2009; Handayani, 2017). ÖKGDD'ler yüksek düzeyde mekanik özellikler sergiledikleri için dövme çelik, döküm, kaynaklı imalatların, karbonlu çeliklerin yerlerini almaktadır. Dövme alüminyumdan 2,5 kat daha ağır olmasına rağmen mekanik özellikleri yaklaşık 3 kat daha fazladır. Çelik dökümden %50, dövme çelik imalatından %80 daha az enerji sarfıyatı ile üretilen ÖKGDD iyi bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Anonim, 2021a). Bu nedenle son derece rekabetçi olan otomotiv endüstrisi de ÖKGDD'ler ile ilgilenmektedir. Ancak üstün mekanik özellikleri ÖKGDD'nin işlenebilirlik kabiliyetini azaltmaktadır. ÖKGDD'yi işlemek için kesici takımlar yüksek sıcak sertliğe ve mukavemete, mükemmel sıcak kimyasal dirence ve yüksek tokluğa sahip olmalıdır. Bu tür kesici takımlar idealdir. Fakat şu anda kesme takımları içerisinde bulunmamaktadırlar. Bu sebeple sürekli araştırmanın hedefinde yer almaktadırlar (Katuku ve Kambuyi, 2010).

Isıl işleme tabi tutulan ÖKGDD, grafit yumruları ile asiküler ferrit ve östenitten (çeliklerde "Ösferrit" veya "Beynit" olarak bilinir) tek tip bir mikro yapı üretir. Son zamanlarda ADI, Çelik, Alüminyum ve diğer hafif alaşımlar gibi metallerin yerini hızla alarak büyük potansiyele sahip bir malzeme olmuştur. Yirminci yüzyılda, araştırmacılar malzemenin doğasını keşfeden deneyler yaptılar. Sonuç olarak, ÖKGDD’de metali ve avantajlı özelliklerini açıklayan bir dizi teknik makale ve dergi yayınlanmıştır. ADI uygulamalarının çeşitli mühendislik alanlarındaki Amerikan pazar dağılımına ilişkin en son anket Şekil 1.1’de gösterilmektedir (Keough ve Hayrynen, 2004).



Şekil 1.1. ÖKGDD’nin Amerika’daki Pazar Payı (Keough ve Hayrynen, 2004)

Talaşlı imalatla işlenebilirlik; malzeme seçimi, tasarım ve proseslere ait tüm bilgilerin diğerlerine kıyasla uygun ilişkiler düzenlendiği sistematik bir yaklaşımı gerektirir. Bu yaklaşım sonucu; talaşlı imalata başlamadan önce belirlenen talaşlı imalat tezgahı, kesici takımın ilerlemesi, iş parçasının mikro yapısı, kimyasal bileşimi, talaş derinliği, kesme sıvısı, kesme hızı, saflık, ısıtma işlemi, kesici takım tipi ve malzemesi vb. değişkenler, talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetleri, talaş kaldırma sıcaklıkları, talaş özellikleri gibi değerler ve işlem sonucu meydana gelen iş parçası, işlem süresi, yüzey kalitesi ve toplam maliyet vb. sonuçların tamamı işlenebilirliği ifade etmektedir (Aydın, 2002).

ÖKGDD’lere yukarıda anlatılan üstün özellikler nedeniyle artan ilgi bu malzeme için işlenebilirliğinin belirlenmesini oldukça önemli kılmaktadır. ÖKGDD’lerin işlenmesiyle ilgili özellikle frezeleme üzerine literatürde sınırlı bilgiler mevcuttur (Sinlaç, 2014). Bu sebeple ÖKGDD’nin işlenebilmesini kesici takım tedarikçileri veya operatörler tarafından yüksek mukavemetli KGDD veya eşdeğer sertlikte çeliklerin işlenmesi olarak değerlendirmişlerdir. Bu karar genellikle çok hızlı takım aşınmasına veya ani takım

kırılmalarına neden olmuştur (Handayani, 2017). Bu nedenle birçok araştırmacı ÖKGDD'nin kolaylıkla işlenebilir olmadığını öne sürmüşlerdir (Pilc ve ark., 2015). Araştırmacılar ÖKGDD'lerin işleme çalışmalarının erken bir tarihte başlamasına rağmen hala eksik bilgilerin olduğunu belirtmişlerdir (Katuku ve ark., 2009; Yazman ve ark., 2018).

Bu yüksek lisans tezinin amacı DIN GGG 70 sınıfı küresel grafitli dökme demirin daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınarak östemperlenmesi, aynı anda birden fazla kesici uç kullanılarak yüksek prodüktivitesi bulunan ve çok çeşitli işleme türleri yapabilen imalat süreçlerinde en sık kullanılan talaş kaldırma işlemlerinden birisi olan (Sarıkaya ve ark., 2015) frezeleme yöntemiyle malzemenin işlenebilirliğinin araştırılmasıdır. Kesme işlemi için çoklu PVD kaplamalı (AlTiN/TiN) tungsten karbür kesici takım uçları kullanılmıştır. Dik işlem freze CNC tezgâhında, literatüre ve kesici uç kataloğuna göre tayin edilen kesme parametreleri uygulanarak yapılan talaş kaldırma işlemleri sırasında meydana gelen işlenen yüzeylerin pürüzlülük değerleri, kesme kuvvetleri, takım aşınması ölçülerek tespit edilmiştir. Talaş kaldırma deneylerinde üç farklı devirde (2587, 3582, 4976 dev/dk.), üç farklı ilerleme hızı (514.4, 776.1, 1034 mm/dk.) ve üç farklı talaş derinliğinde (0.5, 0.75, 1 mm) kuru işleme şartlarında yapılmıştır. Deneylerde kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Ayrıca seçilen üç ağır kesme koşulunda takım aşınması araştırılmıştır.

Tez çalışmasında ikinci bölümde KGDD'ler ve östemperleme işlemi ile talaşlı imalatla işlenebilirlik konuları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde tez kapsamında yapılan numune üretimi, deneysel çalışma ve ölçümlerin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar sunulmuş, beşinci ve son bölümde sonuç ve öneriler sıralanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demir

Küresel grafitli dökme demirlerin ilk resmi tanıtımı, 1948 yılında Morrogh tarafından Amerika Dökümcüler Birliği toplantısında yapılmıştır. Üretiminin kolay ve maliyetinin düşük olması, yapısal değişikliklerinin kontrol edilebilir olması, gösterdiği üstün mekanik özellikler sayesinde kullanımı çok hızlı bir şekilde artmıştır (Trudel ve Gagne, 1997). KGDD'lerin içeriğinde karbon oranı yaklaşık olarak %3,4 – 3,9, silisyum ise yaklaşık %1,8 – 3,1 oranındadır. Katılaşma esnasında döküme ilave edilen Mg ve Ce elementleri sayesinde mikro yapıdaki grafitler küresel biçimde katılaşmaktadır. Küresel grafit nodülleri çeliğe benzer bir matris içinde dağılım gösterir. Bu sayede yüksek dayanım, tokluk ve süneklik gibi özellikler elde ederler. Kükürt oranı küreselleşmeye engel teşkil etmekte ve eriyik metalde %0,015'in altında bir oranda bulunması gerekmektedir (ASM Handbook, 2008).

Küresel grafitli dökme demirler;

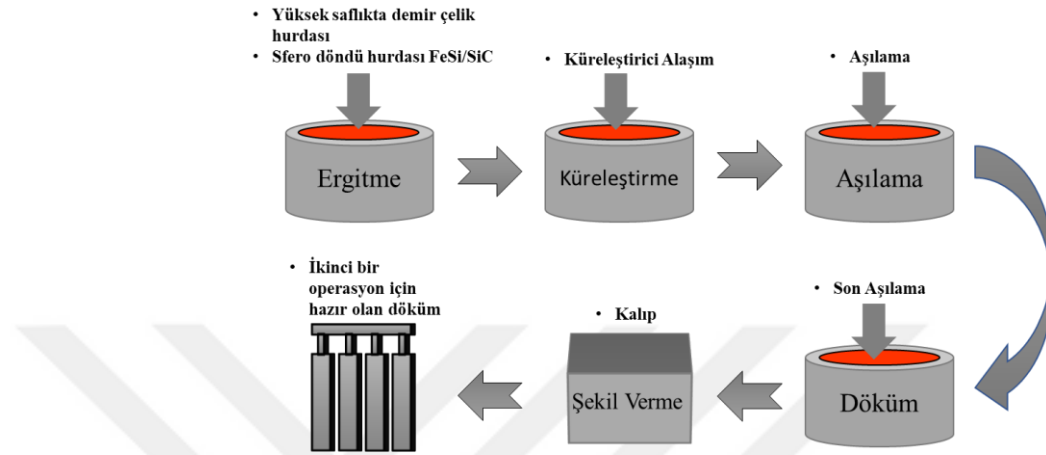
- Benzer mekanik özelliklerdeki çeliklere göre %10 daha hafiftirler.
- Mikro yapıda bulunan küresel grafitler darbe ve titreşim sönümleme kabiliyetine sahiptir.
- Üretiminde çeliğe göre %50'ye varan enerji tasarrufu sağlar.
- Hammadde maliyeti çeliğe göre daha düşüktür.
- İşlenebilirlikleri tavllanmış çeliklere göre daha iyidir (Kayalı ve Yalçın, 2006).

2.1.1. KGDD'lerin Üretimi

KGDD'lerin üretiminde ocağa yapılan şarj ve yapısında bulunacak elementlerin çok hassas ve doğru bir oranda kullanılması çok önemlidir. Si ve C yapıda ferrit oluşumuna neden olurken, Mo, Cu, C, Ni, Mn, Sn gibi elementler perlit oluşumuna neden olmaktadır. Ocakta eriyik metale küreselleştirme işlemlerinin yapılması için Mg ve Ce gibi elementlerin ocağa dahil edilmesi gerekir. Yanı sıra aşılama işlemi de KGDD üretimi için çok önemlidir. KGDD'in yapısında bulunan küresel grafit miktarını artırmak için aşılama yapılmaktadır. Bu nedenle uygun sıcaklık ve miktarda küreleştirici ile destekleyecek alaşım kullanılması gerekmektedir. Aşılama eriyik metal soğumaya başladığında etkisini kaybetmesinden dolayı döküm işlemi hızlı bir şekilde

gerçekleştirilmelidir. Döküm yöntemi ve şarjda eklenen elementlerden dolayı segregasyon oluşumu gerçekleşebilmektedir. (Labrecque ve Gagn, 1998).

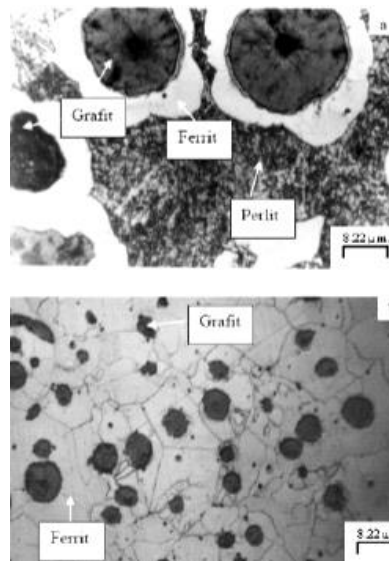
Üretim aşamasında her adım hassasiyet gerektirmektedir. Döküm sırasında küreleştirme ve aşılama yüksek kalitede bir malzeme elde edebilmek için Şekil 2.1’de gösterilen işlem adımlarına dikkat edilmelidir (Trudel,Gagne ve 1997).



Şekil 2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirin Döküm İmalat Şeması

2.1.2 KGDD’lerin Mikro Yapıları

Küresel grafitli dökme demirler Şekil 2.2’de gösterildiği gibi grafit kürelerinin etrafında perlit ve ferritten oluşan matris yapıdadır. Perlit ve ferritin hacimsel değişimleri alaşım elementlerin oranına, dökümün soğuma hızına ve dökümlerin kesit boyutuna göre değişim göstermektedir (Çetin ve Gül, 2005).



Şekil 2.2. KDGG’nin mikro yapısı a)Perlit+Ferrit, b)Tamamen Ferrit (Öztürk., 2019)

2.1.3. KGDD'lerin Mekanik Özellikleri

KGDD'in mikro yapısında düşük küresel grafit sayısı, küreselleşmemiş grafit yoğunluğu, eşit dağılım göstermemiş küre dağılımı ve hacmi, mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Goodrich, 1993). Grafitlerin perlitik matris içerisinde olması malzemede aşınma direnci, yüksek mukavemet ve süneklik kazandırır (Kırcalı, 2006).

KGDD'lerin diğer dökme demir sınıflarıyla kıyaslamasında mekanik özelliklerinin çok daha üstün olduğu bilinen bir gerçektir. Üretiminde ilave edilen alaşım elementlerinin miktarı ve oranları, sementit oluşumu, küresel grafitlerin dağılımı, hacmi ve sayısı ile matris yapı türünü etkilediği için üstün mekanik özelliklerini kazanmasında büyük önem taşımaktadır. Küresel grafit sayısının mümkün olduğunca yüksek sayıda (150-250 küre/mm²) olması istenir (Yazman, 2006).

Türkiye endüstrisinde Alman DIN standardı daha sık kullanılmaktadır. Alman DIN standardınca küresel grafitli dökme demirin sınıflandırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. DIN EN 1563 Standardına Göre KGDD'lerin Sınıflandırılması (DIN-EN-1563., 2015)

Sınıf	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Uzama (%)	Mikro Yapı
GGG-40	400	250	15	Çoğunlukla Ferritik
GGG-50	500	320	7	Ferritik-Perlitik
GGG-60	600	380	3	Perlitik-Ferritik
GGG-70	700	440	4	Çoğunlukla Perlitik
GGG-80	800	500	2	Perlitik

Ferritik matris yapıda bulunan küresel grafitler malzemeye iyi darbe direnci ve süneklik sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde düşük karbonlu çeliklere benzer çekme ve akma gerilimi sağlar. Katılaşmanın oldukça yavaş olması ile ferritik yapıya ulaşılmaktadır (Öztürk, 2019).

Daha yumuşak değerlere sahip ÖKGDD (280-320 HRB) yapıları büyük miktarda östenit içerir. Bu yapıdan kaynaklı, malzeme yüzeyi mekanik zorlanmaya maruz kaldığında beklenenden çok daha iyi aşınma direnci ile sertleşebilir ve/veya martenzite dönüşebilir. Fakat bunun sonucunda işleme için bir dezavantaj oluşturur (Nofal ve Adel, 2013).

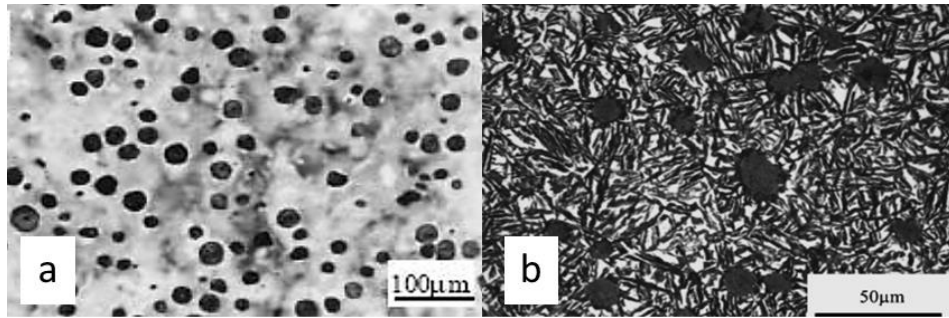
2.1.4. Östemperleme Isıl İşlemi

Küresel grafitli dökme demirin keşfinden sonra mekanik özelliklerini iyileştirmek için önce alaşım elementleri ilave edilmeye, 1970'li yıllarda da östemperleme ısısal işlemi uygulanmaya başlanmıştır (Chang, 1998).

Östemperleme ısısal işlemi belirli bir süre 850-950°C aralığında ısıtılarak KGDD mikro yapısının tamamen östenit olması sağlanmaktadır. Daha sonra östemperleme için ösferrite izotermal dönüşüm sağlamak için 200-400°C arasında tuz banyosuna daldırılarak hızla soğutulması, belirli bir süre boyunca bekletilmesi ve daha sonra havada soğutmaya alınmasıyla işlem tamamlanmaktadır (Čatipović ve ark., 2018).

Östemperleme sıcaklığı belirli bir değeri (tipik olarak 375-380°C) aştığında, aşama II reaksiyonu çok hızlı gerçekleşir ve tutulan östenitte bir azalmaya ve buna bağlı olarak süneklikte bir azalmaya neden olur. ÖKGDD'in benzersiz özellikleri, esas olarak östemperleme sıcaklığı ve süresi tarafından kontrol edilen tutulan östenit içeriği ile yakından ilişkilidir (Nofal ve Adel, 2013).

Tüm östemperlenmiş KGDD mikro yapılarında, iğne şeklindeki beyritik, ferrit ve içinde dağılmış grafit nodülleri ile parlak dağlama ile tutulan östenitin iki fazlı bir karışımından oluşan bir matris şeklindedir (Şekil 2.3) (Zhang ve ark., 2014). Ferrit iğnelerinin uzunluğu genellikle östenitleme sıcaklığıyla artmaktadır (Yang ve Putatunda, 2005).



Şekil 2.3. Östemperleme İşleminin Ardından Mikro Yapıdaki Değişim. a) KGDD'nin Mikroyapısı (Zeyveli ve Karamusaoğlu, 2011) b) ÖKGDD'nin Mikro Yapısı (Zhang ve ark., 2014)

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir üretiminde östenitleme sıcaklığı genellikle 900°C'ye ayarlanır. Östenitleme sırasında malzemedeki grafit, östenit için sürekli olarak karbon sağlamaktadır. Bu nedenle, östenit içindeki karbonun difüzyon hızı (belirli bir östenitleme sıcaklığı için), grafit fraksiyonuna ve grafit nodülleri arasındaki mesafelere bağlı olarak değişmektedir. Grafit nodüllerinin sayısı ne kadar yüksek olursa,

karbon difüzyonu da o kadar hızlı olacaktır. Östenitleme sıcaklığı, mikro yapıyı ve özelliklerini etkileyen östenit fazın karbon içeriğini kontrol etmektedir. Daha yüksek bir östenitleme sıcaklığı, östenitte daha yüksek bir karbon konsantrasyonuna yol açmakta ve daha az sayıda ferrit levhası ile sonuçlanmaktadır (ASM-Handbook, 1991; Górný ve ark., 2019).

2.1.5. ÖKGDD'lerin Mekanik Özellikleri

Östempereleme işleminden sonra meydana gelen bu özel yapı, yüksek çekme mukavemeti, iyi süneklik, yüksek yorulma mukavemeti, kırılma tokluğu ve üstün aşınma direncini kapsayan iyi bir mekanik özellik kombinasyonu sağlar (Batra ve ark., 2013).

Uygun mekanik özelliklere sahip ÖKGDD malzemelerin tasarlamaya ve şekillendirmeye yönelik imalatı, döküm parametreleri, modifikasyon, aşılama ve östempereleme ısıt işlemlerini içeren karmaşık bir dizi süreçtir (Górný ve ark., 2019).

Tasarımcı ve mühendisler için ÖKGDD'ler, çeliğe kıyasla rekabetçi bir maliyette, yüksek mukavemet-ağırlık oranları sağlamaktadır. Son zamanlarda ÖKGDD, aşınma direnci, çekme mukavemeti (1000-1500 MPa), uzama (%3-15) ve yorulma dayanımı gibi dikkat çekici özelliklerinden dolayı araştırmacıların ilgisini daha da çok çekmektedir (Padan, 2012).

ÖKGDD bileşenleri, diğer malzemelere göre yüksek düzeyde mekanik özellikler sunar. ÖKGDD'nin ASTM 897 standart özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu standartlara göre ÖKGDD özelliklerine göre farklı derecelere göre sınıflandırılır. Çizelge 2.1'de de görüldüğü üzere tüm kalitelerin geleneksel küresel grafitli dökme demirlere kıyasla daha iyi dayanıma sahip olduğu görülmektedir. ÖKGDD dereceleri, eklenen alaşım elementlerinin içeriğine ve hem ısıt işlem sıcaklığının hem de süresinin seçimine dayanır (Nofal ve Adel, 2013).

Çizelge 2.2. ASTM 897 ÖKGDD'lerin Mekanik Özellikleri

Sınıf	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Uzama (%)	Darbe Enerjisi (J)	Sertlik (HRB)
1	850	550	10	100	260-321
2	1050	700	7	80	302-363
3	1200	850	4	60	341-444
4	1400	1100	1	35	366-477
5	1600	1300	N/A	N/A	444-555

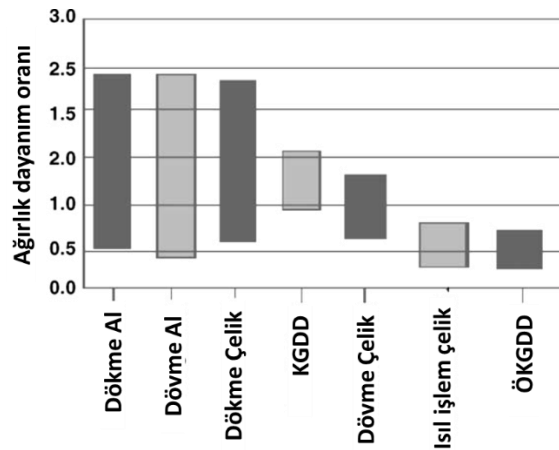
ÖKGDD'ler östenitleme ve östemperleme süreleri ve sıcaklığına bağlı çok geniş aralıkta işlem görmektedir. ÖKGDD'in sünekliği KGDD'e göre eşit sayılabilir. Fakat mukavemeti yaklaşık 2 katından fazladır (Özel, 1994).

Östemperlemeye etkileyen bazı faktörler bulunmaktadır. Bunlar;

- Östenitleme işleminden östemperleme işlemine geçiş süresi,
- Östemperleme işleminde kullanılan tuz banyosunun soğutma şiddeti,
- Isıl işlem gören parçanın tür ve boyutu

2.1.6. ÖKGDD'lerin Avantajları ve Kullanım Alanları

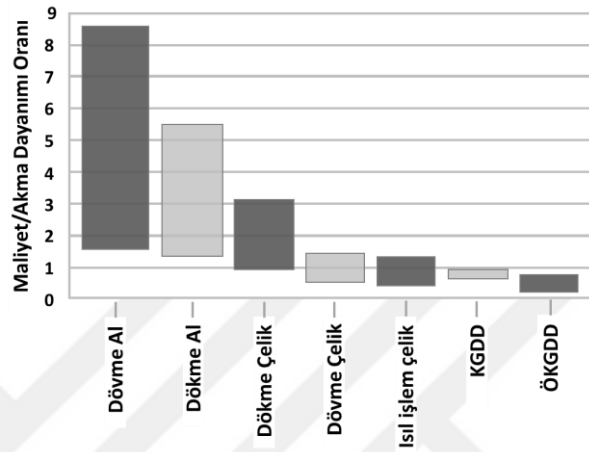
ÖKGDD, kimyasal bileşimi ve mikro yapıları, ısıl işlem sürelerinin kısa olması ve karmaşık şekillerin çeliklerinkine benzer (%10 daha düşük yoğunluklu) mukavemet ve aşınma direnci özellikleri ve dökülebilmesi nedeniyle önemli avantajlara sahiptir (DeGarmo ve ark., 2003). Ayrıca ÖKGDD, ağırlık-dayanım oranı bakımından sık tercih edilen demir esaslı diğer malzemelere göre daha üstün özelliklere sahiptir (Şekil 2.4). (Şeker ve Hasirci, 2006). Bu avantajlarından dolayı ÖKGDD, son yıllarda önemli bir mühendislik malzemesi olarak ortaya çıkmış ve otomotiv endüstrisi, savunma, inşaat, tarım, demiryolu ve iş makinaları vb. birçok yapısal uygulamada giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır (Lefevre ve Hayrynen, 2013; Rajnovic ve ark., 2012).



Şekil 2.4. Ağırlık ve dayanım açısından ÖKGDD'lerin diğer mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması (Şeker ve Hasirci, 2006)

Son birkaç yılda yapılan yoğun çabalar neticesinde, yeni işleme teknikleri, bu malzeme için daha iyi mukavemet, süneklik, tokluk, aşınma direnci ve işlenebilirlik

kombinasyonları elde etmek için daha da fazla fırsat sunmaktadır. ÖKGDD seçiminde genellikle iyileştirilmiş mekanik özellikleri, yoğunluğu, üretim maliyeti vb. gibi çok çeşitli faktörlere dayanır. Şekil 2.5'te dövme çelik, dökme ve dövme alüminyum alaşımları ile karşılaştırıldığında ÖKGDD'in rekabet üstünlüğünü göstermektedir (Hayrynen ve Keough, 2003)



Şekil 2.5. Maliyet ve dayanım açısından ÖKGDD'lerin diğer mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması (Hayrynen ve Keough, 2003)

ÖKGDD'in ASTM 897 standart özelliklerinde yer alan (Çizelge 2.2), 1, 2 ve 3 dereceleri ÖKGDD'in yapısal sınıflarıdır. Malzemede kayda değer bir darbe direnci ve sünekliği korurken genellikle yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren uygulamalar için kullanılırlar. Bu kalite sınıfları, süspansiyon bileşenleri, bağlantılar, krank milleri ve diğer birçok dinamik uygulamada, otomotiv parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan, 4. ve 5. kalite sınıfı, yüksek sertlikleri nedeniyle aşınma direncinde üstün özellikler sergiler. Kır dökme demirlerin ve sertleştirilmiş çeliklerin değiştirilmesinde 4. ve 5. kalite sınıfı ÖKGDD kullanılır. Bu kaliteler yaygın olarak kazıcılar, silindirler, tekerlekler, bazı inşaat ve tarım ekipmanlarının imalatında kullanılmaktadır (Brandenberg, 2001). Bununla birlikte, aşırı sertlikleri ve oldukça zor işlenebilirlik özellikleri nedeniyle 4 ve 5 kalite sınıfı ÖKGDD malzemelerde talaş kaldırma işlemleri ısıl işlemden önce gerçekleştirilir (Eltaggaz ve ark., 2018).

2.2. Talaş Kaldırma Prensipleri ve İşlenebilirlik

Talaşlı imalat, bir iş parçasından istenmeyen malzemelerin talaş adı verilen nispeten ince tabakalar şeklinde çıkarılmasına dayanan bir üretim sürecidir. İş parçası metalik bir malzemeyse, işleme genellikle metal kesme denir (DeGarmove ark., 2003).

Talaş kaldırma işlemleri, diğer şekillendirme işlemlerinin çoğuna göre yüksek doğruluk sağlar. Bu nedenle, hassas toleranslar için genellikle talaş kaldırma ile işlem seçilir. Tornalama, delme ve frezeleme başlıca metal kesme işlemleridir (Groover, 2020).

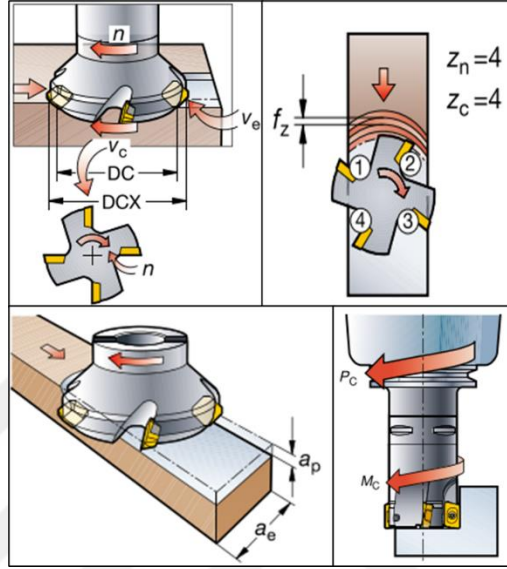
Frezeleme, iş parçasının sabit, çok kenarlı bir kesici takımın dönerek iş parçasından talaş kaldırmasıyla gerçekleştirilen bir talaşlı imalat işlemidir. Kesici takım, bir iş parçasından malzemeyi çıkarmak, prizmatik, çokyüzlü veya serbest biçimli bir şekil elde etmek için hemen hemen her yönde programlanmış ilerleme hareketleri gerçekleştirir (Akkurt, 2000).

Frezeleme işleminde kesici ucun yanı sıra takım tutucu, iş parçası malzemesi, kesme hızı (V_c), ilerleme hızı (f_r), talaş derinliği (a_p) ve frezelemede kesici uç sayısı (z) performans özelliklerini (takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü gibi) yüksek oranda etkileyen en önemli kesme parametreleridir (Sarıkaya ve ark., 2015).

Daha önce yapılan çalışmalarda, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen baskın faktörün ilerleme hızı (f_r) olduğunu ve kesici takımlarda serbest yüzey aşınmasını etkileyen baskın faktörün kesme hızı (V_c) olduğunu ortaya koymuştur (Kıvak ve ark., 2012). Belirli bir ilerleme hızı değeri için kesme hızındaki artışla yüzey pürüzlülüğü artar. Daha yüksek kesme hızında sürtünme ile takım malzemesi ile iş parçası malzemesi arasındaki sıcaklık arttığından, kesici takım tarafından kesilen talaşlar yüksek sıcaklık nedeniyle kesici ucun üzerine yapışır (Savas ve Ozay, 2007). Bu nedenle daha yüksek kesme hızlarında yapılan deneyler sırasında yüzey pürüzlülüğü artar. Artan ilerleme hızı ve kesici uç sayısı titreşime yol açar, daha fazla ısı üretir ve böylece daha yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşur (Korkut ve ark., 2004). Frezeleme işlemlerinde kesme hızı en etkili kesme parametredir ve yaygın olarak bildirildiği gibi, kesme hızının takım aşınması/takım ömrü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu doğrulamaktadır (Muthukrishnan ve Davim, 2011). Gereğinden fazla uygulanan kesme hızlarında takım ömrünü kısalır. Çünkü artan kesme hızı birincil deformasyon bölgesindeki kesme sıcaklığını arttırır. Bu durumun bir sonucu olarak aşınma mekanizmaları hızlanır (Sarıkayave ark., 2015). Yanı sıra yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü gibi performans sonuçları üzerinde en önemli parametrenin

de ilerleme hızı olduğu öne sürülmektedir (Asiltürk ve Akkuş, 2011; Kacal ve Gulesin, 2011). Talaş derinliğinin ise yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir

Frezeleme işlemlerinde kesme parametrelerini tezgâhın, kesici takımın ve iş parçasının dinamik verileri oluşturmaktadır. Şekil 2.6'da bu parametrelere ait şekiller verilmiştir.



Şekil 2.6. Kesici Takımdaki Kesme Parametreleri (Anonim, 2017)

- n (dev/dk.) : İş mili hızı, freze takımının iş mili üzerinde dakikada yaptığı devir sayısıdır.
- V_c (m/dk.) : Kesme hızı, kesme kenarının iş parçasını işlediği yüzey hızını belirtir.
- DC (mm) : Kesici takım çapı
- DCX (mm) : Kesme derinliğindeki çap (kesici uçlar dahil), maksimum kesme çapı
- f_z (mm/diş) : Diş başına ilerleme, tabla ilerlemesini hesaplamak için frezelemede bir değerdir. Diş başına ilerleme değeri, önerilen maksimum talaş kalınlığı değerinden hesaplanır.
- V_f (mm/dk.) : Tabla ilerlemesi, makine ilerlemesi veya ilerleme hızı olarak da bilinir. Takımın iş parçasına göre ilerlemesi, diş başına ilerleme ve sayı ile ilgili zaman birimi başına mesafe olarak takımın ilerlemesidir.
- Z_n (adet) : Takımdaki mevcut kesici uç sayısıdır.
- Z_c (adet) : Etkin kesici uç sayısıdır ve tabla ilerlemesini belirlemek için kullanılır.
- f_n (mm/dev) : Devir başına ilerleme. Özellikle ilerleme hesaplamaları için ve genellikle kesici ucun son işlem kapasitesini belirlemek için kullanılan bir değerdir.
- a_p (mm) : Eksenel kesme derinliği, takımın iş parçasının yüzeyinde iş parçasından çıkardığı değerdir. Bu değer, takımın işlenmemiş yüzeyin altında ayarlandığı mesafedir.
- a_e (mm) : Radyal kesme genişliği, kesici takımın çapına göre numunede işlenen yüzeyin genişliğidir.

Tabla ilerlemesinin hesaplanmasında kullanılan denklem, Denklem 2.1'de gösterilmiştir.

$$V_f = f_z \times Z_c \times n \quad (2.1)$$

Net güç (P_c), kesme işlemini yürütmek için tezgâhın kesme kenarlarına sağlaması gereken güçtür. İşleme verileri seçilirken tezgâhın verimliliği göz önünde bulundurulmalıdır. Tork (M_c), kesme işlemi sırasında takım tarafından üretilen ve tezgâhın sağlaması gereken tork değeridir. Denklem 2.1’de verilen denklem ile hesaplanmaktadır. Spesifik kesme kuvveti değeri (k_{c1}), “N”cinsinden ifade edilen bir malzeme sabitidir.

Kesme işlemleri için tezgâh tarafından sağlanması gereken net gücün hesaplanmasında Denklem 2.2, gerekli tork değeri ise Denklem 2.3’de verilen denklemler ile hesaplanmaktadır

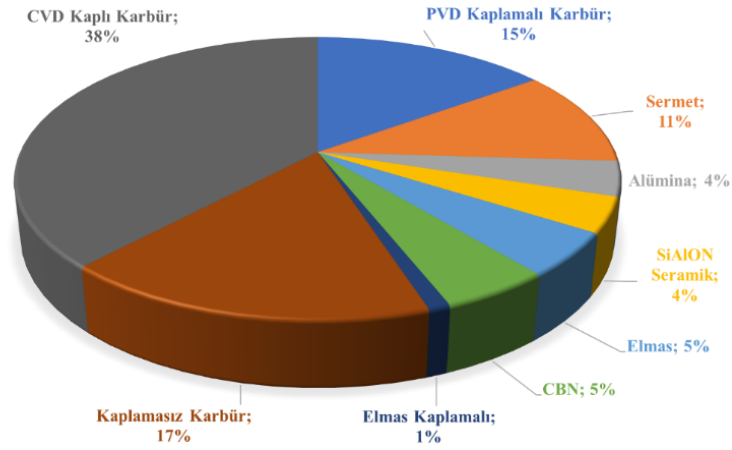
$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times V_f \times k_c}{60 \times 10^6} \text{ kW} \quad (2.2)$$

$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n} \text{ Nm} \quad (2.3)$$

2.2.1 Frezeleme İşlemleri ve Kullanılan Kesici Takımlar

Özellikle sert malzemelerin işlenmesinde kesici takımların, kesici takım uçlarının uygunluğu ve seçimi büyük önem taşımaktadır. Kesici uçlarda aşınmaya dirençli yüksek sertliklerinin yanı sıra kimyasal kararlılık, tokluk, darbe direnci, sıcak sertlik ve dayanım aranan özelliklerin başında yer almaktadır (Çakır, 2006). Bunun yanında termal iletkenlik ve yüksek termal şok direnci de aranan özellikler arasında yer almaktadır (Grzesik, 2017).

Kesici takım malzemelerinin küresel kullanımı Şekil 2.7’de pasta diyagramında gösterilmiştir. Şu anda kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplı karbür takımların çoğunlukla imalat sektöründe kullanıldığı görülebilir (toplam kullanımın yaklaşık %53’ü; şu anda %80’e ulaşmaktadır).



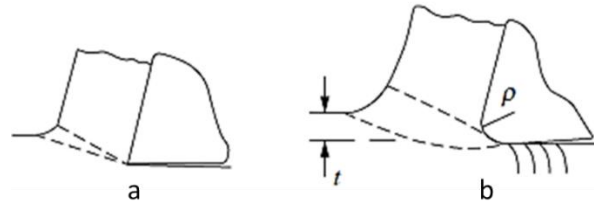
Şekil 2.7. Kesici Takım Malzemelerinin Küresel Kullanımı (Grzesik, 2017)

2.2.2. Kesme Kuvvetleri

Talaş kaldırma işleminde kesici takım üzerinde oluşan deformasyon neticesinde yüzey kalitesi, yüzey işleme toleranslarına büyük ölçüde etki etmekte ve takım takım ömrünün azalmasında rol oynamaktadır. Bu nedenle takım üzerinde meydana gelen kesme kuvvetleri bu duruma etki eden en önemli parametredir (Uzun ve Çakıroğlu, 2020).

Kesme kuvvetlerinin ölçümü, malzemelerin işlenebilirliği ve takım ömrü hakkında bilgi sağlar. Genel olarak, talaş kesitinin (ilerleme ve kesme derinliği) kesme kuvveti veya işleme gücü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Savkovic ve ark., 2019).

Talaş kaldırmada kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinde değişim, ilerleme ve kesme derinliğinin etkisinden çok daha düşüktür. İlerleme ve kesme derinliği arttıkça kesme kuvveti bileşenleri önemli ölçüde artar (Akdemir ve ark., 2012; Savkovic ve ark., 2019). Kesme hızının artışı, iş parçasının işlenen yüzeyinde sıcaklığın artmasıyla deformasyon için gerekli enerjinin daha da düşmesi olarak da açıklanmaktadır. Fakat Şekil 2.8’de görüldüğü gibi kesici takımın aşınmaya başladığı durumda kesici uca ait köşe radyüsünün artması ile deformasyon alanı genişlemektedir bu da kesme kuvvetlerini de artırmaktadır. İlerleme hızının artması da kesme kuvvetlerini artıran nedenlerdendir (Uzun ve ark., 2007).



Şekil 2.8. Kesici Takım Köşe Radyüsünün Talaş Kaldırmada Etkisi a) Düşük Köşe Radyüsündeki Deformasyon Alanı b) Artan Köşe Radyüsündeki Deformasyon Alanı (Shaw ve Cookson, 2005)

Kesme kuvvetlerinin rolü, gerilimin deformasyon ile doğru orantılı olduğu bir Hooke yasası kullanılarak açıklanır. Gerilmenin artmasıyla malzeme elastikiyetini kaybeder ve plastik deformasyona uğrayan plastik bölgeye kayar ve ana malzemeden kopar. Talaş oluşumunda olduğu gibi, talaş oluşumunu başlatmak için kesme kuvvetlerinin belirli bir seviyeye ulaşması gerekir ve plastik deformasyonun başladığı minimum kuvvet, spesifik kesme kuvveti olarak bilinir. Takım ilerleme kuvveti (F_c) ve itme kuvveti (F_t) boyunca etki eden kesme kuvvetleri, amplifikatör tarafından desteklenen bir dinamometre kullanılarak ölçülür (Polishetty, 2011).

Herhangi bir işleme operasyonunda, kesme mukavemeti ve kesme kuvvetleri şu şekilde ilişkilidir:

$$F_c = t \cdot S_o \cdot \tau_s \cdot f \quad (2.4)$$

$$f = \zeta - \tan(\gamma_o) + 1 \quad (2.5)$$

Burada;

t : Kesme derinliği (mm)

τ_s : Kesme gerilmesi (MPa)

S_o : İlerleme (mm)

f : Form faktörü sabiti

Form faktörü (f), takım geometrisinden ve talaş kalınlığından Denklem 2.5 kullanılarak belirlenir, burada “ ζ ” talaş azaltma katsayısı ve γ_o ortogonal kesme modelinde gösterilen talaş açısıdır. (Rai ve ark., 2006).

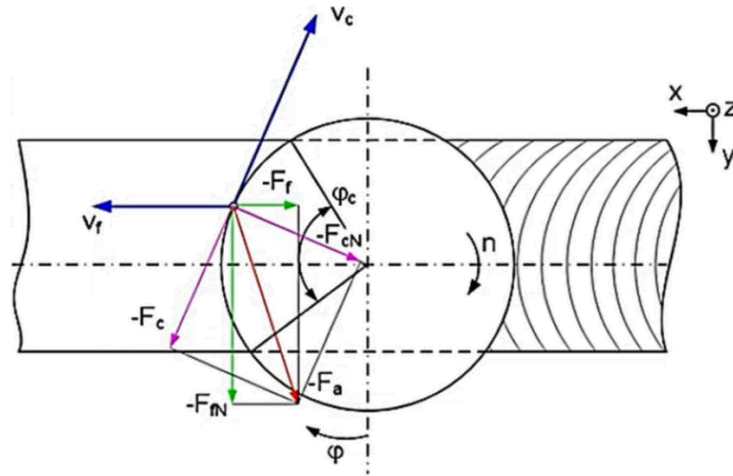
Talaş azaltma katsayısı (ζ), kesme düzlem açısı ve talaş kalınlığı ile Denklem 2.6 ile ilişkilendirilir.

$$\zeta = \frac{a_2}{a_1} = \frac{a_2}{s_o} \cdot \sin\varphi \quad (2.6)$$

Burada a_1 kaldırılmamış talaşın kalınlığı, a_2 ise kaldırılan talaş kalınlığı, φ ise takım yanaşma açısıdır. a_1 'in ilerleme s_o ile bağıntısı, Denklem 2.7’de gösterilmiştir.

$$a_1 = s_o \cdot \sin\varphi \quad (2.7)$$

Yüzey frezeleme ile talaş kaldırma sırasında kesici takıma etkiyen kuvvet bileşenleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Yüzey Frezelemede Esnasında Sabit Dinamometre ile Ölçülen Kuvvet Bileşenleri

Şekil 2.9’da gösterilen kuvvet bileşen değerleri;

- V_c : Kesme hızı (m/dk.),
- V_f : İlerleme hızı (mm/dk.),
- F_f : İlerleme kuvveti (N),
- F_{fN} : Normal ilerleme kuvveti (N),
- F_a : Aktif kuvvet (N)
- F_c : Kesme kuvveti (N)
- F_{cN} : Normal kesme kuvveti (N)’dir

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi “x” eksenindeki kuvvet iş parçasının ilerleme yönüne zıt yönde oluşan F_f kuvvetidir. Aynı şekilde “y” eksenindeki kuvvet ise kesici takımın dönme yönüne zıt yönde oluşan F_{fN} kuvvetidir. Her iki eksen de oluşan kesme kuvvetleri olan F_x ve F_y için Denklem 2.8 ve Denklem 2.9’deki eşitlik söz konusudur.

$$F_x = F_f \quad (2.8)$$

$$F_y = F_{fN} \quad (2.9)$$

Aktif kuvvet (F_a veya F_f) ise her iki eksen de oluşan (F_f ve F_{fN}) kuvvetlerinin bileşkesidir. Bileşke kuvvet ise Denklem 2.10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_a = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (2.10)$$

Kesici takım ucunun iş parçasında bulunduğu koordinattaki kesme kuvveti F_c , normal kesme kuvveti F_{cN} ve “z” ekseninde oluşan pasif kuvvet F_p , Denklem 2.11’deki matris denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} F_c \\ F_{cN} \\ F_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_f \\ F_{fN} \\ F_z \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.2.3. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler

Genel olarak, araştırmacılar takım deformasyonuna, kesici takım kaplamalarının etkilerine ve tek bir kesici uç kullanarak çevresel koşullara odaklanmışlardır. Kesici takımların maliyetleri üreticiler için önemlidir. Maliyet faktörü, en az sayıda ek ile bir uygulamanın minimum düzeyine düşürülmesine neden olur. Aksine, işlem süresindeki artış da iyi bilinen bir faktördür. İşlenmiş yüzeyin pürüzlülüğü, işleme süreçlerinde önemli bir kalite göstergesidir (Durmuş, 2012; Kabaklı ve ark., 2014). İş mili hızı, ilerleme hızı, kesici uç sayısı, kesme derinliği, takım tutucu geometrisi, kesici uç geometrisi, takım malzemesi, soğutma koşulu gibi işlem parametrelerinin çoğu takım ömrünü ve yüzey pürüzlülüğünü etkiler. Bu nedenle, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü için genel bir model tanımlamak zordur (Szecsi, 1999). Benzer işleme parametreleri altında yüzey pürüzlülük değerleri kuru şartlarda işlemeye göre daha düşüktür. Bunun nedeni ara yüzde ısı oluşumunu azaltan ve iş malzemesinin yapışma özelliğini önleyen soğutucu sıvının varlığından kaynaklanmaktadır (Muthukrishnan ve Davim, 2011).

Bir yüzeyin pürüzlülüğü, gerçek bir yüzeyin normal vektörünün ideal biçiminden sapmaları ile ölçülür. En yaygın pürüzlülük parametresi, profilin ortalama çizgisinden dikey sapmalarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanan R_a 'dır (Colpani ve ark., 2019).

Yüzey pürüzlülüğü ilerleme değerinin bir fonksiyonudur ve iş parçasının ilerleme miktarının artması neticesinde yüzey kalitesinde de büyük ölçüde bozulma meydana gelerek yüzey pürüzlülük değerlerinde ciddi miktarda artış göstermektedir (Kıvak, 2014; Uzun ve Çakıroğlu, 2020). İlerleme değerinin artması ile işlenen yüzeyde meydana gelecek tepe ve çukurların daha belirgin hale gelmektedir. Düşük ilerleme hızlarında kesici takım iş parçasında daha yavaş ilerlemekte, kesici takım birim alanı daha fazla işlemektedir. Düşük ilerlemeli frezeleme işlemlerinde yüzey kaliteleri 0.5 μm değerlerine kadar düşüş gerçekleşmektedir (Kahraman ve ark., 2015).

Yüksek kesme hızlarıyla talaş kaldırma işlemleri kesici takımın ömründe azalmaya neden olmaktadır (Eltaggaz ve ark., 2018). Bunun nedeni frezelemede yüksek

kesme hızlarında meydana gelen yüksek sıcaklık kesici uçlardaki aşınma gerçekleşerek, yüzey pürüzlülüklerinde artış meydana gelmektedir (Gökkaya ve ark., 2011).

Kesici takım uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olduğu daha önce yapılan çalışmalar göstermiştir (Choudhury ve El-Baradie, 1997). Yuvarlak uçlu kesici takımlar ile yüzey frezeleme işleminde, radyal ve aksel kaçıklık gibi takım hataları nedeniyle yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmektedir (Franco ve ark., 2004).

Frezeleme ile talaş kaldırma işlemlerinde çıkan talaşların iş parçasının işlenmiş yüzeyine sürtmesinden kaynaklı yüzey kalitesinde bozulmalar meydana getirmektedir. İşlemden kesici uç sayısının artması ile daha fazla talaş meydana gelir. Bu nedenle daha kötü yüzey kalitesi oluşması anlamına gelmektedir (Dilipak ve ark., 2009).

Frezeleme işleminde kesici uç sayısının artmasıyla kesici takım ile iş parçası arasındaki titreşim daha yüksek frekansta gerçekleşir. Meydana gelen titreşim iş parçası yüzeyinde yüzey çizgisinin altında veya üstünde sapmalar oluşturur. Bu nedenle iş parçası yüzeyinde pürüzlülük değerleri artış göstermektedir (Dilipak ve ark., 2009; Şah, 2018).

Yapılan çalışmalarda iş parçası numunelerin yüksek ferrit içeriği, yapılarındaki yüksek perlit içeren malzemelere kıyasla düşük kesme kuvvetlerinin oluştuğu bunun nedeni olarak düşük çekme mukavemeti, düşük sertlik ve yüksek uzama neticesinde oluştuğunu öne sürmüşlerdir. Bu mikroyapısal özelliklerin kesme kuvvetleri üzerindeki olumlu etkilerinin aksine, işlenmiş yüzeyleri olumsuz etkiler. Sünek malzemelerin işlenmesi sırasında karşılaşılan durumdur. Bunun, kesici takımın boşluk yüzeyine yapışabilen ve zayıf yüzey kalitesine neden olabilen yüksek ferrit içeriğinin sonucu olduğuna inanılmaktadır. Malzemelerin sertliklerinin artması ile yüzey pürüzlülükleri iyileşmektedir (Şeker ve Hasirci, 2006).

2.2.4. Kesici Takımlarda Aşınma

Aşınma, kesicinin iş parçasıyla temas yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybı olarak ifade edilir. Talaş kaldırma sırasında oluşan birkaç temel aşınma mekanizması aşağıda sıralanmıştır (Yaldız, 2018).

- Abrazif (aşındırıcılarla) aşınma
- Difüzyon ile aşınma
- Adhezif aşınma

- Yorulma ile aşınma
- Oksidasyon aşınması

Abrazif (aşındırıcılarla) Aşınma: Talaş kaldırma sırasında kesici takım ile iş parçası yüzeyi arasına giren sert parçacıkların taşlama işlemine benzer olarak kesici takım malzemesini aşındırmasıdır. Bu sert parçacıklar talaş malzemesindeki nitrürler, karbürler, oksitler, Al-Si alaşımlarındaki serbest silikonlar vb. olabilir. Takım uç radyüsü aşınması, çentik aşınması, serbest yüzey aşınmasının nedeni olabilmektedir. Ayrıca kesici takımın talaş yüzeyinde talaşın abrasif aşındırma etkisi ile krater aşınması meydana gelmektedir. Krater aşınmasına da neden olmaktadır (Motorcu, 2006; Şeker, 2000; Taylan, 2009)

Difüzyon Aşınması: Yüksek atomik konsantrasyonlu bölgelerden düşük atomik konsantrasyonlu bölgelere doğru katı hal difüzyonu gerçekleşir. Difüzyon hızı sıcaklıkla katlanarak artar. Takım ve talaş arasındaki çok dar bir reaksiyon bölgesinde yüksek sıcaklıklardaki yakın temas nedeniyle difüzyon metal kesmede meydana gelebilir. Difüzyon aşınması esas olarak aletin yüzey yapısının zayıflamasına ve aşınmasına neden olur (Shaw ve Cookson, 2005).

Oksidasyon Aşınması: Oksidasyon, takım malzemesindeki veya iş parçası malzemesindeki türler atmosferik oksijenle reaksiyona girdiğinde meydana gelen kimyasal reaksiyon aşınma mekanizmalarından birini temsil eder. Takım-talaş temasının atmosfere maruz kaldığı bölgelerde sıklıkla gözlenir ve etkilenen bölgenin takım malzemesinin renginin değişmesiyle kolayca fark edilir. Oksidasyon, ciddi bir kesme çentiği derinliği (çentik aşınması) olarak gözlemlenebilir. Çentik büyümesi, takımın kırılmasıyla feci bir hasara yol açabilir. Bazen oksidasyon ile aşınma kalıntıları, artan aşındırıcı (abrasif) aşınmaya yol açabilir (Stephenson ve Agapiou, 2016)

Yorulma Aşınması: Kesici takımın iş parçası malzemesinden talaş kaldırması sırasında yüksek ısı ve mekanik yüklenmelere maruz kalır. Sıcaklığın ve takıma etkileyen kesme kuvvetlerinin dalgalanması kesici takım kenarında çatlak ve kırılmalara yol açar. Takımda kesici kenar dayanımının kesme kuvvetlerinden çok daha düşük değerlerde olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Yüksek mukavemet ve sertliğe sahip iş parçası malzemelerin yeterince sertliğe sahip olmayan kesici takımların kullanıldığı ve yüksek ilerleme hızlarında işlenmesinde görülmektedir (Demirayak, 2006).

Adhezif Aşınma: Talaş kaldırmada, iş parçası malzemesinden gelen aşınma kalıntıları, yüksek ara yüzey basıncı ve yüksek sıcaklık altında kesici takımla güçlü bağlar (bağlantı) oluşturduğunda yapışma meydana gelebilir. Oluşan bağlantının kırılma

dayanımı, kayma yüzeylerinden birinin yerel kırılma dayanımından büyükse bağlantı, daha düşük kırılma dayanımı olan yüzeyden ayrılacaktır. Takımda gelişen bu ayrılmaların sonucu aşınma meydana gelecektir. Bazen iş parçası malzemesi veya talaş için yapışma durumu meydana gelirse yığıntı talaş (BUE) oluşabilir. Kısaca, adhezif aşınma, iş veya talaş malzemesinin takıma güçlü bir şekilde bağlanması nedeniyle bir bağlantının oluşması ve ardından takım malzemesinin talaş veya iş malzemesine ayrılmasıdır. Düşük sıcaklıklarda düşük yapışma eğilimi ve yüksek sıcaklıklarda termal yumuşama nedeniyle ara sıcaklıklarda yapışkan aşınması en yüksek seviyeye çıkar (Olortegui ve Kwon, 2007)

Aşınma Tipleri

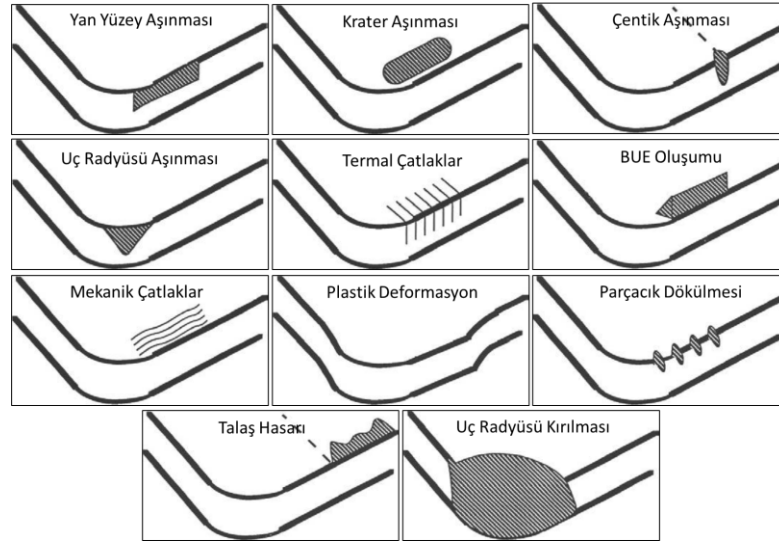
Kesici takımda meydana gelen deformasyonlar neticesinde iş parçasının yüzey kalitesini, toleranslarını etkilemekte ve bunun yanında takım ömrünün de azalması ile sonuçlanmaktadır (Uzun ve Çakıroğlu, 2020). Genel olarak araştırmacılar, tek bir kesici uç kullanarak takım deformasyonu, kesici takım kaplamalarının etkileri ve çevresel koşullara odaklanmışlardır. Kesici takımların maliyetleri üreticiler için önemlidir (Dilipak ve ark., 2009).

Takım ömrü, genellikle belirli bir kritere ulaşmak için gerekli olan etkili kesme zamanı veya kısaca iki bileme arasında geçen zamandır. Kesici takımlardaki aşınmalarının nedenleri birçok sebebe bağlı olabilir. Aşınmayı etkileyen faktörleri incelemiden önce kesici takımlarda oluşan aşınma çeşitlerine değinmek gerekir. Çünkü her aşınma çeşidi aşınmanın farklı nedenlerini işaret ediyor olabilir. Genel olarak, kesici takım aşınması, kesme parametrelerine, soğutma/yağlama koşullarına, iş parçası malzemesine, kesici takım malzemesine ve takım ucu geometrisine bağlı olarak baskın aşınma modu ile birlikte meydana gelir (Sarıkaya ve ark., 2015).

Kesici takımların tasarlanmasında ve seçiminde işlenecek malzemenin özelliklerine göre iki temel kriter dikkate alınır:

- Takım malzemesi seçimi
- Takım geometrisidir.

Kesici takımda meydana gelen aşınma tipleri genel olarak takım üzerindeki bölgeye ve aşınmanın geometrik şekline göre adlandırılır. Talaşlı imalatla sıklıkla karşılaşılan aşınma tipleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Takım Aşınması Tipleri

Talaşlı imalatla talaş oluşumu, işleme özellikleri, kesme malzemesi ve aşınma mekanizmalarının etkileşimlerinin daha iyi anlaşılması, ÖKGDD'yi işlerken kesme parametrelerini optimize etmek açısından çok önemli rol oynamaktadır. Kesici takımlarda kesme kenarına yakın yerlerde bulunan aşırı krater aşınmasının ÖKGDD'in takım aşınmasının bir yönü olduğunu belirtilmektedir. Bu aşınma olgusunu anlamak için ÖKGDD'in işlenebilirlik davranışının daha iyi anlaşılması gerekmektedir (Klocke ve ark., 2007). Bu nedenle, takım durumunu izleme ve ömür tahmini, makine verimliliğini artırmada, işlenmiş parçanın kalitesini ve bütünlüğünü korumada, malzeme israfını en aza indirmede ve sürdürülebilir üretim için maliyeti düşürmede önemli bir rol oynar (Haapala ve ark., 2013)

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin işlenirken, abrasif ve yapışkan aşınma mekanizmalarının baskın takım aşınma modu olduğu araştırmacılar tarafından öne sürülmüştür (Eltaggaz ve ark., 2018).

Serbest-Yan Yüzey Aşınması: Yan yüzey aşınmaya esas sebep iş parçasının sert parçacıklarının takım yüzeyine sürtündüğü durumda meydana gelen aşındırma. Ayrıca, talaş deformasyonu sırasında, parçacıklar kesici takımın temas bölgesinden çekilir ve akan talaşlar tarafından alınır. Bu hareket, takım yan aşınmasından sorumludur ve daha kısa takım ömrü ile sonuçlanır. (Byers, 2016). Esas olarak talaş kaldırmada ilerleme değerinin artması, üretilen ısıya artmasına yol açar. Böylece hızlı termal yumuşama ve hızlı serbest yüzey aşınması ile sonuçlanır (Eltaggaz ve ark., 2018). ISO 8688-2 standardına göre bir takım ömrü kriteri, ölçülebilen her türlü takım bozulma parametresinin önceden belirlenmiş sayısal değeridir. Serbest yüzey aşınmasının (VB)

belirli bir genişliği en sık kullanılan kriterdir. Tavsiye edilen değerler üniform yan aşınma için 0,3 mm ve düzgün olmayan yan aşınma için 0,5 mm'dir (ISO-8688-2, 1989).

Krater Aşınması: Krater aşınması, kesici ucun talaş yüzeyinde meydana gelir. İş parçası malzemesinden kaldırılan talaşın takım üzerinde kaydığı yüzeyde oluşur (Anonim, 2021c). Bu, talaş vurması ile aşındırıcı etki göstererek takımda aşınmanın meydana geleceği gibi iş parçası malzemesi ile kesici takım arasındaki kimyasal bir tepkimeye de bağlı olabilmektedir. Kesme hızı ile aşınma miktarı artar. Kimyasal aşınma mekanizması oluşması takımda aşırı krater aşınması meydana gelir. Kesme kenarını zayıflatır ve kopmaya yol açabilir (Yaldız, 2018). Kesici takımların talaş yüzeyinde gözlemlenen krater aşınması, genellikle küresel grafitli dökme demirlerin yüksek hızlarda işlenmesi sırasında sürekli talaşlar oluşmasıyla krater aşınmasına sebebiyet verebilmektedir. Kesici takımın talaş yüzeyi ile sıcak talaş arasındaki kimyasal etkileşim buna sebep olur. Yapışma, difüzyon veya çözünme gibi bazı termal olarak aktif hale getirilmiş fenomenler aşınma sürecine dahil olabilir (Grzesik, 2017).

Plastik Deformasyon: Talaş kaldırma sırasında meydana gelen sıcaklık kesici takım malzemesi için çok yüksek olduğunda meydana gelir. Genel olarak, daha sert kesici takım kaliteleri ve daha kalın kaplamalar plastik deformasyon aşınmasına karşı olan direnci geliştirir (Grzesik, 2017). Plastik deformasyon kötü talaş oluşumu ve yüzey kalitesine yol açar. Kesme sıcaklığı ve basınç çok yüksektir.

Çentik Aşınması: Kesici takımın talaş derinliği çizgisindeki kesici ucun hem talaş yüzeyinde hem de serbest yüzeyinde aşırı derecede bölgesel hasarla belirlenen kesici uç aşınmasıdır. Bu aşınma tipine, talaşların basınç ile kaynaması ve deformasyon sertleşmesine maruz kalmış bir yüzey neden olur. Paslanmaz çelikler işlenirken meydana gelen yaygın bir aşınma tipidir (Anonim, 2021b). Kullanılan bir soğutucunun neden olduğu veya korozyon nedeniyle oluşan oksidasyon da çentik aşınmasına neden olur (Anonim, 2021c). Çentik oluşumu, östenitik paslanmaz çelikler, titanyum ve nikel bazlı süper alaşımlar gibi yüksek sertliğe sahip malzemelerde ve yüksek takım ucu sıcaklıkları oluşturma eğiliminde olan iş parçası malzemelerinde ciddi bir teknolojik problemidir (Grzesik, 2017).

Çentik aşınması, takım ile iş parçası yüzeyi arasındaki temas alanını arttıran dalma açısının arttırılmasıyla, çok pasolu talaş kaldırmada kesme derinliğinin değiştirilmesiyle, kesici takım uçlarının uç radyüslerinin artırılmasıyla ve takım malzemesinin ısıl sertlik ve deformasyon direncinin arttırılmasıyla, en aza indirilebilir.

Termal Çatlaklar: Talaş kaldırma esnasında kesme sıvısının kullanımı ile meydana gelen ilk gözlem termal hasarın ortaya çıkmasıdır. Kimyasal reaksiyon aşınması olarak, oksijenin varlığından kaynaklı yüksek sıcaklıklarda kesici takım malzemesinin iş parçası malzemesi ile reaksiyona girmesiyle kimyasal bileşik oluşur ve termal hasar meydana gelir (De Oliveira ve Dos Santos, 2007). Termal çatlak oluşumunun ardından kesici takım kenarlarda ufalanma meydana gelir. Islak koşullar altında aralıklı kesme için oldukça yaygın bir özellik olan kesici uçta ani soğumaya bağlı termal şoklardan kaynaklanmaktadır (Priarone ve ark., 2016).

Kesici Kenardan Parça Kopması / Kırılması: Aşırı miktarda mekanik gerilim baskılarının bir sonucudur. Bu gerilimlere, talaş çekiçlenmesi, çok yüksek talaş derinliği veya ilerleme, iş parçasındaki sert kalıntılar, talaş yığılması, titreşimler ya da kesici uç üzerindeki aşırı aşınma gibi bir dizi sebebe bağlı olabilir. Esas kesici kenarın kemeye katılmayan kısmı, sürekli talaş çarpmasıyla zarar görür. Bu sebeple kötüleşen kesici kenarın üst ve alt yüzeyi aşırı serbest yüzey aşınmasına yol açacak şekilde zarar görebilir ve talaşlar, kesmeye katılmayan kenara doğru sapar. Bu durum tok veya abrazif talaş meydana getiren malzemelerin (paslanmaz çelik gibi) seramik takımlarla işlenmesi durumunda oluşur. Talaş vurması, talaş geriye doğru kıvrıldığında ve kesme kenarından uzakta takım yüzeyine çarptığında oluşur.

Kesici Kenarda Yığıntı Talaş Oluşumu (BUE): Genellikle, yumuşak düşük karbonlu çelikler veya sünek paslanmaz çelikler ve demir içermeyen malzemeler (çoğunlukla alüminyum, nikel, kobalt ve titanyum alaşımları) düşük kesme hızlarında ve düşük ilerleme hızlarında işlendiğinde yaygın ortaya çıkar. Düşük kesme hızı, talaş yığılmasının oluşumunu artırır (Anonim, 2021c; Grzesik, 2017). Yığıntı talaş koparken kötü yüzey kalitesine ve kesme kenarı kopmasına neden olur. Düşük karbonlu, paslanmaz çelik ve alüminyum gibi yapışkan talaş oluşumuna sebep olan malzemelerdir.

2.2.5. İşlenebilirlik

Bir malzemenin işlenebilirlik derecesi, işlenebileceği zorluk veya kolaylığın bir göstergesidir. Kesme kuvvetlerinin büyüklüğü, kesme parametreleri, talaş kaldırma oranı, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü ile değerlendirilir (Muthukrishnan ve Davim, 2011). İşleme açısından bakıldığında, herhangi bir malzemeyi keserken özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu tür özellikler, malzemenin işlenebilirliğini olumsuz yönde etkileyen yüksek sertlik, tokluk, düşük termal iletkenlik ve yüksek mukavemet-ağırlık oranını

içerir. Malzemeler bu nedenle kesilmesi zor malzemeler olarak adlandırılır. İşlenebilirlik ayrıca iş parçası ve kesici takımında aşırı ısı üretimi, talaş oluşumundaki zorluklar, yüksek malzeme sertliği ve mukavemeti, kesme bölgesinde ısı dağılımı nedeniyle düşük verimlilik ve yüksek işleme maliyeti ile ilişkilidir. Kesilmesi zor malzemelerin işlenmesi sırasındaki ana problemler kısa takım ömrü, zayıf yüzey bütünlüğü ve daha uzun çevrim süresidir (Davim, 2011).

Temel malzeme olarak AISI 1110 çeliği kabul edilmektedir. Bu malzemenin işlenebilirlik indeksi $MR = 1.00$ (%100)'dir. Test malzemesinin notu $MR > 1.00$ (%100) daha iyi işlenebilirlik anlamına gelir.

Grafit, ferrit, perlit ve karbürün varlığının işlenebilirliği üzerinde önemli etkileri vardır. Benzer şekilde, döküm sırasında dökme demire eklenen alaşım elementleri de işlenebilirliği etkiler. Bazı alaşım elementleri işlenebilirliği geliştirirken bazıları da bozmaktadır (Anonim, 2017).

2.3. Dökme Demirlerin İşlenebilirliği

Gri dökme demir, dövülebilir dökme demir ve küresel grafitli dökme demirler grafit parçacıklarının varlığı sayesinde bu malzemeleri, özellikle çeliklerle karşılaştırıldığında, hemen hemen tüm kriterlerde iyi işlenebilirliğe sahip olmasını sağlar. Düşük takım aşınması oranları, yüksek talaş kaldırma oranları, nispeten düşük kesme kuvvetleri ve güç tüketimi, dökme demirin özellikleridir. Dökme demiri işlerken, matris takım ömrünü belirlerken grafit parçacıkları kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü belirler (Anonim, 2021d).

2.3.1. KGDD'lerin İşlenebilirliği

Çelikler küresel grafitli dökme demirlerle değiştirildiğinde daha iyi işlenebilirlik en önemli kazanç kabul edilir. Literatürde küresel grafitli dökme demirin çeliğe göre daha iyi işlenebilirliğinin olduğu tartışmalıdır. Fakat General Motors gibi üreticilerden elde edilen bilgiler neticesinde küresel grafitli dökme demirden üretilen parçaların, ısıl işlem görmüş dövme çeliğe kıyasla takım ömründe %20-900 oranında iyileşme sağladığını göstermektedir. KGDD dökümlerde çok ince yüzeyler elde edilebilir. İşlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü, işleme ortamının tane boyutuna ve uygulanan finish işleme sürecine bağlıdır. Sfero döküm parçalarda $0.1 \mu m$ (R_a) veya daha iyi yüzey finish frezeleme, taşlama ve honlama ile elde edilebilir (Anonim, 2021d).

Sfero dökme demirin diğer dökme demir türleri ile karşılaştırıldığında üstün mekanik özellikleri nedeniyle işlenebilirliği nispeten zayıftır. Bu demirde, grafit küreler, kesme düzleminde malzemeyi zayıflatmada pul grafitten daha az etkilidir ve akış bölgesi malzemesi bazen aşırı sünek olabilir. Küresel grafitli dökme demirler, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlere nazaran daha düşük kesme kuvvetleri ile talaş kaldırılır. Ancak ÖKGDD'lere göre daha yüksek yüzey pürüzlülük değerini vermektedirler (Şeker ve Hasirci, 2006).

Ferritik ve perlitik yapının bir arada bulunduğu küresel grafitli dökme demirin iyi işlenebilirliğe ve düşük üretim maliyetine sahiptir.

2.3.2. ÖKGDD'lerin İşlenebilirliği

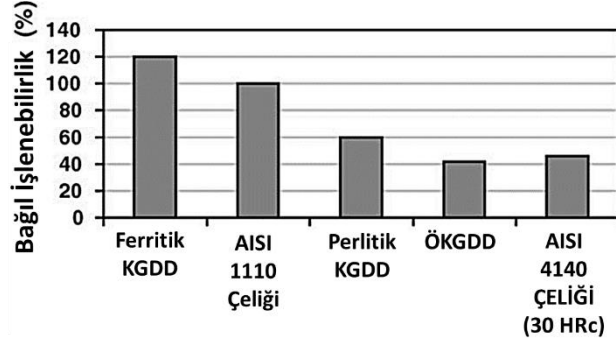
Şanzıman dişlileri, çatlak milleri, tren vagon tekerlekleri gibi ÖKGDD bileşenleri, imalat sırasında kapsamlı işlemeye tabi tutulur. Gerinim sertleştirme davranışı, işleme takım ömrü ve parça yüzey kalitesi üzerinde derin bir etkiye sahiptir (Nofal ve Adel, 2013).

ÖKGDD ilk kez mühendislik uygulamaları için kullanılmaya başlandığında, onu işlemeye çalışırken birçok zorluk yaşanmış ve bunlardan bazıları kuşkusuz günümüze kadar devam etmiştir. En sert ÖKGDD kaliteleri, herhangi bir yüksek hacimli işleme operasyonu için zorluk teşkil eden 470 HRB'lik bir sertliğe ulaşır. ÖKGDD'nin daha yumuşak kalitelerinin tipik sertliği 300-350 HRB olmasına rağmen, matris yapıları %40'a kadar kalıntı östenit içerir (Zhongkui ve ark., 2006).

Östemperleme işlemi malzemelerin yapısal özelliklerinde değişikliğe neden olan bir uygulamadır. Sertlik değerlerinin artması en belirgin halidir. Malzeme sertliğindeki artış talaş kaldırmayı zorlaştırarak kesme kuvvetlerini artırmaktadır. Kısa östemperleme sürelerinde malzemede bazı östenit alanları tam dönüşmemektedir. Bu faz gerilmelere maruz kaldığında hızla sertleşir. Bu nedenle eşdeğer sertlikteki bir çeliğe kıyasla işlenebilirliği azaltabilir (Garin ve Mannheim, 2003; Nofal ve ark., 2003). Östemperleme süresi uzun olan malzemelerin östenit yapıya dönüşmesi daha mümkün olmakta, bu nedenle malzemeleri işlemek için gerekli olan kesme kuvvetleri artış göstermektedir (Wang ve ark., 2005).

ÖKGDD'nin diğer dökme demir türleriyle karşılaştırıldığında artan mukavemeti ve aşınma direnci nedeniyle işleme sırasında bazı problemler oluşturmaktadır. Daha önce, reaksiyona girmemiş (veya dönüştürülmemiş) östenitin, işleme sırasında gerilim-

deformasyon kaynaklı martensite dönüşümü nedeniyle ÖKGDD'nin işlenebilirliğini azaltmaktadır (Moncada ve ark., 1998). AISI 1110 çeliğiyle diğer demir esaslı malzemelerin bağıl işlenebilirlik indeksi Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Çeşitli demir bazlı malzemelerin bağıl işlenebilirliği

ÖKGDD malzemelerin sertlik derecelerindeki düşüş ve östemperleme sıcaklığındaki artış nedeniyle bu malzemenin işlenebilirlik indeksinde önemli ölçüde artış görülmektedir (Seah ve Sharma, 1995). Düşük östemperleme sıcaklıklarında, sadece az miktarda tutulan östenit ile iğnemsî (iğne benzeri) bir ferritik faz oluşur. En düşük östemperleme sıcaklıklarında, yapı ayrıca bir miktar martensit içerebilir. Bu tip mikro yapı, yüksek çekme mukavemeti ve sertlik sağlarken, yalnızca sınırlı oranda süneklik ve zayıf işlenebilirliğe neden olmaktadır. Artan östemperleme sıcaklıkları ile, artan miktarda tutulan östenit ile (~%40'a kadar) ferrit daha kaba hale gelir (tipik ösferrit yapısı). Bunun sonucunda malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerinde bir azalma meydana gelerek, süneklik ve işlenebilirlikte önemli bir artış görünür (Nofal ve Adel, 2013). Östemperleme sıcaklığının düşmesi neticesinde, kesme kuvvetlerinde artış, yüzey pürüzlülüğü değerlerinde de düşüşün meydana geldiği araştırmacılar tarafından not edilmiştir (Aslantas ve Ucu, 2009).

Östemperleme süresinin artmasının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Bu nedenle, malzeme seçiminde işleme kriterlerinin önemli olduğu durumda kısa östemperleme süresi genelde en iyi sonuçları vermektedir (Şeker ve Hasirci, 2006). Kesme kuvvetlerinde östemperleme süresi incelendiğinde, östemperleme süresinin artması ile kesme kuvvetlerinde de artış görülmektedir (Uzun ve Çakıroğlu, 2020).

Talaşlı imalat sırasında yağlayıcı ve ısı dağıtıcı olarak hareket eden grafitin varlığı nedeniyle kolay kesilebilir olarak sınıflandırılabilmesine rağmen, demir ile çözelti içindeki daha yüksek karbon miktarı ile işlenebilirliği azalmaktadır (Polishetty ve ark., 2008). ÖKGDD'nin işlenebilirliği ve sünekliği ($\alpha + \gamma + \text{grafit}$) bölgesinde kısmi östenitleme ve ardından normal östemperleme ile çift fazlı mikro yapıların (ferrit + ösferrit veya ferrit-martensit) geliştirilmesi yoluyla önemli ölçüde artmaktadır (Nofal ve Adel, 2013). Otomotiv parçaları ve tarımsal döner makinelerde artan uygulamalar nedeniyle ÖKGDD'nin işlenebilirliğini geliştirmek çok önemlidir. ÖKGDD'nin işlemenin çoğu, küçük sürtünme katsayısı nedeniyle grafitin iyi bir yağlayıcı görevi gördüğü göz önüne alındığında kuru koşullar altında yapılır. Bu, daha uzun bir takım ömrü sağlar ve takım aşınmasını azaltır (Eltaggaz ve ark., 2018).

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler işlenirken, östenitik-ferritik matrisin güçlü sertleşme eğilimi ile birlikte süreksiz talaş oluşumu ana aşınma mekanizması olarak tanımlanmaktadır (Arft ve Klocke, 2013)

Benzer mekanik özelliklere sahip çeliklere ve geleneksel dökme demirlere kıyasla ÖKGDD için aynı kesme parametrelerinde işlenmesinde önemli ölçüde daha kısa bir takım ömrü elde edilmektedir. Kesme kenarına çok yakın bulunan aşırı krater aşınması, karakteristik takım aşınması olgusudur. Bu etki kesici kenarın dengesini bozar ve krater dudağının kırılmasına neden olur. Bu aşınma olgusunu anlamak için ÖKGDD'in işlenebilirlik davranışının daha kesin bir şekilde anlaşılması gereklidir. (Klocke ve ark., 2007).

Küresel grafitli dökme demirlerle karşılaştırıldığında, talaş kaldırma sırasında parçalı talaş oluşturma potansiyeli yüksektir. Bu özel talaş oluşumu, güçlü bir dinamik orantı ile düşük ortalama kesme kuvvetlerine yol açar. Ancak bu kesme kuvvet grafiğindeki tepe değerleri, su verilmiş ve temperlenmiş çelikleri açıkça aşmaktadır. Ek olarak, talaş ile kesici takım talaş yüzeyi arasındaki temas bölgesinin boyutu küçüktür ve kesme kenarına yakındır. Ayrıca östenitik-ferritik mikroyapı, dökme demir malzemelerin kesilmesinde yaygın olarak kullanılan tungsten bazlı karbürlere yapışma eğilimindedir (Klocke ve ark., 2007).

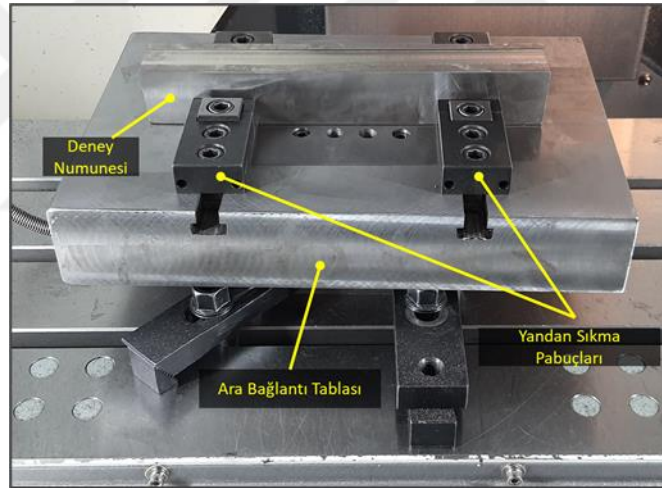
ÖKGDD işlenirken adhezyon aşınmasının yanında abrazyon aşınma etkileri de gözlenir. Abrazyon aşınmasında östenitik-ferritik mikro yapının sertliğinden ve ayrıca ayrışmanın etkili olduğu sertlik dalgalanmalarından kaynaklanır. Daha yüksek dayanıma

sahip ÖKGDD kalitelerinde mikro yapı, daha güçlü abrasiv aşınmaya neden olan ilave karbürler içerir (Klöpper ve Klocke, 2006).

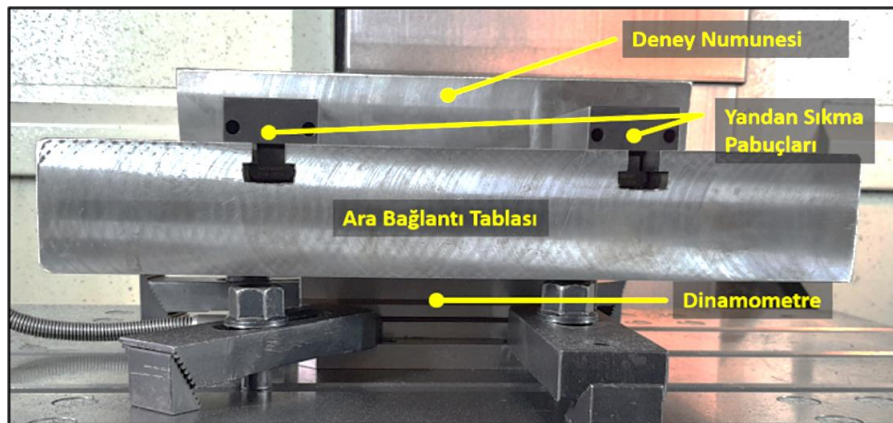
GGG 70 küresel grafitli dökme demirler otomotivde krank mili olarak kullanılmaktadır. Daha yüksek mekanik özellik elde edilmesi amacı ile östemperleme ısı işlemi uygulanmasının krank milinin imalatında bozulmalar meydana geleceği konusunda çekinceler bulunmaktaydı. Fakat tasarım aşamasında bozulmayı telafi etmek için krank milinin kaba işlenmesi, ısıl işleme tabi tutulması ve ardından toleransları karşılamak için son işleme ile imalatı tamamlanarak endişeler giderilmiştir. Bu sayede krank mili, küresel grafitli dökme demire göre daha iyi yorulma direnci ve daha iyi sönümleme özellikleri sayesinde çalışma sırasında gürültü seviyelerinde yüksek oranda azalma meydana getirmiştir. Küresel grafitli dökme demir kalitelerinin işlenmesi ÖKGDD ve çeliğe göre daha kolaydır. Dolayısıyla östemperleme ısıl işleminden önce kaba işlenmesi avantaj sağlamaktadır (Brandenberg ve ark, 2001). Ancak krank imalatında son tolerans ve yüzey kalitelerinin elde edilmesi için ince işleme şartlarında ÖKGDD'lerin işlenebilirliğinin bilinmesi önem arz etmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

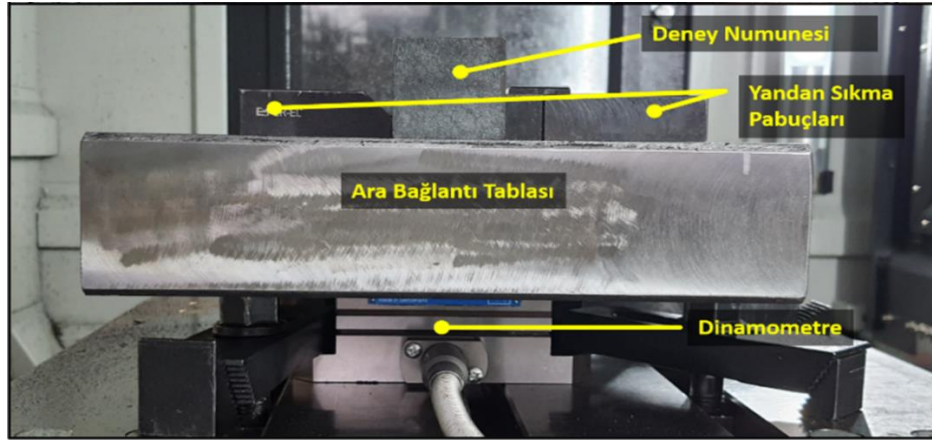
Bu bölümde iş parçası ve iş parçasına ısıtma işlemi uygulanarak malzemede meydana gelen kimyasal ve mekanik özellikler, sertlik ölçümü, talaş kaldırma deneylerinde kullanılacak CNC dik işleme tezgâhı, kesici takım ve kesici takım ucunun teknik özellikleri, kesme kuvvetlerinin belirlenmesi için kullanılan dinamometre, yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve takımçı mikroskobunun özelliklerine ait bilgiler belirtilmiştir. Deney numunesinin dinamometreye bağlanması için bir ara parça tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tezgâh tablasına sırası ile dinamometre, ara bağlantı parçası, mengene ve numune bağlanarak deney düzeneği kurulmuştur. Fakat deneysel çalışmada bu şekildeki kurulumda titreşimin çok olması nedeniyle Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de görüldüğü gibi yandan sıkma pabuçları ile bağlantı sağlamak için yeni bir ara tabla tasarlanarak imal edilmiş ve deney düzeneği yeniden oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin kurulumu



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin kurulumu önden görünüşü



Şekil 3.3. Deney Düzeneğinin Kurulumu Yandan Görünüş

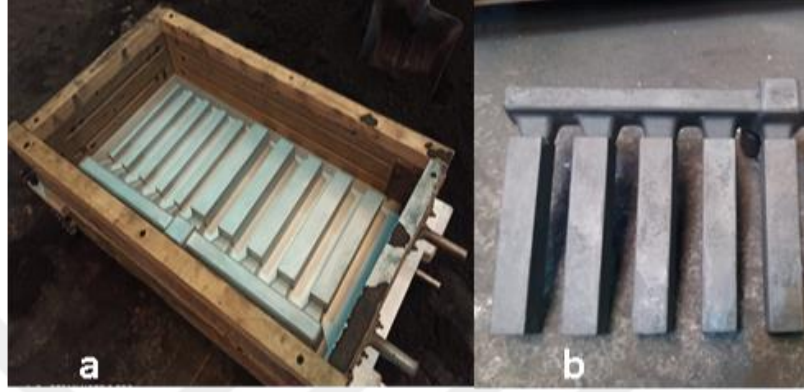
CNC Dik işleme merkezinde deneyler yapılırken deney numunesi yandan sıkma pabuçları ile ara bağlantı parçasına bağlandıktan sonra komparatör ile üst yüzeyinin düzlemselliği kontrol edilmiştir. Üst yüzeyin düzlemsellikten sapmasının fazla olması durumunda yüzey tekrar işlenerek en fazla 0.03 mm düzlemsellikten sapma sınırında kalınması sağlanmıştır. Her bir deneyde yeni bir kesme kenarı ile çalışılmıştır.

Deney planının hazırlanması, işleme parametrelerinin belirlenmesi ve deney sonucunda ölçümlerin alınmasına ait detaylar aşağıda anlatılmıştır.

3.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

İşlenebilirlik deneylerinde, özellikle yaygın olarak otomotiv sanayisinde frezeleme ve diğer çeşitli talaşlı imalatlarda işlenen, işlenebilirliği hakkında sınırlı sayıda araştırmaların yapıldığı ve literatürde düşük işlenebilirlik kabiliyetinin olduğu belirtilen östemperlenmiş GGG-70 küresel grafitli dökme demir, iş parçası olarak kullanılmıştır. Tez konusu olarak bu malzemenin işlenebilirliğinin araştırılmasının amacı, söz konusu malzemenin östemperlenmiş durumda Motus A.Ş. tarafından krank millerinde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla TÜBİTAK 1507 programı kapsamında 7180889 No.lu “Östemperlenmiş Sünek Dökme Demir Krank Millerinin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi” başlıklı bir proje yapılmasıdır. Yüksek lisans tezi 2. Danışman Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM’ın akademik danışman olduğu projede krank milinin gereksinim duyduğu mekanik özellikleri elde etmek için malzeme kimyasal bileşimi ile östemperleme işlemi şartları araştırılmıştır. Ancak malzemenin işlenebilirliği bakımından bir çalışma yapılmamıştır.

Deney numuneleri Konya Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Motus A.Ş.'de kum kalıba (Şekil 3.4a) döküm yöntemi ile dikdörtgen prizması şeklinde 300x50x50 mm boyutlarında üretilmiştir (Şekil 3.4b).



Şekil 3.4. a) 300x50x50 mm boyutlarında hazırlanan kalıp b) Dökülmüş numune

Ergitme işlemleri Inductotherm marka orta frekanslı indüksiyon ocağında yapılmıştır. Sfero döndü hurdası, hurda çelik ve sfero piki ocağa şarj olarak eklenmiştir. Küreselleştirme için tundish potasında FeSiMg₇ küreselleştirici, aşılama işlemi için Fe-Si (%75 Si) alaşımı eklenmiştir. Daha sonra kum kalıplara dökülerek soğumaya bırakılmıştır.

Deney numunelerinin ısıtılma işleminden sonra işlenebilirlik sonuçlarına etkisinin olmaması için yüzeylerinde kalan dekarbürize ve kalıntı tuz tabakasının numuneden uzaklaştırılması ve işlenebilirlik deneyleri için belirlenen kesme derinliklerinin homojen olması için düzgün yüzey formu elde etmek amacıyla en az 1 mm'lik kalınlıkta kaba talaş kaldırma işlemi yapılmıştır. Östemperleme işlemleri yapılan numunelerin (Şekil 3.5) kaba talaş kaldırma işlemlerinin bir kısmı Motus A.Ş.'de bir kısmı da KTÜN CAD/CAM laboratuvarında CNC frezede yapılarak (Şekil 3.6) deneysel çalışma için uygun hale getirilmiştir.



Şekil 3.5. Östemperleme ısı işlemi sonrası numuneler



Şekil 3.6. Kaba işleme yapılmış numuneler

Dökümü gerçekleştirilen deney numunelerinin kimyasal analizi, OBLF RS1000-162 model optik emisyon spektrometresi kullanılarak MOTUS A.Ş.’de elde edilmiştir. Dökülen numunelere ait kimyasal analizin sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları

Fe	C	Si	Mn	Cu	Mg	Ni	Mo
bal.	3,56	2,33	0,086	0,826	0.033	0.599	0,191

Dökme demirler teoride saf demir (Fe) ile saf karbonun (C) aşılınması ile elde edilir. Bu aşılama ötektik kompozisyonun tam olarak %4,3’e denk gelmesi gerektiği karbon-demir faz diyagramından anlaşılır. Diğer demir döküm malzemelerde olduğu gibi küresel grafitli dökme demirlerde de demir ve karbona ek olarak Si, Mn, P, S, Ni ve Mg gibi birçok element alaşımda yer almaktadır. Geleneksel dökme demirden farklı olarak

Ni ve Mo içermesi malzemenin östemperleme kabiliyetini artırmaktadır. Dökümün kimyasal içeriğindeki %0,8 oranında Cu bulunması dökümün perlitik yapıda oluşmasında etkilidir. Bu nedenle GGG 70 küresel grafitli dökme demirin daha çok perlitik yapıda olduğu bilinmektedir. Ötektik noktasının değerlendirilmesi için bu elementlerin dikkate alınması gerekmektedir. Ötektik noktanın nerede bulunduğunu saptamak için karbon eşdeğeri adı verilen kavramdan faydalanılır. Bu noktanın faz diyagramı içerisinde değişimine etki eden, ötektiğin içerdiği karbon miktarının azalmasına sebebiyet veren, dökümün alaşım elementlerinde bulunan en dikkate değer etkisi olan silisyum ve fosfordur (Öztürk, 2017).

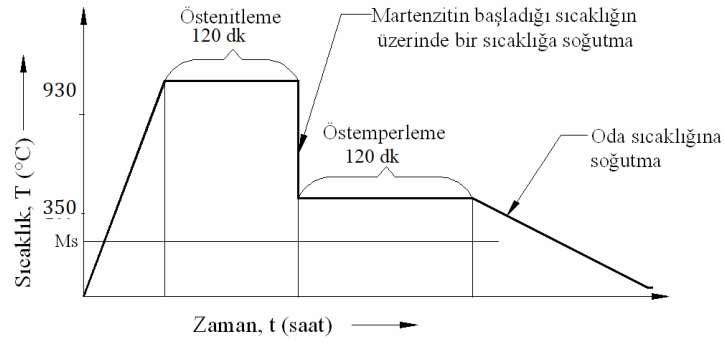
Döküme ait kimyasal kompozisyonun ötektik noktadan ne kadar uzakta olduğunun saptanması birçok döküm hatasının önüne geçmesi açısından önem taşır (Öztürk, 2017). Küresel grafitli dökme demirlerde ötektik üstü (hiperötektik) bir kompozisyon malzemede karbon yüzmesi olarak bilinen döküm sonrası numunelerin üst yüzeylerinde toplanması olarak tanımlanmaktadır (Anonim, 2018).

Karbon eşdeğeri eşitliği Denklem 3.1 kullanılarak %4,348 olarak hesap edilmiştir. Bu değer ötektik noktaya çok yakın olduğu söylenebilir.

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (3.1)$$

3.1.1. Östemperleme Isıl İşlemi

Daha önce MOTUS A.Ş.'de yapıldığı belirtilen proje sonucunda süneklik için en elverişli kombinasyonun 900-930°C sıcaklıklar arasında 1-3 saat östenitleme olduğu belirlenmiştir. Dökümü gerçekleştirilen iş parçası numunelere, ilk ısıtım işlem adımı olan östenitleme için 930°C'de 120 dk. boyunca bekletilmiş sonrasında östemperleme işlemi için de 350°C'deki tuz banyosunda 120 dk. boyunca bekletilmiştir (Şekil 3.7). Östemperleme işlemi malzemeye en iyi tokluğu sağlayan AS sınıfı ısıtım tuzu içeren sıcaklık kontrollü tuz banyosunda gerçekleştirilmiştir. Tuz banyosu östemperleme süresince sıcaklığın eşit dağılım sağlaması amacıyla bir mikser tarafından karıştırılmıştır. Daha sonra malzeme tuz banyosundan çıkarılıp oda sıcaklığında bekletilerek soğumaya alınmıştır. Daha sonra numunelerin yüzeyinde kalan tuz tabakasının giderilmesi için yıkanmıştır. Bu sayede malzemenin östemperleme işlemi tamamlanmıştır. Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Döksan Isıl İşlem Tesisleri'nde östemperleme ısıtım işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Östemperleme işlemi

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin (ÖKGDD) (EN-GJS-700-2) ve ASTM A897/A897M-16 standartları gereği hedef mekanik özellik aralığı Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

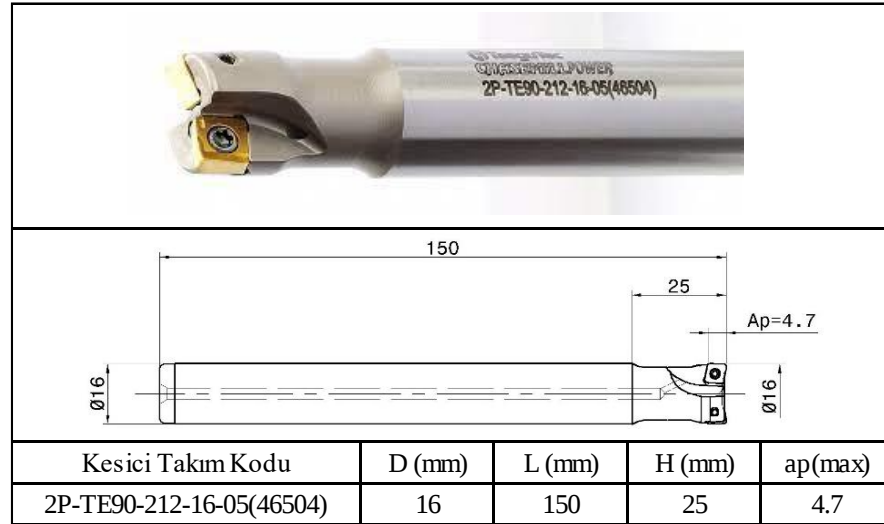
Çizelge 3.2. ÖKGDD 70 Hedef Mekanik Özellik Aralığı

Standart	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Akma Gerilmesi (Mpa)	Uzama %	Sertlik HRB
ASTM (A897/A897M-16) Grade 2-5	1050-1600	750-1300	1-7	302-512
GGG-70 (DIN 1693)	700	420	2	225-305

3.2. Kesici Takım ve Kesici Takım Ucu

Kesici takımda kesici uç sayısının artmasının iş parçasında titreşiminin artmasına neden olduğu bu nedenle yüzey pürüzlülük değerlerinde artışın meydana geldiği araştırmacılar tarafından gözlemlenmiştir (Dilipak ve Gezgın, 2010). Titreşimlerin artmasının da takımın çabuk aşınmasına ve kırılmasına sebep olduğu, ölçü tamlığına zarar verdiği ve en önemlisi takım tezgahının dinamik parçalarının ömürlerini düşürdüğü yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Konodo ve ark., 1997; Sadettin ve ark., 2006). Daha önce yapılan çalışmalar da göz önünde bulundurularak deneylerde frezeleme işlemi için TeaguTec firması tarafından üretilen, 16 mm çapında, iki adet kesici uç bağlanabilen, 90° kesme açılı sabit işleme kapasitesine sahip takma uçlu kesici takım kullanılmıştır (Çizelge 3.3).

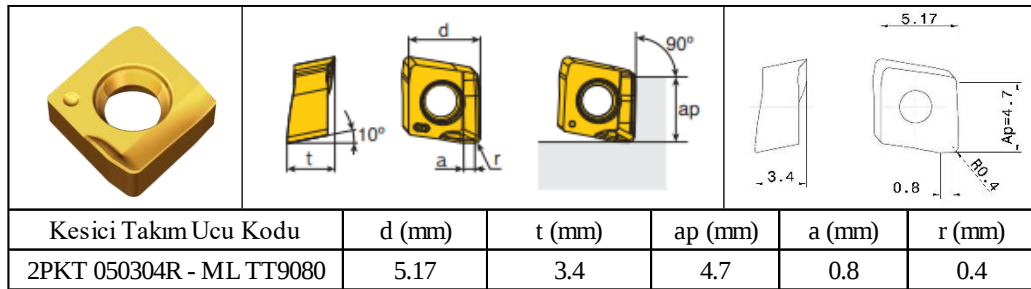
Çizelge 3.3. Kesici takımın teknik özellikleri



Sert malzemelerin işlenmesinde birçok sorundan söz edilmektedir. İşlemedeki sorunlardan birisi de erken takım aşınmasıdır. İşlenebilirliği artırmak için kesici takımlar nano yapılı fiziksel buhar biriktirmeli PVD sert kaplamalarla kaplanmaktadır. Bu tür gelişmiş sert kaplamalar yüksek mikro sertlik ve tokluğa sahiptir (Çalışkan ve ark., 2012). Daha önce yapılan çalışmalarda, AlTiN/TiN katmanlı PVD kaplı karbür uçlar ile sert malzemeler işlenmiş, yapılan frezeme işlemi sonucunda takım aşınmalarının düşük olduğu ve işlenen yüzeylerde pürüzlülüklerinin iyi olduğu belirtilmiştir (Kuram, 2016).

Daha önce yapılan çalışmalar da dikkate alınarak, TeaguTec firmasına ait 2PKT sınıfı AlTiN/TiN PVD kaplamalı tungsten karbür kesici uçlar kullanılmıştır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Kesici takımın teknik özellikleri



3.3. CNC Dik İşleme Tezgâhı

Deneyisel çalışmalarda, Konya Teknik Üniversitesi'nde bulunan Agma EA-600 marka CNC dik işlem merkezi kullanılarak talaş kaldırma işlemleri yapılmıştır (Şekil 3.8). Deneylerde kullanılan tezgâhın bilgileri Çizelge 3.5'te belirtilmiştir.



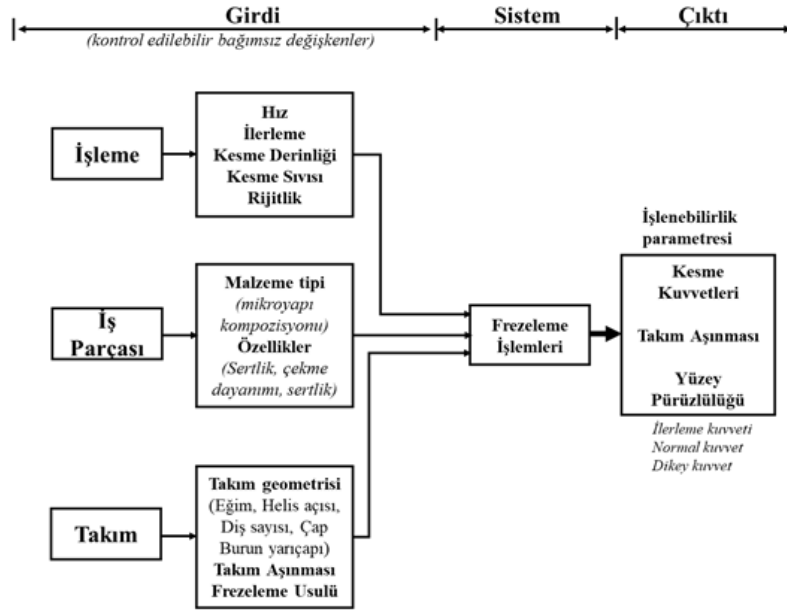
Şekil 3.8. Agma EA-600 CNC Dik İşlem Merkezi

Çizelge 3.5. Agma EA-600 CNC Dik İşlem Merkezine Ait Teknik Bilgiler

Tezgâh Özellikleri	Birim Değerler
Fener Mili Koniği	No 40
Güç Aktarma	Doğrudan Tahrik
Fener Mili Motor Hızı	10000 rpm
Fener Mili Çapı	70 mm
Tabla Ölçüsü	730x430 mm
X/Y/Z Eksen Hareketleri	600/410/460 mm
Magazin Kapasitesi	24 ad.
Maksimum Takım Çapı	Ø60 mm
Fener Mili Motor Gücü	7.5 kW
X/Y/Z Eksen Motor Gücü	3/3/3 kW
CNC Kontrol Ünitesi	Mitsubishi M70V/M720

3.4. Kesme Parametreleri

Frezeleme yöntemiyle işlenebilirliğin araştırılmasında kesici takımın aşınması ve yüzey pürüzlülüğü gibi sonuçlara birçok değişken etki etmektedir. Seçilebilecek ve kontrol edilebilecek değişkenler, bağımsız değişken olarak adlandırılmaktadır. Bunlar sisteme girdi olarak tanımlanır (Şekil 3.9). Bağımlı değişkenler ise bağımsız değişkenlere etki eder ve amaç fonksiyonunu meydana getirir. Tez çalışması kapsamında tek tip takım ve malzeme kullanılmıştır. Fakat kesme parametreleri için belirli aralık içerisinde, takım üreticilerinin önerileri ve literatür araştırmaları sonucunda Çizelge 3.6’da belirlenen değerler seçilmiştir.



Şekil 3.9. Frezelemede kesme kuvvetlerini etkileyen faktörler

Dik işlem merkezinde frezelemeye tabi tutulan 300x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılacağı kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme parametreleri için uygun olan üçer seviye deneyler yardımıyla Çizelge 3.7'deki gibi belirlenmiştir.

Frezeleme için, işlenecek numunenin malzemesi ve kesici takıma göre işleme parametreleri, kesici takım ucu imalatçı firmasının kataloğundan ve uzman görüşlere göre belirlenmiştir. Kesme kuvvetleri, kesici takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü gibi işlenebilirliğin sonucu olan değerlere etki eden parametrelerin çok sayıda olması deneysel çalışmalarda çok fazla maliyet ve zaman gerektirmesi sebebiyle bazı parametreler sabit tutulmuş, Taguchi yöntemi ile yeterli sayıda deneyle tüm parametre alanı incelenmiştir. Ölçülen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerlerine kesme koşullarının etkisi varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle belirlenmiştir.

Kesici takım imalatçı firması (TaeguTec) tarafından önerilen kesme koşulları Çizelge 3.6'da verilmiştir. Bu koşullar dikkate alınarak deneysel çalışmalarda kesme hızları (V_c) 130, 180 ve 250 m/dk, ilerleme hızı (f_r) 514, 776 ve 1034 mm/dk seçilmiştir. Bu parametrelerle diş başı ilerleme (f_z) ve iş mili hızı (S) Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.6. TaeguTec Tarafından Önerilen Parametreler

ISO Kodu	V _c , Kesme hızı (m/dk.)	Talaş Derinliği a (mm)	f _z , Diş Başına Minimum İlerleme (mm)
K 18	100- 200	0,5- 4,2	0,02- 0,12

$$S = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot DC_{ap}} \quad (3.2)$$

$$F_{tab} = f_z \cdot S \cdot ZEFF \quad (3.3)$$

S : İş mili hızı, dev/dk.

V_c : Kesme hızı, m/dk.

DC_{ap} : Kesme derinliğinde kesme çapı (takım çapı), mm

F_{tab} : Tabla ilerlemesi, mm/dk.

f_z : Diş başına ilerleme, mm

ZEFF : Takıma bağlı kesici uç sayısı, adet

Çizelge 3.7. İş mili hızı (S) hesabı

V _c (m/dk)	DC _{ap} (mm)	S (dev/dk)
130	16	2587
180	16	3582
250	16	4976

Çizelge 3.8. Diş başı ilerleme (f_z) hesabı

S (dev/dk)	ZEFF (adet)	f _r (mm/dk)	f _z (mm)
2587	2	514,4	0,1
2587	2	776,1	0,15
2587	2	1034	0,2
3582	2	514,4	0,07
3582	2	776,1	0,1
3582	2	1034	0,15
4976	2	514,4	0,05
4976	2	776,1	0,07
4976	2	1034	0,1

Belirlenen kesme parametreleri Taguchi L9 deney tasarım tablosuna Çizelge 3.9'daki gibi yerleştirilmiştir. Her bir deney üç tekrarlı olarak yapılmıştır. Deneyler kuru

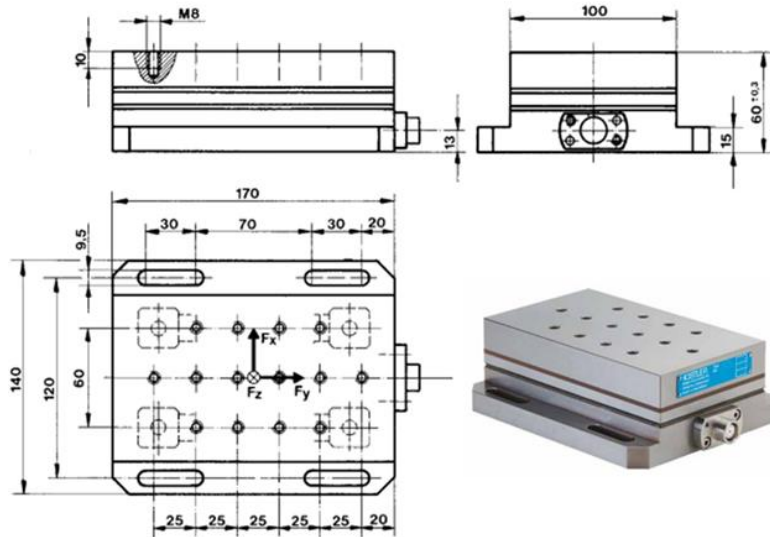
kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Malzemenin işlenebilirlik derecesini belirlemek için kesme kuvvetleri ve işlenen yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür.

Çizelge 3.9. Kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği)

Deney No	Vc (m/dk)	İlerleme miktarı, fr (mm/dk)	Talaş Derinliği, a (mm)
1	130	514.4	0.5
2	130	776.1	0.75
3	130	1034	1
4	180	514.4	0.75
5	180	776.1	1
6	180	1034	0.5
7	250	514.4	1
8	250	776.1	0.5
9	250	1034	0.75

3.5. Kesme Kuvvetinin Ölçümü

Deneysel çalışmalarda frezeleme ile talaş kaldırma işlemleri sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçümleri Kistler markasına ait 9257 B model üç eksenli dinamometre ile kayıt altına alınmıştır. Dinamometreye ait teknik resim Şekil 3.10'da verilmiştir.

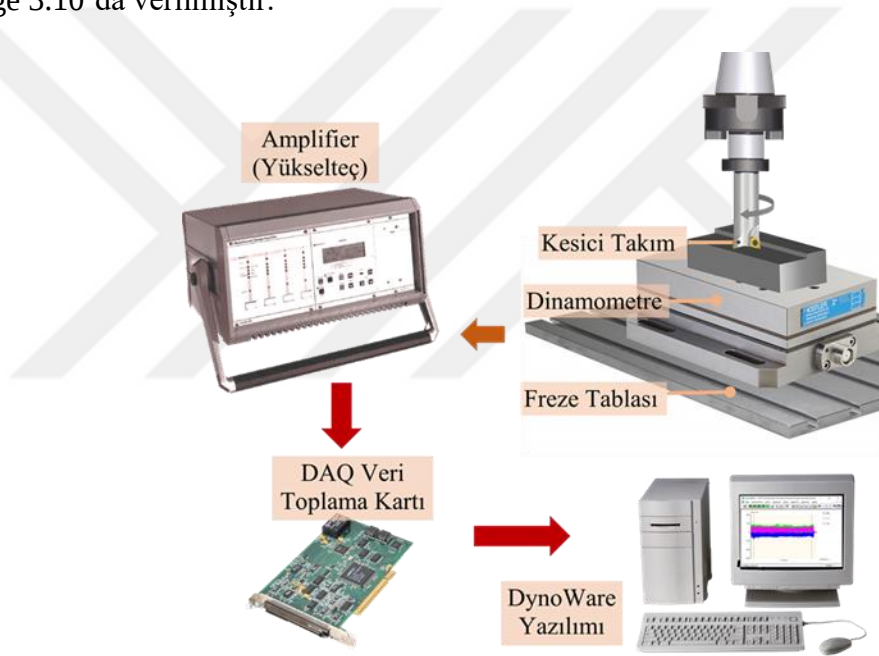


Şekil 3.10. Kistler 9257 B Dinamometrenin Teknik Resmi

Dinamometre ile kesme kuvvetinin ölçülmesini sağlayan araç ve çalışma sistemi aşağıdaki gibidir:

- Üç eksenli (x , y ve z) F_x , F_y ve F_z kuvvetlerini hesaplayan dinamometrenin kuvvet sensörü ölçtüğü verileri amplifikatöre iletir.
- Kuvvet sensöründen çıkan x , y ve z eksenlerindeki verileri voltaj sinyaline dönüştüren amplifikatör, analog verileri veri toplama ünitesine (DAQ) iletir.
- Ölçülen analog verileri dijital verilere dönüştüren veri toplama ünitesi (DAQ), Dynoware yazılımı ile işlenen F_x , F_y ve F_z kuvvetlerin grafiksel ve sayısal değerleri elde edilir ve görüntülenir.

Deney düzeneğinin çalışma şeması Şekil 3.11’de gösterilmiştir. 9257 B tip Kistler marka dinamometre ve tip 5019B Kistler çok kanallı şarj amplifikatörüne ait özellikler Çizelge 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.11. Kesme Kuvvetleri Ölçümü Deney Düzeneği

Çizelge 3.10. Kistler 9257B Tipi Dinamometrenin ve Kistler 5019A Tipi Amplifier Teknik Özellikleri

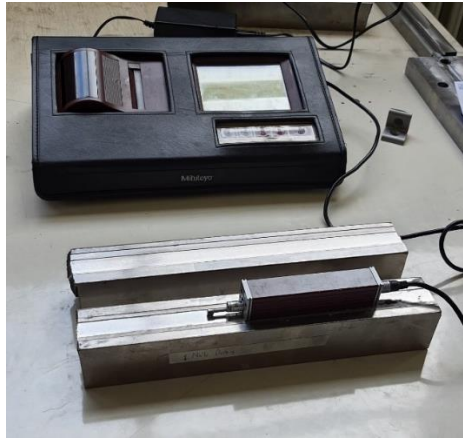
Dinamometre Teknik Özellikleri	9257 B
Kuvvet Aralığı (kN), (F_x , F_y , F_z)	-5 ... 10
Tepki (N)	<0,01
Hassasiyet (pC/N), (F_x , F_y , F_z)	2,142857143
Doğrusallık	%1 FSO
Histerezis	%0,5 FSO
Doğal frekans $f_0(x,y,z)$ (kHz)	3,5
Çalışma sıcaklığı (oC)	0...70
Kapasitans (pF)	220

20 oC'deki yalıtım direnci (Ω)	>1013
Topraklama yalıtımı (Ω)	> 108
Koruma sınıfı	IP 67
Ağırlık (kg)	7,3
Amplifier Teknik Özellikleri	5019 B
Kanal Sayısı	3...4
Ölçüm Aralığı (pC)	$\pm 10 \dots 999'000$
Sensör Hassasiyeti (pC / M.U.)	0,01 ... 9'990
Ölçek (M.U. / V)	0,001 ... 9'990'000
Çıkış Voltajı (V)	± 10
Çıkış Akımı (mA)	0 ... ± 5
Çıkış Empedansı (Ω)	10
Frekans Sınırı (kHz)	$\approx 0 \dots 200$

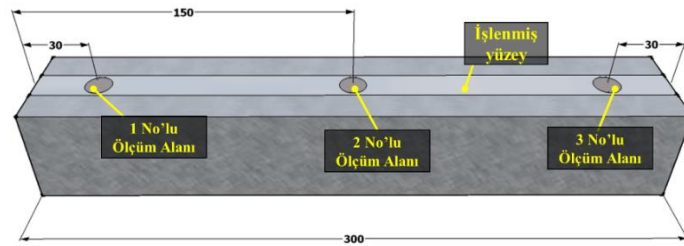
Kuvvet ölçümü için kullanılan dinamometre tezgâh tablasına monte edilmiştir ve deney numuneleri yeni ara tabla vasıtasıyla bu dinamometre üzerine bağlanmıştır. Her bir deneyde oluşan sinyaller dinamometre vasıtası ile amplifiere (yükselteç) oradan da Dynoware yazılımı sayesinde bilgisayara aktarılmıştır. Yazılımdan alınan Z ekseninde oluşan Fz kuvveti kesme kuvveti üzerine etkisi çok düşüktür. Bu nedenle frezelemede kesme kuvveti olarak dinamometre ile ölçülen Fx ve Fy kuvvet bileşenleri hesaba alınmıştır. Aktif kuvvet (Fa) her iki ekseninde oluşan (Fx ve Fy) kuvvetlerinin bileşkesidir. Bileşke kuvvet ise Denklem 2.12 kullanılarak hesaplanmaktadır.

3.6. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Yüzey pürüzlülük değerlerinin hesaplanması için Konya Teknik Üniversitesi'nde bulunan Mitutoyo marka, SJ-301 model yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.12). Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 3.11'de verilmiştir. İşlenen her numunenin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Numune üzerinden üç farklı noktadan üçer adet ölçüm alınmıştır (Şekil 3.13). Pürüzlülük ölçümlerinde ortalama pürüzlülük R_a , en yüksek ve en alçak nokta arasındaki uzunluğun ortalaması olan R_z cinsinden standartlara uygun ölçümler elde edilmiştir (ISO, 1997).



Şekil 3.12. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Deney Düzeneği

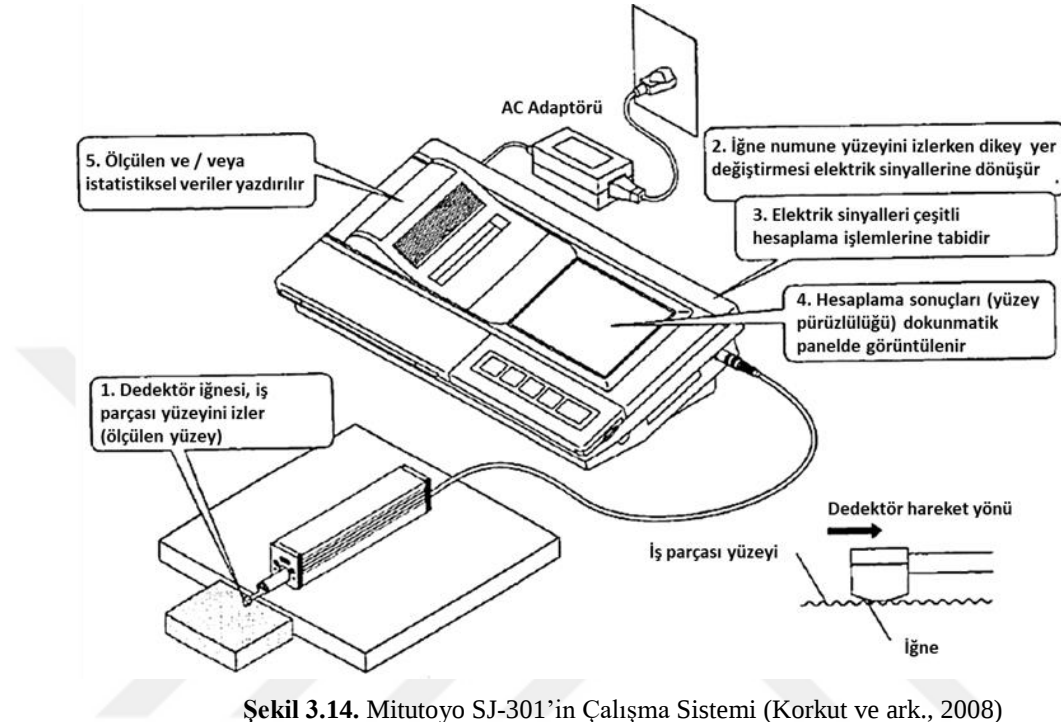


Şekil 3.13. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin yapıldığı bölgeler

Çizelge 3.11. Mitutoyo SJ-301 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazının Teknik Özellikleri

SÜRÜCÜ ÜNİTESİ	ÖLÇÜM ARALIĞI	Z EKSENİ (μM)	0,02...350
		X Ekseni (mm)	12.May
	Tahrik Ünitesi	Tahrik Hızı (mm/s)	0.25-0.5
		Ağırlık (g)	190
Dedektör Ünitesi	Dedektör	Algılama yöntemi	Diferansiyel endüktans
	İğne	Malzemesi	Elmas
		Uç Yarıçapı (μm)	5
		Ölçme Kuvveti (mN)	4
		Ağırlık (g)	18
		Dalga Boyu Uzunluğu (L) (mm)	0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8
Ölçüm Standartları	JIS, DIN, ISO, ANSI (TS 6212 EN ISO 4288)		
Ölçüm Değerleri	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Rq, Rv, Sm, S, Pc, R3z,mr,Rpk,Rvk,sc,Rk, Mr1,Mr2,Lo,Ppi,R,AR,Rx,A1,A2,Vo,HSC.mrd,sk,Ku,Δa,Δq,Wte, Wt,W,AW		

Yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmadan önce değeri önceden bilinen kalibrasyon numuneleri ile kalibre edilerek deneysel çalışmaya geçilmiştir. Mitutoyo SJ-301 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının çalışma sistemi Şekil 3.14'te gösterildiği gibidir. Genelde mühendislik uygulamalarında kullanılan örnekleme uzunluğu ISO 4287 standardına göre λ_c 0.8 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.14. Mitutoyo SJ-301'in Çalışma Sistemi (Korkut ve ark., 2008)

3.7. Takım Aşınmasının Ölçümü

Her malzemenin avantajlarını ve sınırlarını anlamak için kesici takımların maruz kaldığı farklı aşınma mekanizmaları hakkında bilgi sahibi olmak önemlidir (Anonim, 2021b). İşleme maliyetini en aza indirmek için, yalnızca belirli bir işleme operasyonunda en uygun takım ve iş malzemesi kombinasyonunu bulmak değil, aynı zamanda takım ömrünü de güvenilir bir şekilde tahmin etmek gerekir (Grzesik, 2017).

Kesici takım uçlarında meydana gelen yüzey aşınma miktarları (V_B) ve yüzey aşınma tipleri Mitutoyo marka 0,001 mm hassasiyete, 5 ila 10 kat büyütme kapasitesine sahip takımcı ışık mikroskopuyla elde edilmiştir. Belirlenen kesme parametreleri ile işlenen belirli bir paso sayısından sonra kesici takım ucu incelenmiş, ölçüm ve gözlemler kayıt altına alınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan takımcı mikroskobu Şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3.15. Takımcı Mikroskopu

Kesici takım ucunda meydana gelen aşınmaların incelendiği mikroskopta X-Y eksenlerinde hareket eden tabla bulunmaktadır. Bu tablalar aynı eksenlerde mikrometreler ile desteklenmiştir. Bu sayede meydana gelen aşınma miktarları 0,01 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Ölçüme referans olacak koordinat sistemini oluşturan, göz merceğinde “+” şeklinde işaret bulunmaktadır. Yan yüzey aşınması (V_B), burun aşınması ve krater aşınmasının genişliği (K_B) meydana gelip gelmediği incelenerek sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Kesici takım ucunun aşınma deneyleri kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü bütün deneylerde değil, aşınmanın yüksek olacağı beklenen Çizelge 3.12’de verilen kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.12. Takım aşınma deneyleri için kesme parametreleri

Deney No	Kesme Hızı V_c (m/dk.)	İlerleme hızı, f_r (mm/dk.)	Talaş Derinliği, a (mm)
1	130	1034	1
2	250	514.4	1
3	250	514,4	0,5
4	180	370	1

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

GGG70 küresel grafitli dökme demir malzeme prizmatik bir deney numunesi olarak döküldükten sonra östemperleme ısı işlemine tabi tutulmuş ve mekanik özellikleri belirlendikten sonra seçilen kesme koşullarında işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünün deneysel sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Deney parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etki oranları Varyans analizi (ANOVA) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan araştırmaların sonuçları aşağıda anlatılmıştır.

4.1. Malzemeye Ait Mekanik Özellikler

GGG70 küresel grafitli dökme demir malzemeye östemperleme işlemi uygulanmasının amacı yüksek mukavemet, tokluk ve süneklik kazandırmaktır. 310 HRB sertlik değeri hedefiyle ısı işlemleri yaptırılmıştır. Östemperlenmiş numunelere kaba işleme sonrasında KTÜN Laboratuvarında, ASTM E18 standardı izlenerek, Affri 206 RTD Sertlik Ölçme Cihazı kullanılarak, Rockwell C Sertlik ölçümü yapılmıştır. Elde edilen değerler ASTM E140 standardında gösterilen tablolar kullanılarak Brinell Sertlik ölçeğine dönüştürülerek numunelerdeki sertlik değerlerinin 252 – 300 HRB arasına olduğu görülmüştür.

Östemperleme işlemi sonrası ÖKGDD malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Isıl işlem sonrası numunelerin (A897/A897M-16) Grade 2-5’e göre uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1. Östemperleme işlemi sonrası ÖKGDD malzemenin mekanik özellikleri

Akma Gerilmesi (Mpa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Uzama (%)
807	1010	9,2

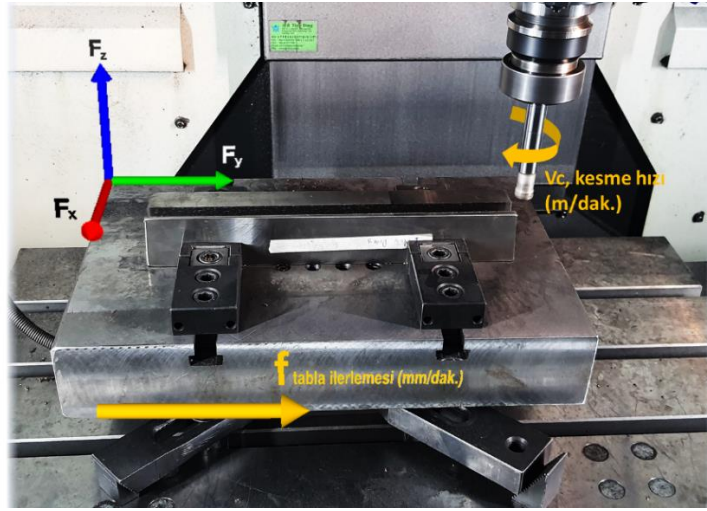
Savkovic ve ark. (2019) GGG 70 küresel grafitli dökme demire 900°C’de 120 dakika östenitleme, 350°C’de yaklaşık 120 dakika östemperleme ısı işlemi uygulamış ve östemperleme sonrasında numunenin, 1110 MPa çekme gerilmesine, 995 MPa akma gerilmesine ve 456 HRB sertlikte olduğunu bulmuşlardır. Isıl işlem şartları yaklaşık olarak aynı olsa da sonuçlar arasında bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin malzemelerin kimyasal bileşimindeki farklılıktan kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

4.2. Kesme Kuvveti Ölçüm Sonuçları

Tekrarlarıyla birlikte yapılan toplamda 27 adet deneyden elde edilen kesme kuvvetleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi Fx kuvveti iş parçası ilerleme doğrultusunda ölçülen ilerleme kuvvetidir. Fy ise ilerleme kuvvetinin normali doğrultusundaki kuvvettir. Bu iki kuvvetin bileşkesi aktif kuvvet Fa’yı oluşturmaktadır.

Çizelge 4.2. İşlenebilirlik deneylerinden ölçülen kesme kuvveti değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	DENEY PARAMETRELERİ			KESME KUVVETLERİ (N)				
		Vc (m/dk.)	fr (mm/dk)	a (mm)	Fx	Fy	Fa	ORT Fa	STD.SA PMA
1	1.1	130	514.4	0.5	37,1	84,6	92,4	96	7,2
	1.2				45,9	88,4	99,6		
	1.3				53,1	80,1	96,1		
2	2.1	130	776.1	0.75	91,9	140,1	167,5	164,1	6,7
	2.2				82,1	142,1	164,1		
	2.3				77,3	141,0	160,8		
3	3.1	130	1034	1	100,0	223,2	244,5	242,5	17,6
	3.2				106,2	207,2	232,8		
	3.3				112,7	223,3	250,1		
4	4.1	180	514.4	0.75	41,4	84,4	94,0	90,3	13,7
	4.2				40,0	85,6	94,5		
	4.3				43,1	70,2	82,4		
5	5.1	180	776.1	1	81,6	146,0	167,3	170,4	10,1
	5.2				79,3	147,6	167,6		
	5.3				85,8	153,9	176,2		
6	6.1	180	1034	0.5	64,8	98,8	118,2	107,7	19,9
	6.2				54,9	91,1	106,3		
	6.3				52,7	83,2	98,4		
7	7.1	250	514.4	1	49,5	88,8	101,7	100,4	2,6
	7.2				51,4	86,3	100,4		
	7.3				48,0	86,7	99,1		
8	8.1	250	776.1	0.5	46,8	58,3	74,8	72,08	8,3
	8.2				49,7	57,0	75,6		
	8.3				42,7	52,9	68,0		
9	9.1	250	1034	0.75	58,3	102,9	118,2	120,3	4,0
	9.2				59,6	104,6	120,4		
	9.3				59,7	106,6	122,2		



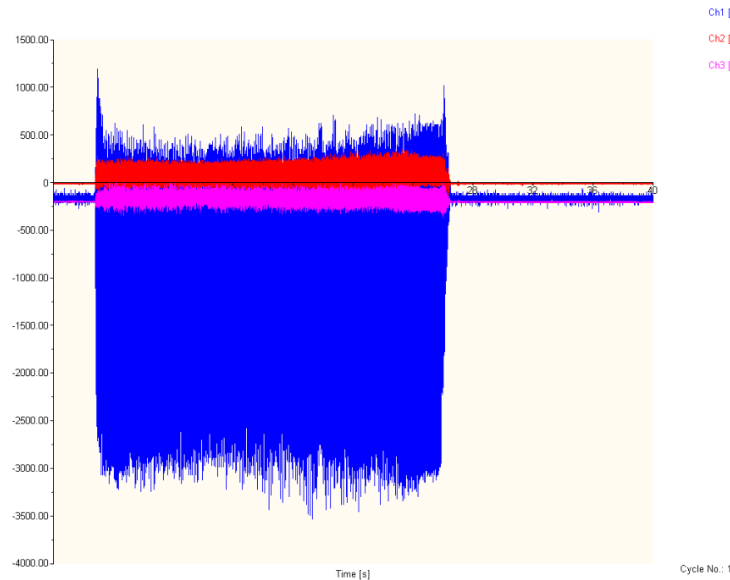
Şekil 4.1. Dinamometre ile Ölçülen Kuvvet Yönü ve Bileşenleri

Kuvvet değerleri dinamometreye bağlı dynoware yazılımından Şekil 4.2 a’da görüldüğü gibi alınmıştır. Veri alma sıklığı 500 Hz’dir. Ch1 değeri F_y kuvvetini, Ch2 değeri F_x kuvvetini ve Ch3 değeri F_z kuvvetini göstermektedir. 2 ağızlı takımında her bir kesme kenarı talaş kaldırmaya başlayıp bitirinceye kadar kuvvetler değişkenlik gösterdiği için veriler sinüzoidal bir eğri çizmiştir. Kesme kuvvetlerinin değerlendirmeye alınabilmesi için yine Dynoware yazılımında verilere düzleştirme (smooth) işlemi yapılarak Şekil 4.2 b’deki gibi ortalama değerler elde edilmiştir. Ölçülen net kuvvet değerlerinin hesaplanabilmesi için kesme işlemi başlamadan önce kayıt alınmaya başlamıştır. Böylece yüksüz durumdaki kuvvet, yük uygulandıktan sonraki kuvvetten çıkartılarak net kuvvet hesaplanmıştır. Dinamometrenin ölçüm doğruluğu, 2 kg, 17 kg ve 25,5 kg ağırlığındaki kütlelerin dinamometre ile her eksen için ölçülmesi ile kontrol edilmiştir. Ölçümler sonucunda Ch2 kanalından alınan F_x ve Ch3 kanalından alınan F_z kuvvetinin %99,5 doğrulukla ölçüm yaptığı belirlenmiştir. Ancak Ch1 kanalından alınan F_y kuvveti değerlerinin gerçekteki ölçülen değerleri 6-98 ila 7.045 kat yüksek gösterdiği bulunmuştur. Bu nedenle yazılımdan kaydedilen F_y kuvvet değerleri ortalama olarak 7.015’e bölünerek değerlendirmeye alınmıştır.

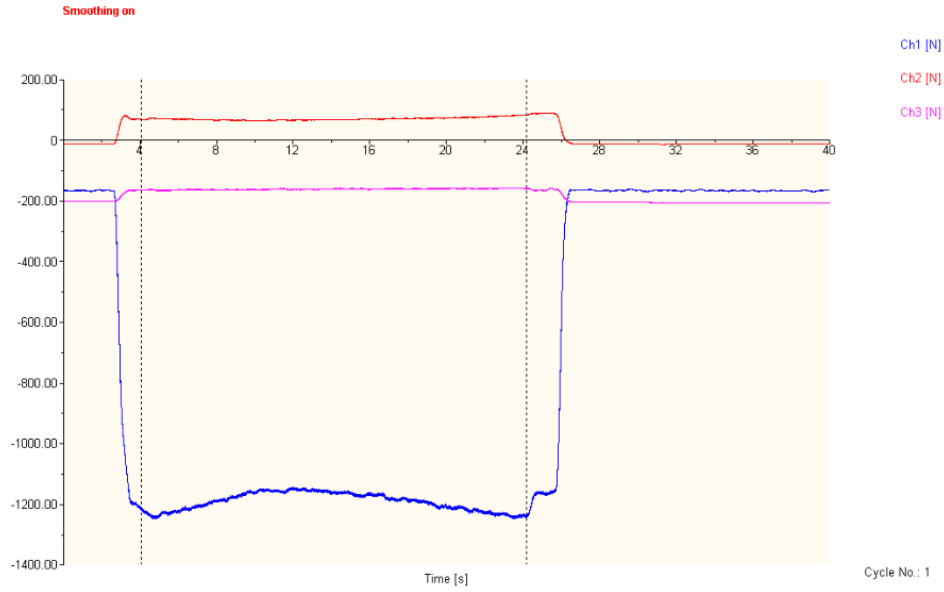
Aktif kesme kuvveti değerleri deneylerde 72 N ila 242 N arasında değişkenlik göstermiştir. Ölçülen değerlerin doğruluğunu teyit etmek amacıyla benzer malzemelerin frezelenmesi sonucuna ölçülen kuvvetlerle kıyaslama yapılmıştır. Buna göre Eraslan ve ark. (2021), iş parçası olarak 1023 MPa çekme ve 702 MPa akma gerilmesine sahip ADI 1050-6 sınıfı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir kullanmışlardır. 10 mm çapında, dört ağızlı parmak freze takımı ile 150 m/dk. kesme hızı, 1031 mm/dk. ilerleme hızında, 1 mm talaş derinliğinde ve farklı soğutma koşulları altında yaptıkları frezeleme

işleminde 132,12 ila 193,63 N arasında aktif kesme kuvveti elde etmişlerdir. Eraslan ve ark. (2021) çalışmasında, tez çalışmasında ölçülen kuvvetlere yakın kuvvetler ölçüldüğü görülmektedir. Yine Sinlah ve ark. (2016) iş parçası malzemesi olarak AISI 4340, ADI 900, 1050 ve 1200 sınıflarını kullanmışlardır. 19 mm çapında, 2 kesici uç bağlanabilen parmak freze takım kullanmışlardır. 1 mm kesme derinliğinde 0,15 mm/diş (1267 mm/dk.) ve 252,5 m/dk. kesme koşullarında yaptıkları deneysel çalışmada tez çalışmasındakine benzer özellikteki ADI 1050 malzeme 188 ile 435 N arasında kesme kuvvetlerini sergilemiştir. Elde edilmiş olan kesme kuvvetleri tez çalışmasındakinden çok farklı değildir. Bu nedenle tez çalışmasında ölçülen kuvvetlerin gerçekçi olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.2’de her bir deneyin üç tekrarı için hesaplanan aktif kuvvetin ortalaması ve standart (STD) sapması verilmiştir. Her bir deneydeki ortalama kuvvet ve STD sapma değeri Şekil 4.3’te de görülmektedir. Ortalama STD sapma değeri 10,38 N’dur. STD sapmaların aktif kuvvete oranı alındığında minimum değer %2,5 maksimum değer %18,5 kadar olmuştur. Ortalamada ise %8,4 oranında ölçüm kuvvetlerinde belirsizlikten söz edilebilir. Kesme kuvveti ölçümlerinde minimum kuvvet 8. Deneyde ölçülmüştür. Bu deneyde kesme hızı V_c 250 m/dk ilerleme hızı f 776.1 mm/dk ve talaş derinliği d 0.5 mm’dir. Maksimum kuvvet ise kesme hızının 130 m/dk ilerleme hızının 1034 mm/dk ve talaş derinliğinin de 1 mm olan 3. deneyde ölçülmüştür.

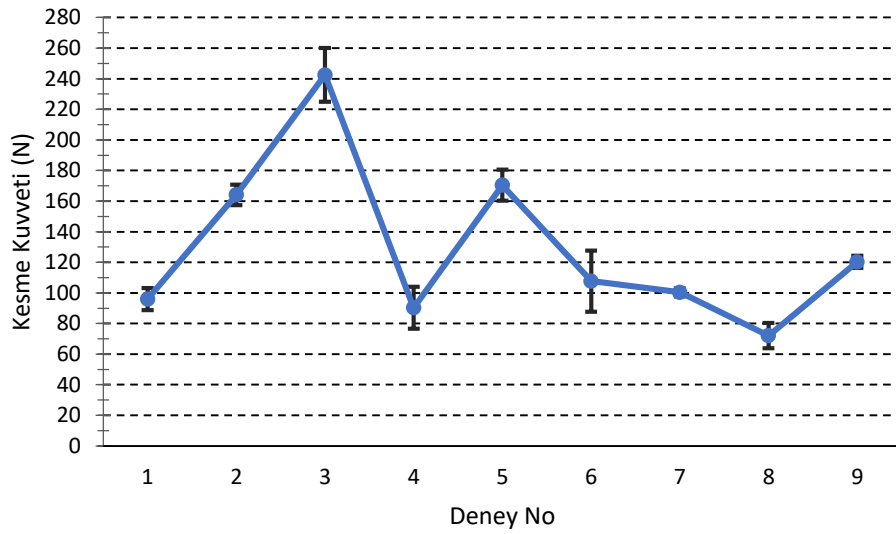


a)



b)

Şekil 4.2. Dynoware Yazılımından Alınan Kuvvet Ölçüm Sonuçları Ch1 Fx, Ch2 Fy ve Ch3 Fz kuvvetidir. a) Verilerin düzleştirilme öncesi, b) Verilerin düzleştirilme sonrası



Şekil 4.3. Ortalama Aktif Kesme Kuvveti ve Hata Çubukları

Çizelge 4.3'te gösterilen kesme parametrelerinin talaş kaldırma sırasında ölçülen kuvvetlerin bileşkesine (F_a) etkileri Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi ile incelenmiştir. Varyans analizinde istatistiksel olarak %95 güven aralığında çalışılmıştır. Analizlerde V_c , f_r ve talaş derinliği bağımsız değişken, bileşke kesme kuvveti (F_a) bağımlı değişkendir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisi % dağılımı ile Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Serbestlik derecesi parametre seviyesinin bir eksisidir. Bağımlı değişkenin oluşmasında P anlamlılık değeri 0,05'in altında olan

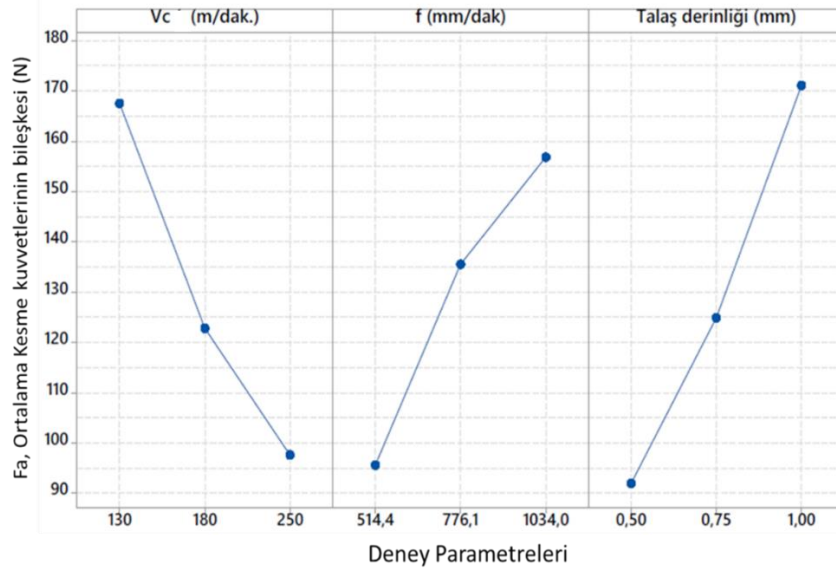
bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkene istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olduğu anlamına gelmektedir. P değeri 0.01'in altında olan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende yüksek düzeyde anlamlı fark oluşturduğu bilinmektedir. Analizde bağımsız değişken değerlerinin tümünün P değerleri 0,05 in altında olması kesme kuvvetleri üzerinde seçilen parametrelerin ve düzeylerinin anlamlı bir etkisinin olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3'te talaş derinliğinin %41,26 oran ile kesme kuvvetlerine etkisinin en fazla olduğu görülmektedir. Ardından %32,73 oran ile kesme hızının ve %25,24 oran ile ilerleme hızının aktif kesme kuvvetine (Fa) etki ettiği görülmektedir.

Çizelge 4.3. Kesme Kuvvetleri Varyans Analiz Sonuçları

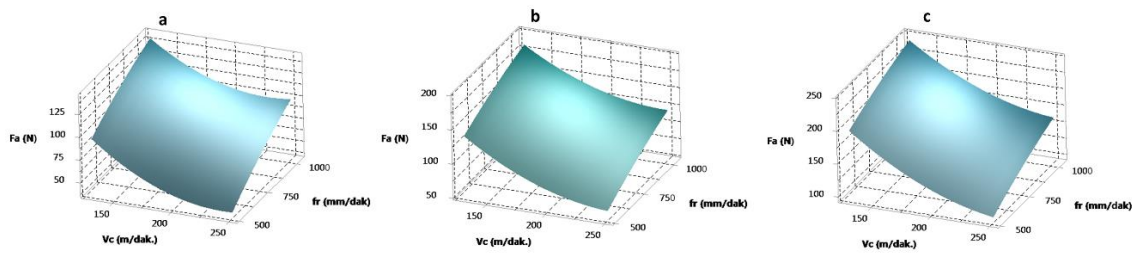
Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	% Etki	Kareler Toplamı	Karelerin Ortalaması	F-Değer	P-Değer
Vc (m/dk.)	2	%32,73	7528,1	3764,03	42,12	0,023
fr (mm/dk)	2	%25,24	5804,4	2902,19	32,47	0,03
Talaş derinliği (mm)	2	%41,26	9490,1	4745,05	53,09	0,018
Hata	2	%0,78	178,7	89,37		
Toplam	8	%100.00%	23001,3			
<i>S=9,45382, Rsq=%99,22, R-sq(adj)=%96,89, R-sq(pred)=%84,26, P-Değer Anlamlılık<0,05</i>						

Bileşke kuvvet üzerine kesme parametrelerinin etki grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. Kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinde önemli miktarda azalmanın olduğu görülmektedir. Kesme hızının 130 m/dak.'dan 180 m/dak. hıza çıkması ile Fa'nın değeri %27 oranında düşmüştür. Aynı şekilde kesme hızının 180 m/dk.'dan 250 m/dk. hıza çıkması ile Fa değerinde düşüş oranı %21 olmuştur. İlerleme hızının artması neticesinde Fa kuvvetinde de artış meydana gelmektedir. İlerleme hızı fr'nin 514,4 mm/dak.'dan 776,1 mm/dak'a çıkması ile %41,4 oranında; 776,1 mm/dak.'dan 1034 mm/dak değerine çıkması ile de %16 oranında bir artış meydana gelmiştir. Kesme derinliği veya diğer bir deyişle talaş derinliğinin artmasının da aktif kesme kuvvetinin artmasına neden olduğu görülmektedir. Talaş derinliğinin 0,5 mm'den 0,75 mm'ye artması ile kesme kuvveti %35,6 oranında; 0,75 mm'den 1 mm çıkması neticesinde de %36,7 oranında artış olmuştur.



Şekil 4.4. Deney Parametrelerinin Kesme Kuvvetlerinin Bileşkesine (Fa) Etki Grafiği

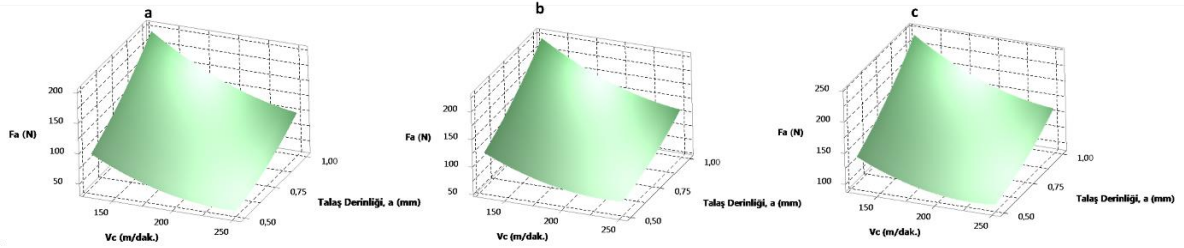
Farklı talaş derinliklerinde kesme hızı ve ilerleme hızına bağlı olarak aktif kesme kuvveti F_a 'nın değişim grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere 0,5, 0,75 ve 1 mm talaş derinliklerinde ilerleme hızının artması ile kesme kuvveti de artmıştır. Kesme hızının artması ile kesme kuvvetinde önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir. En yüksek kesme kuvveti, en yüksek ilerleme hızı olan 1034 mm/dk. ile en düşük kesme hızı olan 130 m/dk. kesme koşullarındaki talaş kaldırma işleminde gerçekleşmektedir. En düşük kesme kuvveti ise en düşük ilerleme hızı olan 514,4 mm/dk. ile en yüksek kesme hızı olan 250 m/dk. kesme koşullarında meydana gelmektedir. Talaş derinlikleri arttıkça kesme kuvvetinde de artış meydana gelmektedir. Buradan ilerleme hızının artması gerektiği durumda kesme hızının da artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.5. Farklı Talaş Derinliklerinde Kesme Hızı ve İlerleme Hızının Kesme Kuvveti F_a 'ya (N) etki grafiği a) $a = 0,5$ mm b) $a = 0,75$ mm c) $a = 1$ mm

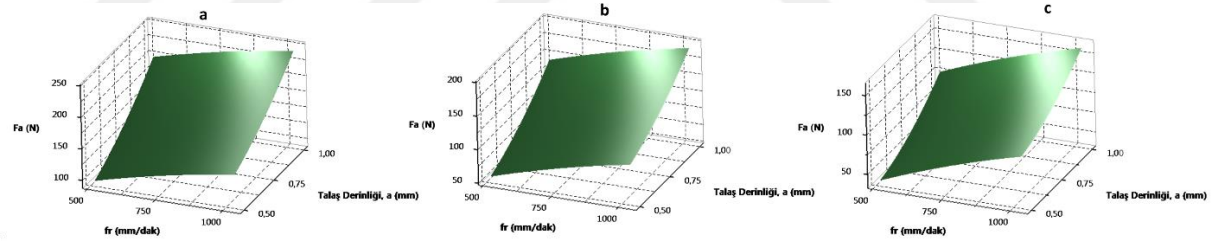
Üç farklı ilerleme hızında, kesme hızı ve talaş derinliğinin aktif kesme kuvveti üzerine etki grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6 a, b ve c'de verilen grafiklerde görüldüğü üzere 514,4, 776,1 ve 1034 mm/dk. ilerleme hızlarında talaş derinliği ve

ilerleme hızının artması ile kesme kuvvetinin arttığı görülmektedir. En düşük kesme kuvveti, en yüksek kesme hızı olan 250 m/dk. ve en büyük talaş derinliği olan 1 mm’de meydana gelmektedir. Buradan talaş derinliğinin artırılması gerektiği durumlarda kesme hızının da artırılması ile kesme kuvvetinin azaltılabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.6. Farklı İlerleme Hızlarında Kesme Hızı ve Talaş Derinliğinin Kesme Kuvveti F_a 'ya (N) Etki
Grafığı a) $f_r = 514,4$ mm/dk. b) $f_r = 776,1$ mm/dk. c) $f_r = 1034$ mm/dk

Şekil 4.7 a, b ve c’de sırası ile 130, 180 ve 250 m/dk. kesme hızlarında, ilerleme hızı ve talaş derinliğine bağlı aktif kesme kuvveti üzerine etkisi görülmektedir. Talaş derinliği ve ilerleme hızının artması ile kesme kuvveti de artmıştır. Bu sebeple talaş derinliğinin artırılması gereken durumda ilerleme hızının düşürülmesi, ilerleme hızının artırılması gereken durumda talaş derinliğinin azaltılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.7. Farklı Kesme Hızlarında İlerleme Hızı ve Talaş Derinliğinin Kesme Kuvveti F_a 'ya (N) Etki
Grafığı a) $V_c = 130$ m/dk. b) $V_c = 180$ m/dk. c) $V_c = 250$ m/dk

Talaş kaldırma işleminde kesme kuvvetlerinin azaltılması işlenebilirlik açısından olumludur. Bu yüzden kesme kuvvetleri üzerinde etkileri bulunan kesme parametrelerinin optimizasyonu ve işlenebilirliğin artması önem taşır. Yapılan bu çalışmada ÖKGDD deney numunelerinden talaş kaldırılması sırasında ölçülen kesme kuvvetlerinin minimum seviyeye indirilmesi amacı ile kesme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Kesme kuvvetleri üzerine yapılan deneysel çalışmada elde edilen optimizasyon değerleri çoklu regresyon modeli kullanılarak Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Kesme Kuvveti İçin Optimize Edilmiş Parametreler

Değişken	Değer			
Vc (m/dk.)	243,93			
fr (mm/dk.)	514.4			
Talaş derinliği (mm)	0.5			
Cevap	Uyum	SE Uyum	%95 Güven Aralığı	%95 Tahmin Aralığı
Fa	38,66	*	(*,*)	(*,*)

Çizelge 4.4'te gösterilen kesme parametreleri için %95 güven aralığında, 243,93 m/dk. kesme hızında (Vc), 514,4 mm/dk. ilerleme hızı (fr) ve 0,5 mm talaş derinliğinde uygulandığında bileşke kesme kuvvetin (Fa) 38,66 N olduğu tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.5. Optimize Edilmiş Kesme Parametreleri Kullanılarak Yapılan Frezeleme İşleminden Elde Edilen Kesme Kuvveti

Deney Tekrarı	DENEY PARAMETRELERİ			KESME KUVVETLERİ (N)			
	Vc (m/dk.)	fr (mm/dk)	Talaş Derinliği (mm)	Fx	Fy	Fa	ORT Fa
1	243,93	514,4	0,5	41,6	46,5	62,4	62,3
2				39,2	44,8	59,6	
3				43,9	47,9	65,0	

Çizelge 4.4'te verilen kesme kuvveti için verilen tahmin değerinin doğrulanması amacıyla Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi 3 tekrarlı deney uygulanmıştır. Optimize edilmiş kesme parametreleri olan 243,93 m/dk. kesme hızı, 514,4 mm/dk. ilerleme hızı ve 0,5 mm talaş derinliğinde frezeleme yapılarak 59,6 N ila 65 N arasında aktif kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen kesme kuvveti Minitab 19'dan alınan istatistiksel tahminden fazla olsa da tekrarları ile birlikte 27 adet kesme kuvveti deneylerinde elde edilen tüm kesme kuvvetlerinden daha düşüktür.

4.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

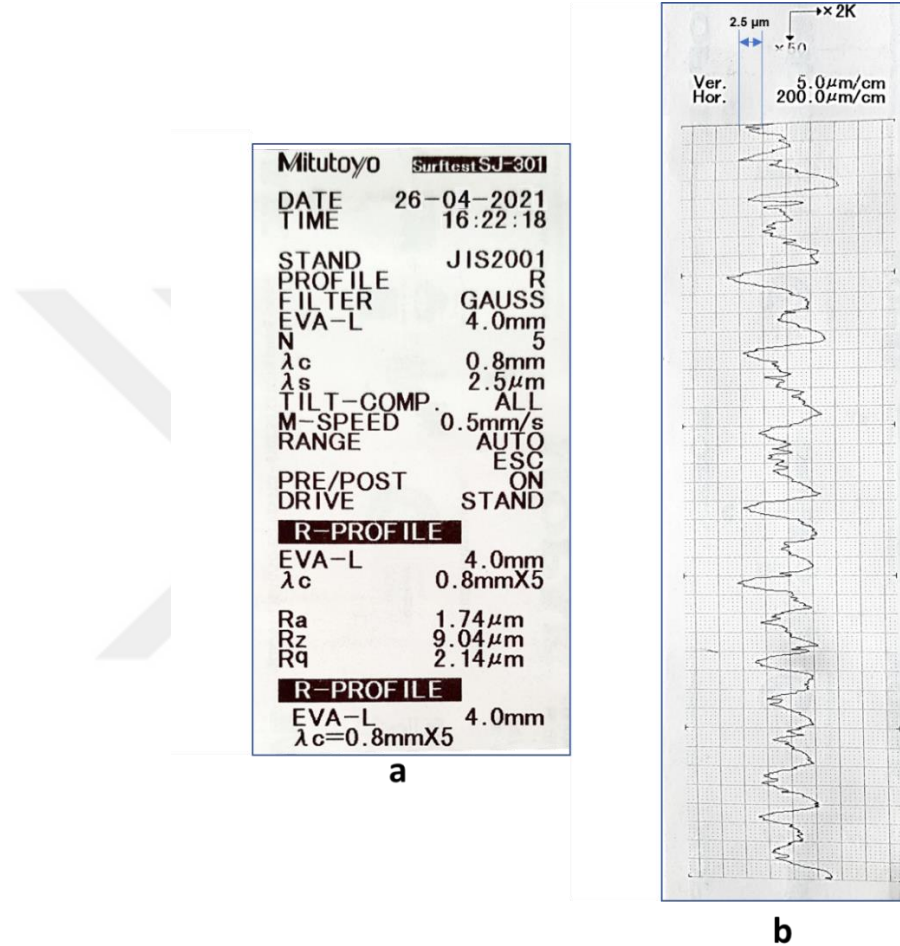
Yüzey pürüzlülük değerleri için kesme kuvveti ölçümlerinde talaş kaldırma işlemlerinden sonra numune üzerinden üç farklı noktadan üçer adet ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Tekrarları ile birlikte yapılan 27 adet deney sonucunda alınan yüzey pürüzlülükleri kaydedilerek her bir numunedeki işlenen yüzeye ait ortalama pürüzlülük değeri R_a hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Deney Numunesi No	Deney Tekrar No	DENEY PARAMETRELERİ			YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ (µm)		
		Vc (m/dk.)	fr (mm/dk.)	Talaş Derinliği (mm)	Ra (µm)	ORTALAMA Ra (µm)	STD. SAPMA
1	1.1	130	514,4	0,5	0,65	0,59	0,33
	1.2			0,5	0,71		
	1.3			0,5	0,40		
2	2.1	130	776,1	0,75	0,65	0,95	0,54
	2.2			0,75	1,15		
	2.3			0,75	1,04		
3	3.1	130	1034	1	1,89	1,68	0,90
	3.2			1	2,00		
	3.3			1	1,17		
4	4.1	180	514,4	0,75	1,40	1,57	0,59
	4.2			0,75	1,39		
	4.3			0,75	1,91		
5	5.1	180	776,1	1	1,86	1,72	0,44
	5.2			1	1,46		
	5.3			1	1,83		
6	6.1	180	1034	0,5	1,38	1,07	0,59
	6.2			0,5	1,03		
	6.3			0,5	0,79		
7	7.1	250	514,4	1	1,92	1,74	0,32
	7.2			1	1,62		
	7.3			1	1,67		
8	8.1	250	776,1	0,5	0,55	0,70	0,71
	8.2			0,5	1,11		
	8.3			0,5	0,45		
9	9.1	250	1034	0,75	1,71	1,90	0,55
	9.2			0,75	2,22		
	9.3			0,75	1,78		

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Çizelge 4.6’da görüldüğü üzere, en düşük yüzey pürüzlülük değerinin 1. Deneyde ortalama 0,59 µm olduğu görülmektedir. Bu deneyde kesme hızı 130 m/dk., ilerleme hızı (fr) 514,4 mm/dk. ve talaş derinliği 0,5 mm’dir. En yüksek yüzey pürüzlülük değerinin 9. Deneyde kesme hızı 250 m/dk., ilerleme hızı (f) 1034 mm/dk. ve talaş derinliği 0,75 mm kesme koşullarında ortalama 1,90 µm olarak ölçülmüştür.

Deneyisel çalışmalarda elde edilen yüzey pürüzlülük ölçümüne ait bir örnek, Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekil 4.8 a’da görüldüğü gibi değerler, Şekil 4.8 b’de gösterilen yüzey profiline ait grafik Mitutoyo yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının yazıcısından kâğıda çıktı alınarak kaydedilmiştir. Cihazın kayıt iğnesi 4 mm ölçüm uzunluğunda, 0,5 mm/sn hızında, işlenen yüzey üzerinde tek eksenle hareket ederek yüzey profil verilerini (R_a , R_z , R_q) almıştır. Ölçümün örneklem uzunluğu λ_c 0,8 mm’dir.



Şekil 4.8. 7 No’lu Deney Numunesinden Alınan Örnek Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonucu, a) Ölçüme Ait Değerler, b) Yüzey Profiline Ait Grafik

Deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğüne etki eden kesme parametrelerinin Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi ile incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin etki oranları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Varyans analizinde istatistiksel olarak %95 güven aralığında çalışılmıştır. Çizelge 4.7’de verilen ANVOA sonuç tablosunda talaş derinliğinin %70,03 oran ile yüzey pürüzlülüğüne etkisi en fazla olan parametre olduğu görülmektedir. Ardından %14,26 oran ile kesme hızının, %13,97 oran ile ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi bulunduğu görülmektedir. Ancak analizde yalnızca talaş derinliğinin P-Değerinin 0,05 in altında olduğu görülmektedir. Bu nedenle

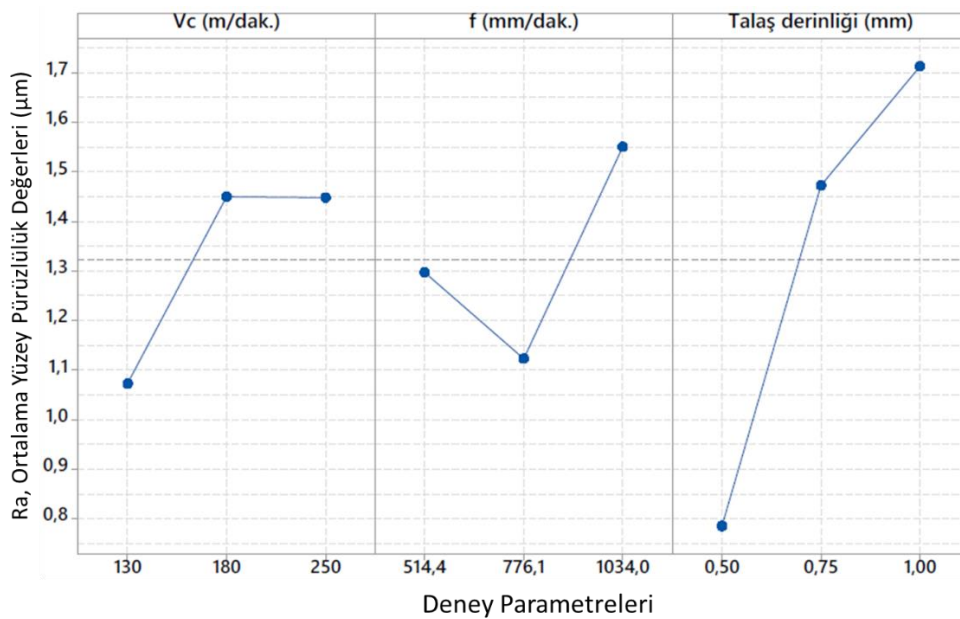
yüzey pürüzlülüğü üzerine talaş derinliğinin net olarak anlamlı bir etkisi çıkmıştır. Kesme ve ilerleme hızının P değeri 0.5’den yüksek olması sonucun istatistiksel açıdan anlamlı olmadığını göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme ve ilerleme hızının net bir etkisinin bulunamamasının deneylerdeki titreşimin fazla olmasının neden olduğu düşünülmüştür.

Çizelge 4.7. Yüzey Pürüzlülüğü Varyans Analizi Sonuçları

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	% Etki	Karelerin Ortalaması	F-Değer	P-Değer
Vc (m/dk.)	2	0,28311	%14,26	0,14156	8,20	0,109
f (mm/dk.)	2	0,27749	%13,97	0,13875	8,04	0,111
Talaş derinliği (mm)	2	1,39079	%70,03	0,69540	40,29	0,024
Hata	2	0,03452	%1,74	0,01726		
Toplam	8	1,98591	%100,00			

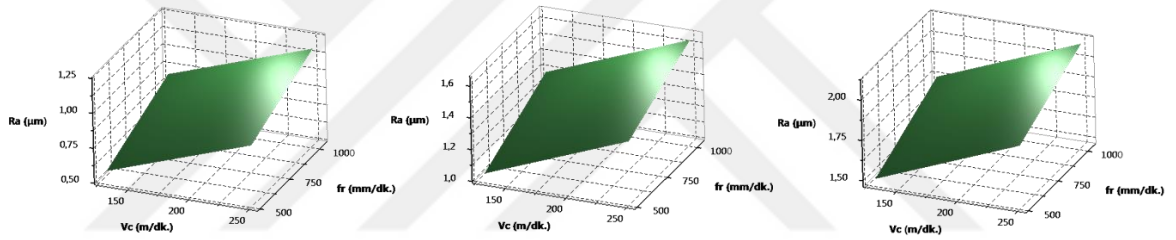
$S=0,175436$, $Rsq=\%97,41$, $R-sq(adj)=\%89,63$, $P-Değer$ Anlamlılık<0,05

Ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etki eden deney parametrelerinin etki grafiği Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Kesme hızının (Vc), 130 m/dk.’dan 180 m/dk. artması ile yüzey pürüzlülük değerinde yaklaşık %35,5 oranında artışın olduğu fakat 180 m/dk.’dan 250 m/dk hıza çıkması yüzey pürüzlülüğünde değişime neden olmamıştır. İlerleme hızının (f) 514,4 mm/dk.’dan 776,1 mm/dk’ya yükselmesi ile yüzey pürüzlülük değerinde yaklaşık %7 oranında azalmanın olduğu fakat ilerleme hızının 1034 mm/dk.’ya gelmesi ile %38 oranında artış meydana gelmiştir. Talaş derinliğindeki artışın yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Talaş derinliğinin artması neticesinde yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 2,2 kat arttığı görülmektedir.



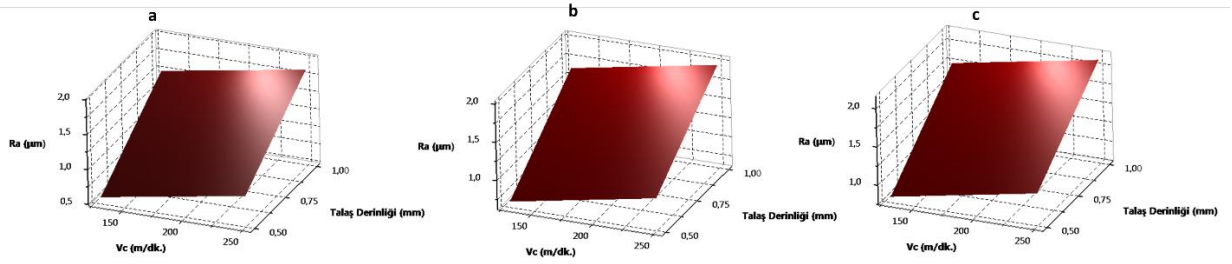
Şekil 4.9. Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne (Ra, µm) Etki Grafiği

Farklı talaş derinliklerinde kesme hızı ve ilerleme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) üzerine etki grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10'da verilen grafikte görüldüğü üzere 0,5, 0,75 ve 1 mm talaş derinliklerinde ilerleme ve kesme hızının ve artması ile yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri, en yüksek ilerleme hızı olan 1034 mm/dk. ile en yüksek kesme hızı olan 250 m/dk. kesme koşullarındaki talaş kaldırma işleminde gerçekleşmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü ise en düşük ilerleme hızı olan 514,4 mm/dk. ile en düşük kesme hızı olan 130 m/dk. kesme koşullarında meydana gelmektedir. Talaş derinliklerinin artması ile yüzey pürüzlülüğünde de artış meydana getirmektedir. Daha iyi yüzey kalitesi elde edebilmek için talaş kaldırma işleminde ilerleme hızının artırılması gerektiği durumda kesme hızının azaltılması, kesme hızının artırılması gereken durumda ilerleme hızının düşürülmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



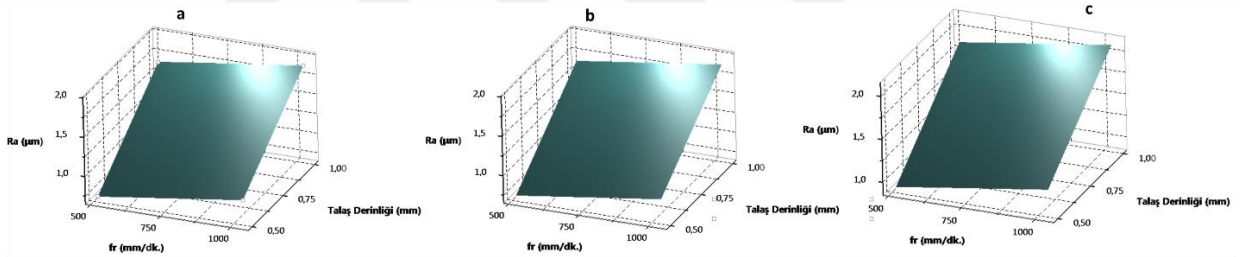
Şekil 4.10. Farklı Talaş Derinliklerinde Kesme Hızı ve İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne (R_a , μm) Etki Grafiği a) $a = 0,5$ mm b) $a = 0,75$ mm c) $a = 1$ mm

Üç farklı ilerleme hızında, kesme hızı ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) üzerine etki grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.11 a, b ve c'de verilen grafiklerde görüldüğü üzere 514,4, 776,1 ve 1034 mm/dk. ilerleme hızlarında, birbirlerine oldukça yakın yüzey grafiğine sahip olduğu, kesme hızının ve talaş derinliğinin artması ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. Talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin çok daha belirgin olduğu görülmektedir. Buradan talaş derinliğinin artırılması gerektiği durumlarda kesme hızının çok daha fazla azaltılması gerektiği görülmektedir.



Şekil 4.11. Farklı İlerleme Hızlarında Kesme Hızı ve Talaş Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne (R_a , μm) Etki Grafiği a) $f_r = 514,4$ mm/dk. b) $f_r = 776,1$ mm/dk. c) $f_r = 1034$ mm/dk.

Şekil 4.12 a, b ve c’de sırası ile 130, 180 ve 250 m/dk. kesme hızlarında, ilerleme hızı ve talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) üzerine etkisi görülmektedir. Talaş derinliği ve ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. Ancak talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin ilerleme hızından daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sebeple talaş derinliğinin artırılması gereken durumda ilerleme hızının daha yüksek oranda düşürülmesi, ilerleme hızının artırılması gereken durumda talaş derinliğinin yüksek oranda azaltılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.12. Farklı Kesme Hızlarında İlerleme Hızı ve Talaş Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne (R_a , μm) Etki Grafiği a) $V_c = 130$ m/dk. b) $V_c = 180$ m/dk. c) $V_c = 250$ m/dk.

Talaşlı imalat sonrasında işlenen yüzeyin pürüzlülük değeri oldukça önemli bir kalite indeksidir. Talaş kaldırma ile işlenen yüzeylerin pürüzlülüklerinin minimize edilmesi, işlenen yüzeylerin uygun toleranslarda olması, çalışma ömrü ve ürün kalitesi açısından önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi bulunan bağımsız değişken kesme parametrelerinin optimizasyonu kalite, zaman ve maliyet açısından oldukça önem taşır. Yapılan bu çalışmada ÖKGDD deney numunelerinden talaş kaldırma sonrasında işlenen yüzeylerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin minimum seviyeye indirilmesi amacı ile kesme parametrelerinin optimizasyonu oluşturulmuştur. Yüzey pürüzlülüğü üzerine yapılan deneysel çalışmada elde edilen optimizasyon değerleri çoklu regresyon modeli kullanılarak Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Yüzey Pürüzlülüğü İçin Optimize Edilmiş Parametreler

Değişken	Değer
Vc (m/dk.)	130
fr (mm/dk.)	776,1
Talaş derinliği (mm)	0,5

Cevap	Uyum	SE	95% CI	95% PI
Ra	0,334	0,116	(-0,165; 0,832)	(-0,420; 1,087)

Çizelge 4.8’de gösterilen kesme parametreleri için %95 güven aralığında optimizasyon değerleri, 130 m/dk. kesme hızı (Vc), 776,1 mm/dk. ilerleme hızı (fr) ve 0,5 mm Talaş derinliğinde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu parametreler uygulandığında ortalama yüzey pürüzlülüğünün (R_a) 0,334 μm olacağı tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.9. Yüzey Pürüzlülüğü İçin Optimize Edilmiş Parametreler

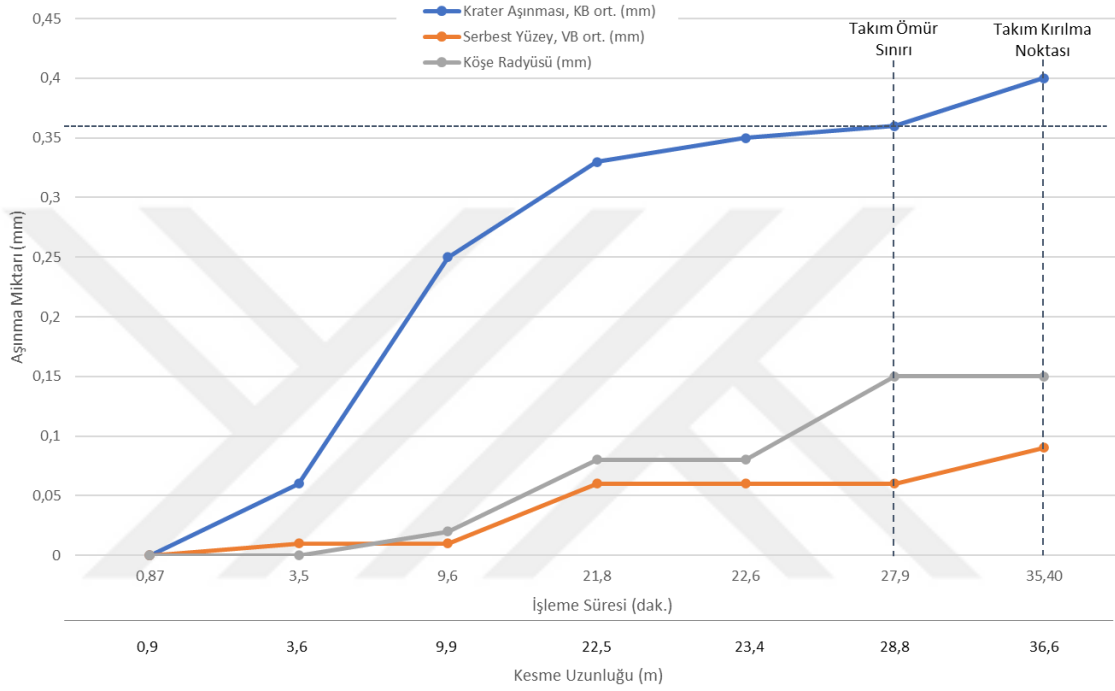
Deney Tekrar No	DENEY PARAMETRELERİ			YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ (μm)	
	Vc (m/dk.)	fr (mm/dk.)	Talaş Derinliği (mm)	Ra (μm)	ORTALAMA Ra (μm)
1	130	776,1	0,5	0,82	0,83
2				0,79	
3				0,87	

Çizelge 4.8’de verilen yüzey pürüzlülüğü için verilen tahmin değerinin doğrulanması amacıyla Çizelge 4.9’da görüldüğü gibi 3 tekrarlı deney yapılmıştır. Optimize edilmiş kesme parametreleri olan 130 m/dk. kesme hızı, 776,1 mm/dk. ilerleme hızı ve 0,5 mm talaş derinliğinde frezeleme yapılarak 0,79 μm ile 0,87 μm arasında yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü Minitab 19’dan alınan istatistiksel tahminden fazla olduğu görülmektedir. Fakat tekrarları ile birlikte 27 adet yüzey pürüzlülüğü deneylerinde 1. deneyde 0,59 μm ve 8. deneyde 0,7 μm gibi daha düşük değerler de vardır. Bu nedenle optimizasyon tahmininin yüzey pürüzlülüğü için başarılı olmadığı görülmektedir.

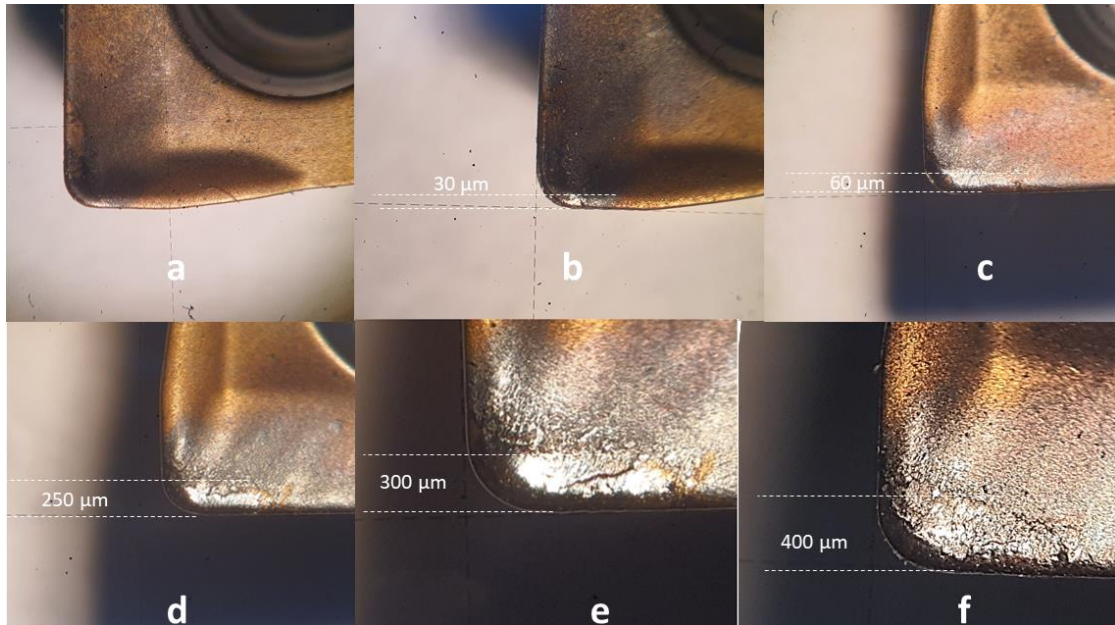
4.4. Takım Aşınması Ölçüm Sonuçları

Yüzey pürüzlülüğü deneylerinde takıma etkileyen en yüksek kesme kuvvetine sahip deney parametrelerinde takım aşınması deneyi yapılmıştır. Çizelge 3.11’de verilen L9 deney tasarım tablosunda F_a ’nın en yüksek değerinin ölçüldüğü (242,5 N) 3. Deneyin kesme koşullarında (130 m/dk. kesme hızı, 1034 mm/dk. ilerleme hızı ve, 1 mm talaş derinliği) 1. aşınma deneyi yapılmıştır. Yan yüzey, köşe radyüsü ve talaş yüzeyindeki

aşınma miktarları takımçı mikroskobuyla ölçülmüştür. Takımın aşınma miktarına ait grafik Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.13'te görüldüğü üzere kesici takımın daha çok krater aşınması gerçekleşmiştir. Aşınmanın gerçekleştiği bölgelerinin fotoğrafları çekilerek meydana gelen aşınma türleri incelenmiştir. Kesici takım ucuna ait fotoğraflar Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Kesici takım ucundaki aşınma bölgelerinin kayıt altına alınan fotoğraflarında Şekil 4.9'da görüldüğü gibi yüksek miktarda gerçekleşen krater aşınma türü olduğu anlaşılmaktadır.



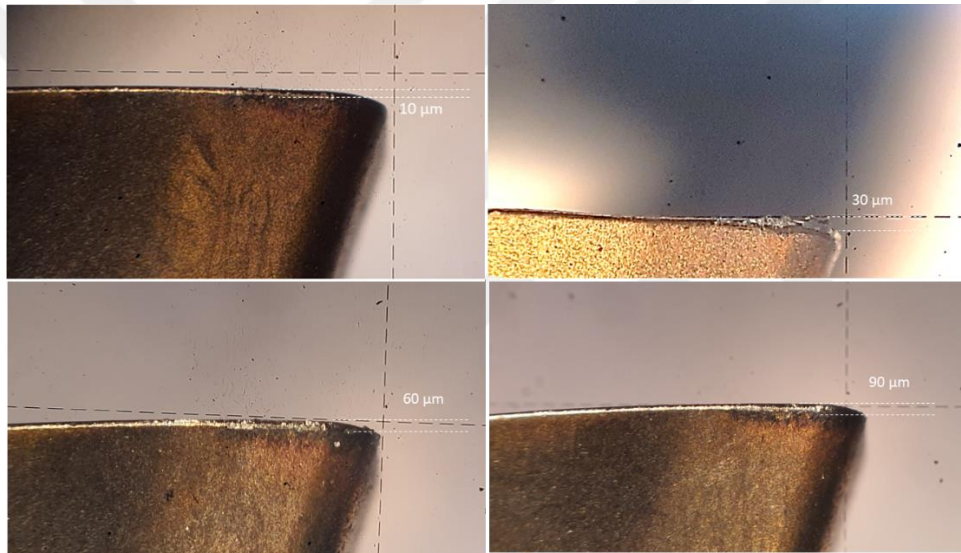
Şekil 4.13. 1 No'lu Takım Aşınması Deneyi Ölçüm Grafiği



Şekil 4.14. Krater Aşınması Oluşumu a) 1,7. dk. b) 2,6. dk. c) 5,2. dk. d) 12,2. dk. e) 16,2. dk. f) 32,2. dk.

Yaklaşık 2 ila 3 dk. işlem süresince takım aşınması çok düşük düzeylerde meydana gelmiştir. Fakat kesici takım karbür ucun PVD kaplamasının aşınmaya başlamasıyla hızlı bir aşınma meydana gelmiştir.

Kesici takım ucunun serbest yüzey aşınması Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Serbest yüzeyde talaş kaldırma süresince düşük miktarda aşınma meydana geldiği görülmüştür. Bunun bir sebebinin ön boşluk açısının (serbest açısı) 10° olması yani kesici ucun pozitif uç olması sebebiyle yan yüzey aşınması çok düşük seviyede gerçekleşmiştir. Aşınma bölgesinde meydana gelen renk değişimi kuru kesme şartlarında takım/talaş ara yüzünde oluşan yüksek sıcaklığın sebep olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta takımın talaştan ayrılıp hava ile teması oksidasyon oluşmasına neden olmaktadır.



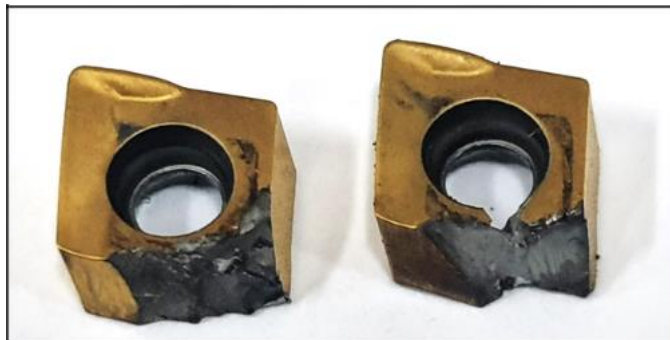
Şekil 4.15. Serbest Yüzey Aşınması a) 3,6. dk. b) 15,3. dk. c) 22,5. dk. d) 33,3. dk.

Krater aşınmasında takım ömrü için genel kriter, krater derinliğinin (K_T) maksimum 0,1 mm değerinde olduğu bilinmektedir. Fakat K_T değerinin ölçümünün zor olmasından dolayı ikinci bir takım ömrü kriteri olarak krater genişliği (K_B) takım ömür kriteri olarak seçilmiştir. 0,4 mm krater genişliğine ulaşıldığında takımın kırılması nedeniyle takım ömründen en fazla oranda yararlanabilmek için takım ömür kriteri K_B değeri 0,36 mm olarak belirlenmiştir. Bu ömür kriterinde ve deney koşullarında takım yaklaşık olarak 28 dakika kesme ve 29 m işleme yapmıştır.

Deneysel çalışmada kesici takım ucunda meydana gelen krater aşınmasının sebebi yüksek sertlikteki talaş malzemesinin aşındırıcı etkisinin bulunması ve talaş-takım ara yüzünde yüksek sıcaklık ve basınç ile etkileşimin takımda krater aşınması oluşumuna

sebebi olduğu düşünülmektedir. Kesici takım ucunun geometrisinin neden olduğu yan yüzey-iş parçası temas noktasındaki ön boşluk açısı nedeniyle serbest yüzey aşınması V_B kriterinin genel kabul olan 0,3 mm seviyesine kadar işleme yapılmasının mümkün olamayacağı anlaşılmıştır. AlTiN/TiN PVD kaplı kesici takım ucunun talaş yüzeyindeki kaplaması talaş kaldırmanın 9,6. dakikasında (9,9 m kesme uzunluğunda) büyük oranda aşındığı gözlemlenmiştir. Devam eden talaş kaldırma işleminde kesici ucun aşınma hızında da artışa neden olmuştur. 300 mm uzunluğundaki deney numunesinden 122 mm talaş kaldırıldıktan sonra (35,40 dk. işleme süresi ve 36,6 m kesme uzunluğunda) her iki kesici takım ucu da kırılmıştır. Kesici takım ucunun kırılmadan önceki son aşınma ölçümü 32,2. dk.'da gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, krater aşınması K_B değeri 0,4 mm, köşe radyüsü aşınması 0,15 mm ve serbest yüzey aşınması 0,9 mm olarak ölçülmüştür. 1. aşınma deneyinde seçilen kesme parametreleriyle takım ömrü 35 dakikayı bulmuştur. Bu ömür değerlerinde çekme mukavemeti 1000 MPa civarını bulan bir malzeme için oldukça yeterli bir ömür olduğu değerlendirilmiştir.

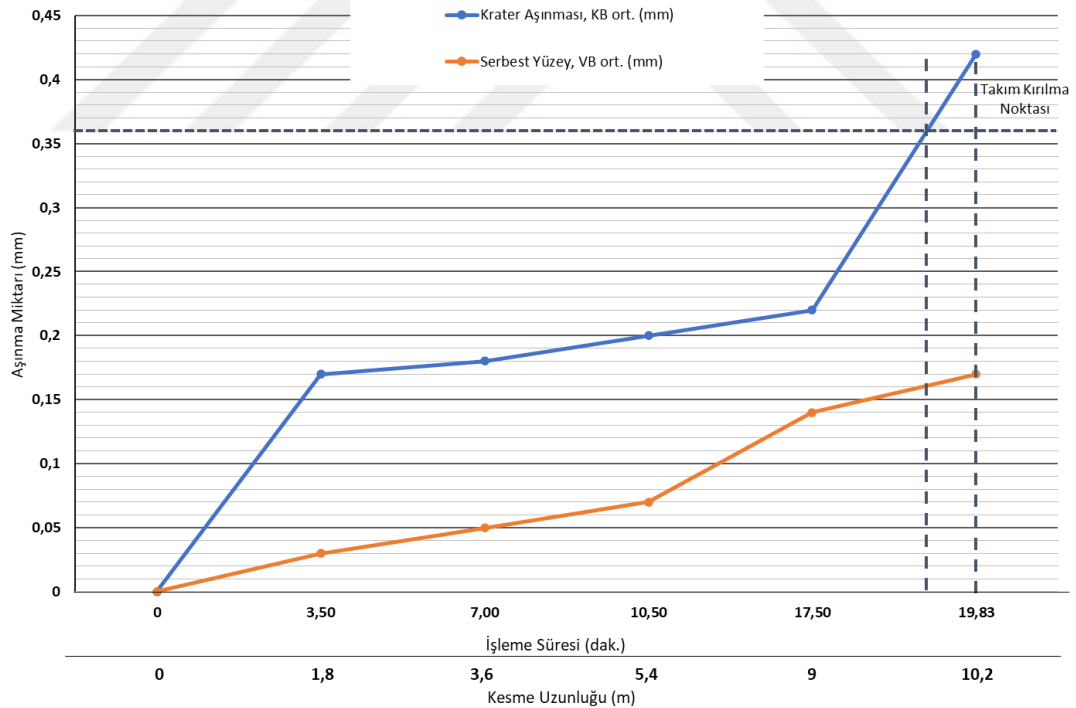
2. aşınma, ilk deneyde takımın oldukça uzun ömür vermesi sebebiyle daha kısa sürelerde aşınmanın gözlemlenebilmesi için kesme hızı artırılarak ve ilerleme hızı düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Bu şartlara uygun deney Çizelge 3.11'de verilen L9 deney tasarım tablosunda 7. Deneye denk gelmektedir. Bu deneydeki kesme parametreleri $V_c=250$ m/dk, $f=514$ mm/dk ve $d=1$ mm olarak 2. aşınma deneyinde kullanılmıştır. Deney sırasında çok yoğun kesme gürültüsü ve titreşim meydana gelmiştir. Bu nedenle 6. Pasoda her iki takım da Şekil 4.16'da görüldüğü gibi aşınma ölçümü yapılamadan kırılmıştır. Bu sonuç seçilen kesme koşulları neticesinde oluşan titreşimin takım ömründe son derece etkili olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.16. 2 No'lu Deneye Ait Kesici Takım Ucu Hasarı

2. Aşınma deneyinde bir önceki deneyde titreşim nedeniyle takımın kırılmasından dolayı, takım boyu kesilmiş ve kesici ucun takım tutucudan takım çapının ~2.5 katı kadar

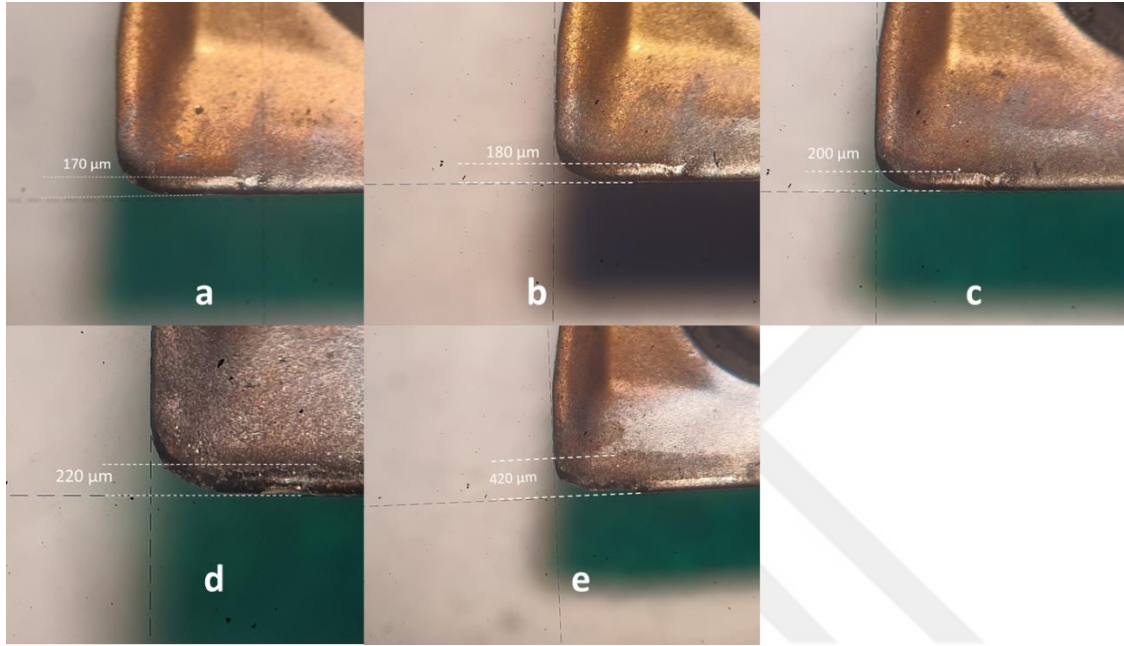
dışarı çıkmasına izin verecek şekilde takım bağlantısı yapılmıştır. 2. Aşınma deneyindeki işleme parametreleri kullanılarak ($V_c=250$ m/dk., $f=514,4$ mm/dk., $a=1$ mm) takım aşınma deneyi tekrarlanmıştır. 2. Aşınma deneyinin tekrarında takım ömrü kriteri olan $K_B = 0,36$ mm'ye yaklaşık 19,1 dk. işleme süresinde ve 9,8 m kesme miktarındayken ulaşması, takım boyunun kısaltılmasının titreşimin ve gürültünün azaltılmasında, takım ömründe işleme süresi ve kesme uzunluğu açısından yaklaşık 5,5 kat iyileşmenin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Aşınma deneyinde belirli aralıklarla kesici takım ucu takımçı mikroskopuyla incelenerek aşınma türü ve miktarı Şekil 4.17'de verilen grafikte verilmiştir. Şekil 4.17'de de görüldüğü üzere hızlı miktarda talaş yüzeyinde krater aşınması meydana gelmiştir. Deney 1. Deneyde tespit edilen $K_B=0,39$ mm krater genişliğine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Bu süreçte kesici takım toplamda 300 mm numune boyunda 34 mm işleme derinliğine ulaşıncaya kadar 34 paso işleme yapılmıştır. Takım ömrü kriterine ulaşıncaya kadar toplamdaki işleme süresi yaklaşık 19,13 dk. olarak görülmektedir.



Şekil 4.17. 2 No'lu Takım Aşınması Deneyi Ölçüm Değerleri

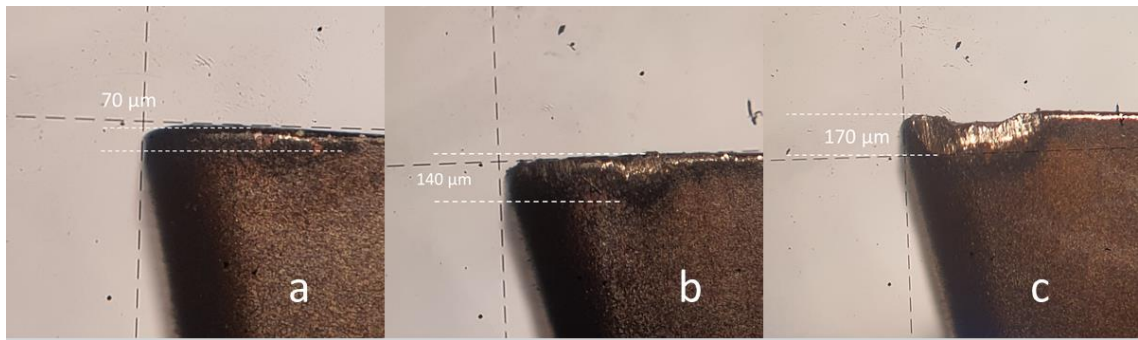
Şekil 4.18'de ise serbest yüzey aşınması ve talaş yüzeyinde meydana gelen aşınmasının işleme süresince değişimi görülmektedir. Talaş yüzeyinde meydana gelen

takım aşınmasında PVD kaplamanın aşındığı kısmi miktarda krater aşınması meydana geldiği söylenebilir. Deneyde işleme sürecinin sonunda aşınma neticesinde sıcaklığın daha yüksek değerlere çıktığı, takım talaş ara yüzünde oksijen temasının daha da artması çıkan talaşın kıvılcım şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu oluşumun meydana gelmesi takımda ciddi miktarda aşınma olduğunu da göstermiştir.



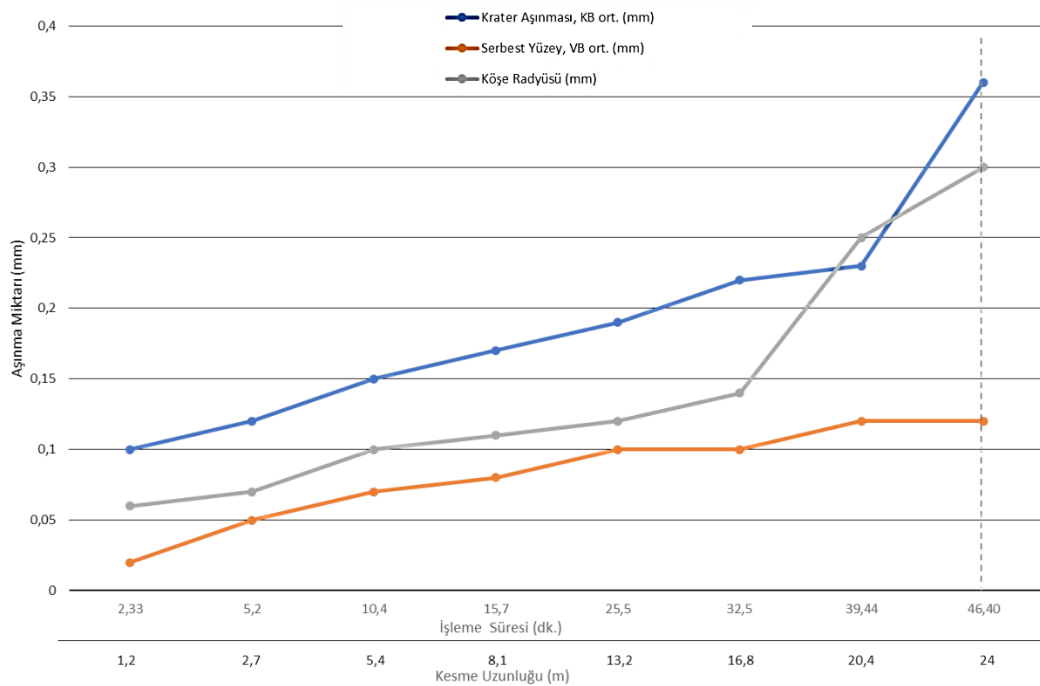
Şekil 4.18. a Aşınması Oluşumu a) 3,5. dk. c) 7. dk. d) 10,5. dk. e) 17,5. dk. f) 19,83. dk.

Serbest yüzey aşınması oluşumu Şekil 4.19’da görüldüğü üzere daha bariz bir şekilde meydana gelmiştir. Takım $V_B=0,17$ mm de iken takım talaş yüzeyinden kopmuştur.



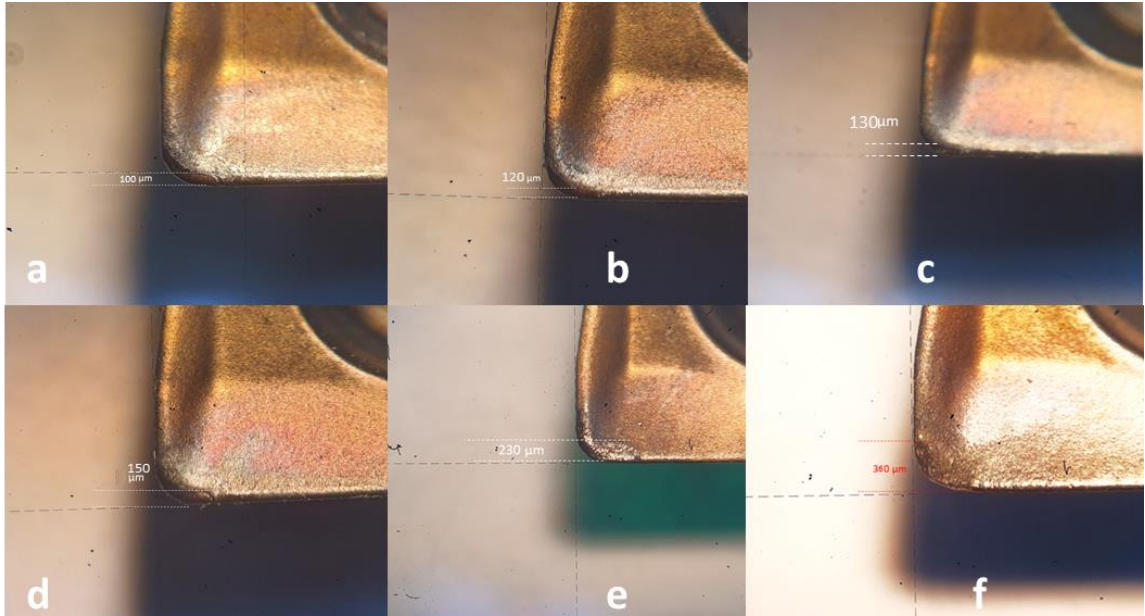
Şekil 4.19. Serbest Yüzey Aşınması Oluşumu a) 10,5. dk. b) 17,5. dk. c) 19,83. dk.

3. No'lu aşınma deneyi için daha kısa sürelerde aşınmanın gözlemlenebilmesi için kesme hızı artırılarak ve ilerleme hızı düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca önceki deneyde 1 mm olan talaş derinliği 0,5 mm ye düşürülerek yine 250 m/dk. kesme hızı ve 514 mm/dk. İlerleme hızında aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Belirli aralıklarda kesici takım ucu takımçı mikroskopuyla incelenerek aşınma türü ve miktarı belirlenmiştir. İşleme süresi ve kesme uzunluğuna bağlı olarak oluşan aşınma türü ve miktarına ait grafik Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekil 4.20'de de görüldüğü üzere yüksek miktarda krater aşınması ve köşe radyüsü aşınması meydana gelmiştir. Deney, 1. Deneyde tespit edilen $K_B=0.36$ mm krater genişliğine ulaşmaya kadar devam etmiştir. Bu süreçte kesici takım toplamda 300 mm numune boyunda 40 mm işleme derinliğine ulaşmaya kadar 80 paso işleme yapmıştır. Toplamdaki işleme süresi 46.6 dakika olmuştur. Bu deneyde kesme hızının ilk deneye göre 130 m/dk.'dan 250 m/dk.'ya çıkmasına rağmen işleme süresinin 35 dakikadan ~46 dakikaya çıkması Taylor'un takım ömür denklemiyle tezat oluşturmaktadır. 1. Deneyde fazla olan takım boyu nedeniyle meydana gelen titreşimin takım ömrünü azaltmış olabileceği düşünülmüştür. 3. Deneyde takım boyunun azalması ve talaş derinliğinin de 1. Deneydeki yarısı kadar olmasıyla titreşimin azalması sonucu takım ömrünün artmış olduğu değerlendirilmiştir.

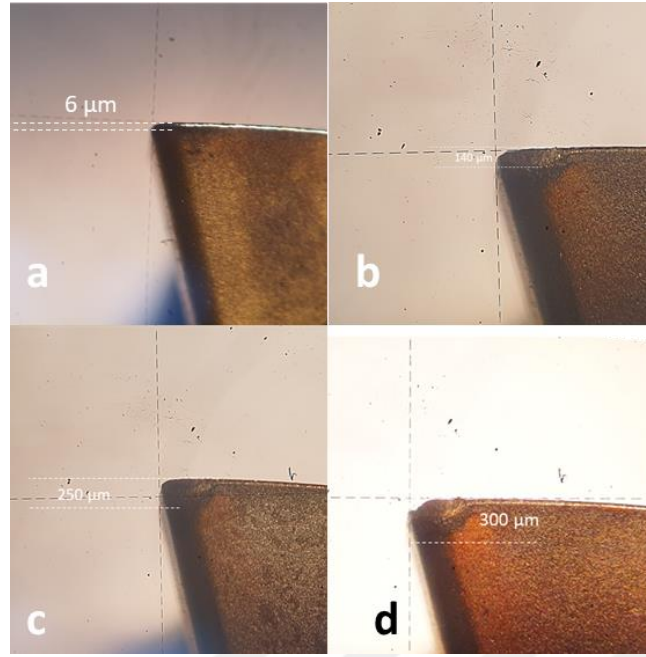


Şekil 4.20. 3 No'lu Takım Aşınması Deneyi Ölçüm Grafiği

Şekil 4.21’da talaş yüzeyinde ve Şekil 4.22’de de köşe radyüsünde meydana gelen aşınmanın işleme süresince olan değişimi görülmektedir. Bu deneyde talaş yüzeyinde tam bir krater oluşumu gözlenmeyip daha çok kaplamanın aşındığı görülmektedir. Bu nedenle bir krater derinliğinden bahsedilememektedir. Ancak serbest yüzeydeki aşınma daha bariz bir şekilde meydana gelmiştir. Takım ömür kriterine ulaşıldığında, serbest yüzey aşınma miktarı 0.3 mm olmuştur. Buradan genel bir kabul olarak kullanılan serbest yüzey aşınma kriteri $V_B=0,3$ mm’nin, östermpirlenmiş GGG70 malzemenin frezeleme yöntemiyle AlTiN/TiN katmanlı PVD kaplı karbür uçlar için de takım ömür kriteri olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

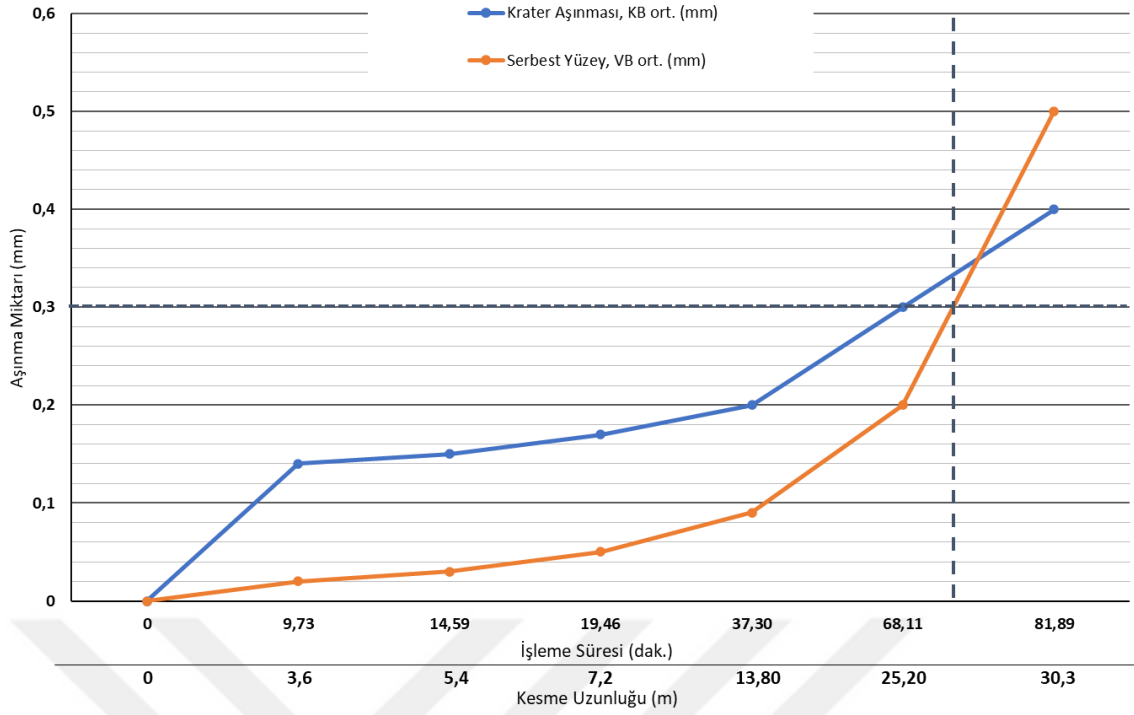


Şekil 4.21. Krater Aşınması Oluşumu a) 2,33. dk. b) 5,2. dk. c) 7,2. dk. d) 10,4 dk. e) 33,44. dk. f) 46,40. dk.



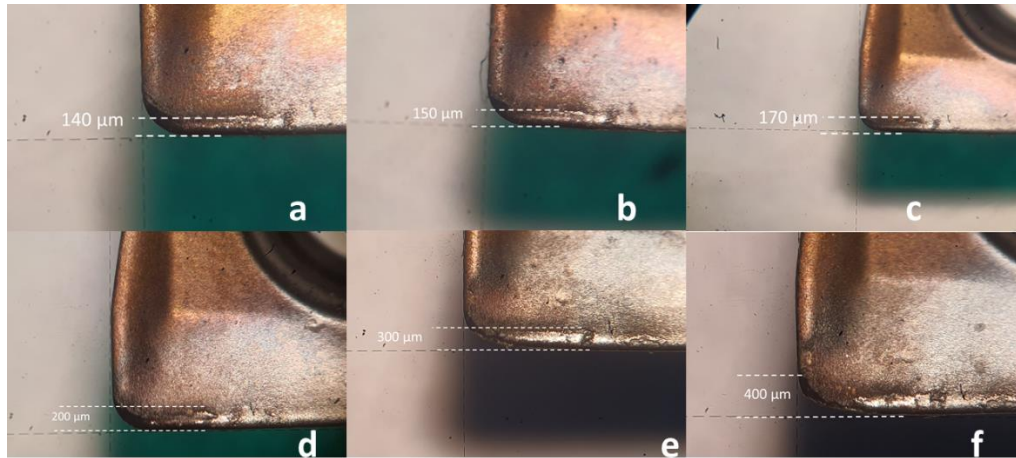
Şekil 4.22. Köşe Radyüsü Aşınması a) 2,33. dk. b) 32,5. dk. c) 39,44. dk. d) 46,40. dk.

4. aşınma deneyinde kesme kuvvetine etkisi daha fazla olduğu bilinen talaş derinliği 1 mm'ye artırılmıştır. Ayrıca takımın numune üzerindeki temas süresinin artırılmasının aşınma miktarı ile ilişkilendirilmesi amaçlanarak kesme hızı 180 m/dk. ve ilerleme hızı 370 mm/dk. kesme koşullarında aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Diş başı ilerleme değeri 2. Deneyin tekrarı ile aynı değer olan Belirli aralıklarda kesici takım ucunda meydana gelen aşınmanın türü ve miktarı belirlenmiştir. İşleme süresi ve kesme uzunluğunda meydana gelen aşınma miktarı ve türüne ait grafik Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Bu süreçte kesici takım toplamda 300 mm numune boyunda toplamda 101 mm kesme işleme derinliğine ulaşıncaya kadar 101 paso işleme yapmıştır. Toplamda işleme süresi 81,89 dakika olmuştur. Deneyde krater genişliği (K_B) neredeyse sabit şekilde ilerleme gösterirken, serbest yüzey aşınması (V_B) ise giderek hızlanan miktarda artış göstermiştir. Deneyde serbest yüzey aşınması $V_B = 0,5$ mm olarak ölçülmesi ile takım ömrünü tamamladığı anlaşılmıştır. Bu noktada 1. Deneyde belirlenen $K_B=0,36$ mm olan krater genişliği ise 0,4 mm olarak ölçülmüştür. Dolayısı ile hem serbest yüzey aşınması hem de krater aşınması açısından takım ömrünü tamamlamıştır.

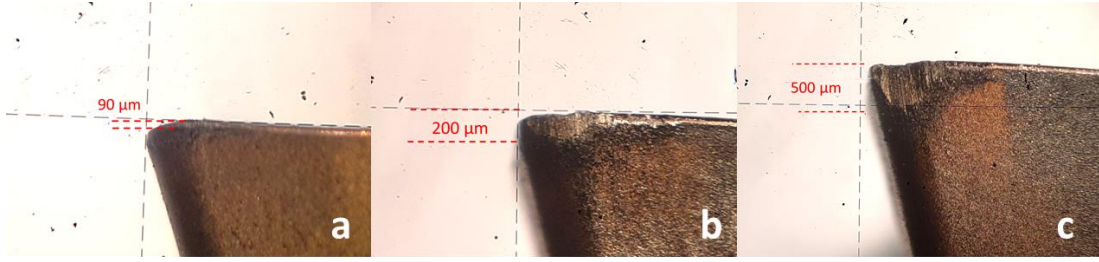


Şekil 4.23. 4 No'lu Takım Aşınması Deneyi Ölçüm Grafiği

Şekil 4.24'te talaş yüzeyinin, Şekil 4.25'te de serbest yüzey aşınmasının işleme süresince değişimi görülmektedir. Bu deneyde talaş yüzeyinde net bir krater oluşumu gözlenmeyip daha çok talaş yüzeyinin kenar radyüsünde aşınmanın ilerlediği ve kaplamanın aşındığı görülmektedir. Bu nedenle krater derinliğinden bahsedilememektedir. Talaş yüzeyindeki aşınmanın ilerlemesi krater genişliği olarak ölçülmüştür. Ancak serbest yüzeydeki aşınma daha bariz bir şekilde meydana gelmiştir.

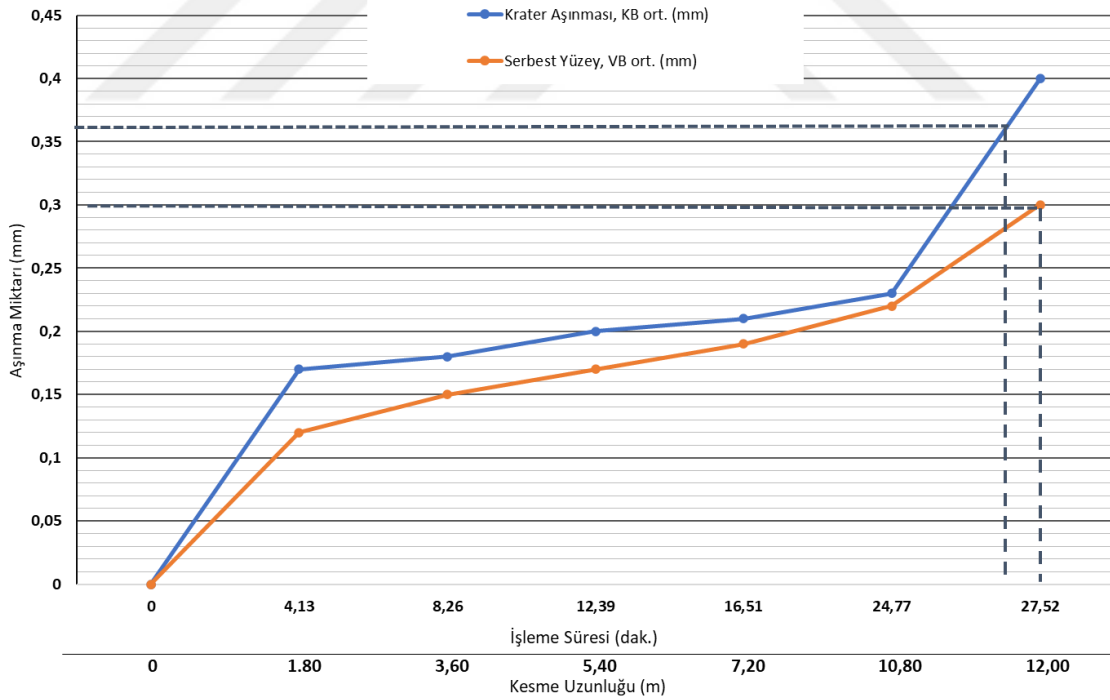


Şekil 4.24. Krater Aşınması Oluşumu a) 9,73. dk. b) 14,59. dk. c) 19,46. dk. d) 37,90 dk. e) 68,11. dk. f) 81,89. dk.



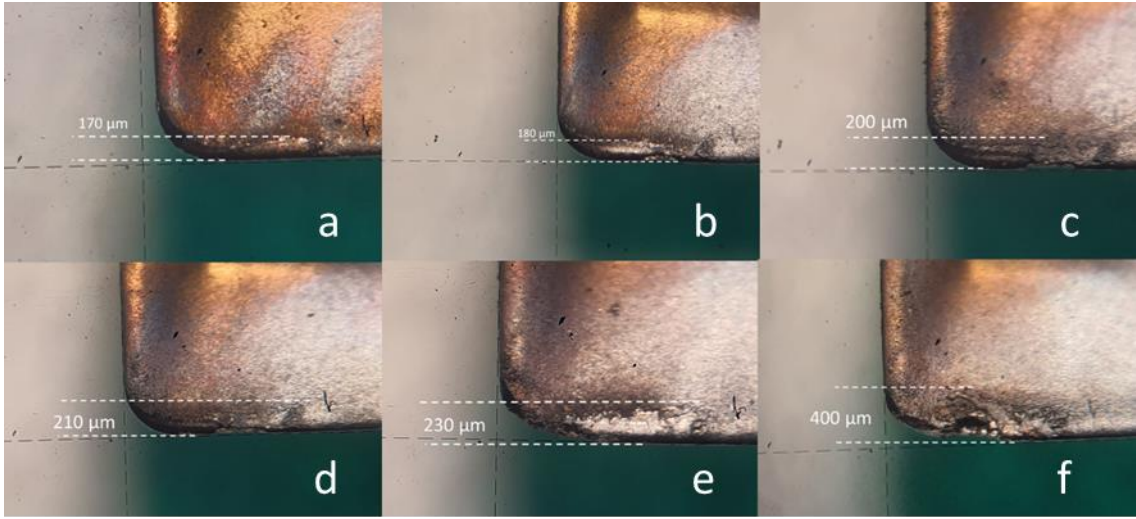
Şekil 4.25. Serbest Yüzey Aşınması a) 37,30. dk. b) 68,11. dk. c) 81,89. dk.

5. Aşınma deneyinde 3. ve 4. deneyde kullanılan kesme parametrelerinin ortalama değerleri olan 215 m/dk. , $f=436 \text{ mm/dk.}$, $a=1 \text{ mm}$ işleme parametreleri kullanılarak takım aşınma deneyi yapılmıştır. 5. aşınma deneyinde takım ömür kriteri olan $K_B = 0,36 \text{ mm'ye}$ yaklaşık $26,8 \text{ dk.}$ işleme süresinde ve $11,7 \text{ m}$ kesme uzunluğuna işleme yapmıştır. Serbest yüzey aşınması da krater yüzeyindeki aşınma miktarıyla aynı oranda artış gözlemlenmiştir. Serbest yüzey aşınması için takım ömür kriterine ($VB=0,3 \text{ mm}$) yaklaşık $27,52 \text{ dk.}$ işleme süresinde ve 12 m kesme uzunluğunda ulaşmıştır. Aşınma deneyinde belirli aralıklarla kesici takım ucu takımcı mikroskobuyla incelenerek aşınma türü ve miktarı Şekil 4.26'daki grafikte verilmiştir

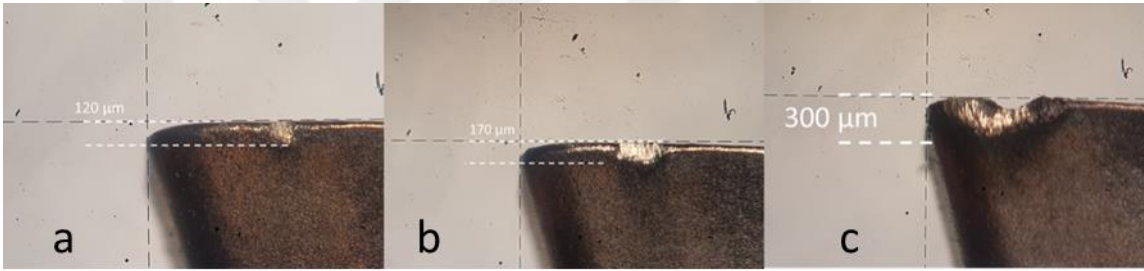


Şekil 4.26. 5 No'lu Takım Aşınması Deneyi Ölçüm Grafiği

Şekil 4.27'de görüldüğü üzere hızlı miktarda talaş yüzeyinde krater aşınması meydana gelmiştir. Şekil 4.28'de meydana gelen serbest yüzey aşınması görülmektedir.



Şekil 4.27. Krater Aşınması Oluşumu a) 4,13. dk. b) 8,26. dk. c) 12,39. dk. d) 16,51. dk. e) 24,77. dk. f) 27,52. dk.



Şekil 4.28. Serbest Yüzey Aşınması a) 4,13. dk. b) 12,39. dk. c) 27,52. dk.

Toplamda 5 adet aşınma deneyinin şartları ve sonuçları toplu olarak Çizelge 4.10'de verilmiştir. 2. Deneyin tekrarı ve 4. Deney kesme hızı hariç aynı diş başı ilerleme ve kesme derinliği ile gerçekleştirilmiş ve bu deneylerde kesme hızı ile birlikte takım ömründeki artış dikkat çekicidir. İki deneyden elde edilen veriler ile Taylorun takım ömür denklemi $V.T^n=C$ formülündeki n ve C değerleri hesaplandığında sırasıyla 0,225 ve 485 m/dak değerleri elde edilmiştir. Bu değerler literatüre bakıldığında sinterlenmiş karbürlerin çelik kesme şartları için verilen $n=0,25$ ve $C=500$ m/dak değerlerine oldukça yakındır. Bu malzeme ve takım çifti için takım ömür kriteri olarak V_B 'nin kullanılmasının tutarlı sonuçlar vermediği görülmektedir. Ancak tüm aşınma deneylerinde krater genişliği 0,36 mm değerini geçtikten sonra takım ömrünün bittiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle takım ömür kriteri olarak 0,36 mm krater genişliği kabulünün doğru bir yaklaşım olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

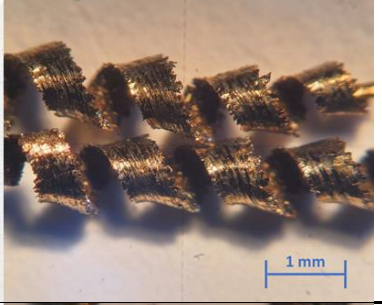
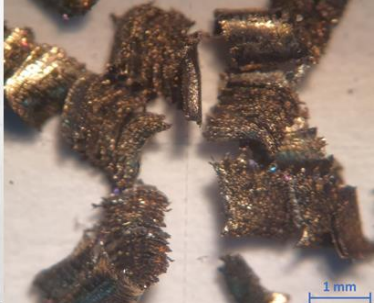
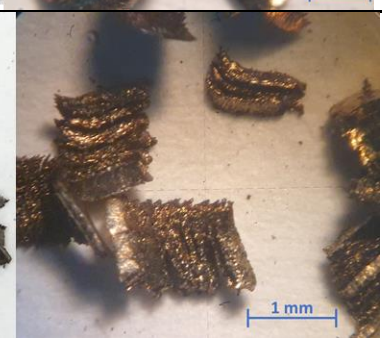
Çizelge 4.10. Takım aşınması deneylerinin sonuçları

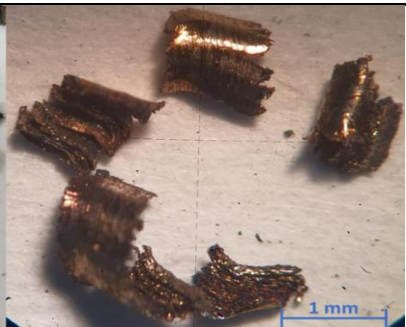
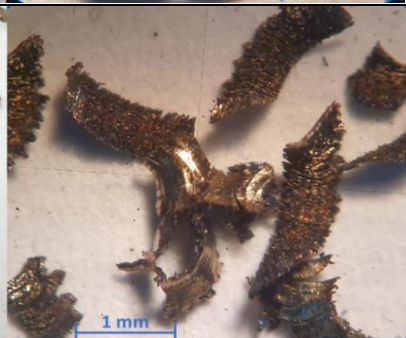
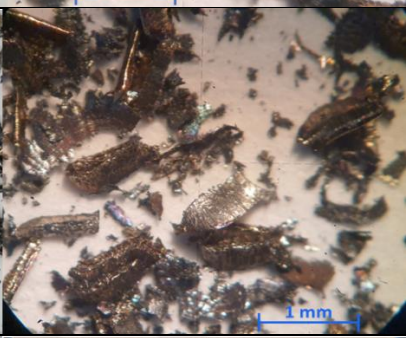
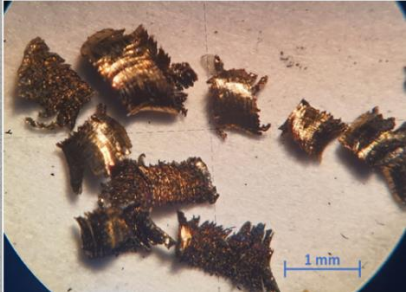
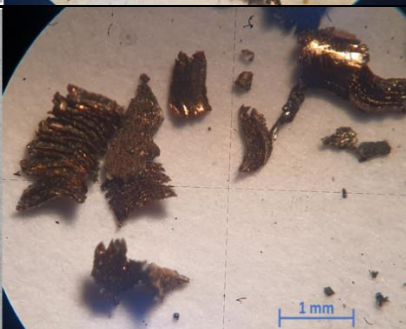
	Takım Boyu ~5D						Takım Boyu ~2.5D					
	V (m/dk)	f (mm/dk)	d (mm)	K _B (mm)	V _B (mm)	T (dak)	V (m/dk)	f (mm/dk)	d (mm)	K _B (mm)	V _B (mm)	T (dak)
1. Deney	134	1034	1	0.36	0.15	28						
2. Deney	250	514	1	Hasar								
2. Deney Tekrar							250	514	1	0.36	0.16	19.1
3. Deney							250	514	0.5	0.36	0.3	46.6
4. Deney							180	370	1	0.4	0.5	81.9
5. Deney							215	436	1	0.4	0.34	27.5

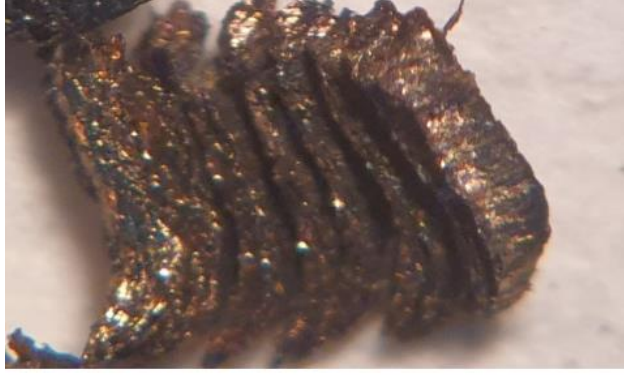
4.5. Talaş Morfolojisi

Kesme deneylerinde meydana gelen talaşın morfolojisi Çizelge 4.11’de verilmiştir. 1. Deneyde düşük kesme kızı ve düşük ilerleme şartlarında sürekli tipte kıvrık (şerit) talaş tipi oluşmuştur. Aynı ilerleme hızında kesme hızı 250 m/dk ya çıktığında (7. Deney) süreksiz tipte talaş gözlemlenmiştir. Aynı malzeme için kesme hızıyla birlikte talaşın süreksiz tipte talaşa dönüşmesi Handayani’nin (2017) çalışmasında da belirtilmiştir. Süreksiz tipte talaşın meydana gelmesi, talaş tipinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin olduğu bilgisini de doğrulamaktadır. 1. Deneyde en düşük pürüzlülük değeri olan 0,5 μm elde edilmişken, 7. Deneyde en yüksek ikinci değer olan 1,74 μm yüzey pürüzlülüğü oluşmuştur. 250 m/dk kesme hızında ilerlemenin artmasıyla talaş kalınlığı arttığı için kırılmadan daha uzun tipte talaşlar gözlemlenmiştir. Kesme hızının orta seviyesi olan 180 m/dk hızda tüm ilerleme hızlarında sürekli tipte talaş meydana gelmiştir. İlerleme hızı ve talaş derinliğinin artması, talaş boyunu kısaltsa da halen talaşın halen süreksiz tipte meydana geldiği 2. ve 3. Deneyde elde edilen talaşlardan anlaşılmaktadır. Bu deneylerde uzun dilimler halinde talaş meydana gelmiştir. Ayrıca Şekil 4.29’da talaşın kayma batları şeklinde oluştuğu da net olarak görülmektedir.

Çizelge 4.11. Kesme deneylerinde meydana gelen talaşın morfolojisi

Deney No	Vc (m/dk.)	İlerleme hızı, f (mm/dk.)	Talaş Derinliği, a (mm)	Talaş Morfolojisi	
1	130	514.4	0.5		
2	130	776.1	0.75		
3	130	1034	1		
4	180	514.4	0.75		

5	180	776.1	1		
6	180	1034	0.5		
7	250	514.4	1		
8	250	776.1	0.5		
9	250	1034	0.75		



Şekil 4.29. Kayma bantları şeklinde oluşan talaş



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Otomotiv ve savunma sanayisi gibi birçok endüstride yeni mühendislik malzemeleri maliyet, ürün kalitesi ve ağırlık tasarrufu açısından ilgi çekmektedir. Bu malzemelerden biri de Küresel Grafitli Dökme Demirdir (KGDD). KGDD'ler östenitleme işlemi ile çok üstün mekanik özellikler sergilemektedir. Bu mekanik özellikler her ne kadar kullanım açısından bir avantaj oluştursa da üretim ve işlenebilirlik açısından kullanımı zorlaştırmaktadır. Bu noktada Östempelenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin (ÖKGDD), zaman, maliyet ve ürün kalitesi açısından uygun işlenebilirlik şartlarının araştırılması, uygun kesici takımların belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında östempelenmiş GGG70 malzemenin üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği şartlarındaki işlenebilirliği araştırılmıştır. Taguchi L9 deney tasarım matrisine göre gerçekleştirilen deneylerde kesme kuvvetleri elde edilen yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Malzemenin takım ömrüne etkisini belirlemek için seçilen en ağır kesme koşullarında takım aşınması incelenmiştir.

5.1 Sonuçlar

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Östempereleme işlemi ile GGG70 malzemenin mekanik özellikleri önemli ölçüde artış göstermiştir. Akma dayanımı 440 MPa'dan 807 MPa'a, çekme mukavemeti 700 MPa'dan 1010 MPa'a ve yüzde uzama değeri de %4'ten %9,2'e kadar artmıştır.
- Kesme kuvvetine yaklaşık % 41 oran ile talaş derinliğinin etkisinin en fazla olduğu bulunmuştur. Ardından ~%33 oran ile kesme hızı ve %25 oran ile ilerleme hızı etki etmiştir.
- Kesme hızının 130 m/dk.'dan 250 m/dk. hıza çıkması ile aktif kesme kuvveti %42 oranında azalmıştır. Tersine ilerleme hızının 2 katına çıkması kesme kuvvetinde %62 artışa neden olmuştur. Talaş derinliğinin 2 kat artması ise kesme kuvveti %84 oranında artırmıştır.
- İlerleme hızının kesme kuvvetine etkisi 130 m/dk kesme hızında bariz iken, diğer kesme hızlarında net bir etki tespit edilememiştir.

- Talaş derinliğinin artırılması gerektiği durumlarda daha düşük kesme kuvvetleri için kesme hızının da artırılması gerektiği bulunmuştur.
- İlerleme hızının artırılması gerektiğinde kesme hızının da artırılmasının kesme kuvvetinde önemli miktarda azalmaya neden olacağı sonucuna varılmıştır. İlerleme hızı 776 ve 1034 mm/dk. iken kesme hızının 130 m/dk'dan 250 m/dk'ya çıkması kesme kuvvetini %50 civarında azaltmıştır.
- Yapılan deneylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü en fazla 1,90 μm iken en düşük 0,59 μm değerinde elde edilmiştir. Bu da kesme koşullarına bağlı olarak çok değişken pürüzlülük değerleri elde edilebildiğini göstermektedir.
- Yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametre %70 oranla talaş derinliği olmuştur. Diğer iki parametrenin talaş derinliğine göre etki oranları yaklaşık aynı oranda ancak istatistiksel olarak sınırda anlamlı olarak çıkmıştır.
- Talaş derinliğinin 2 kat artması ile yüzey pürüzlülüğünde de 2 kattan daha fazla artış olduğu belirlenmiştir. Ancak kesme ve ilerleme hızının pürüzlülük üzerinde lineer bir etkisi tespit edilememiştir. Bu duruma kesme koşullarına bağlı olarak takımda oluşan titreşimlerin kesme parametrelerinin etkisini gölgelemesinin neden olduğu düşünülmüştür.
- Takım aşınması deneylerinde yan yüzey aşınmasından ziyade krater aşınmasının daha hakim olduğu bulunmuştur. Bu duruma takımın ön boşluk açısının ve yüksek sertlikteki talaş malzemesinin neden olduğu düşünülmüştür.
- Krater genişliği (K_B) değerinin 0,36 mm'ye ulaşması ile takım ömrünün tamamlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle takım ömür kriteri olarak $K_B=0,36$ mm değerinin kullanılabileceği önerilmiştir.
- İlk aşınma deneyinde takım 35 dakika ömre sahipken ikinci aşınma deneyinde 3,5 dakika içerisinde takım hasara uğramıştır. Bu sonuç seçilen kesme koşulları neticesinde oluşan titreşimin takım ömründe son derece etkili olduğunu göstermiştir.

- Kesme hızının artmasının talaşın daha kısa ve süreksiz formda oluşmasına sebep olduğu bulunmuştur. İlerleme hızının artması ise talaşı daha sürekli hale getirmiştir.
- Östemperlenmiş GGG70 malzeme, AlTiN/TiN PVD kaplamalı tungsten karbür kesici uçlar ile 0.5 mm talaş derinliği ve 130 m/dk gibi düşük seviyede kesme hızlarında işlendiğinde oldukça pürüzsüz yüzeyler elde edilebildiği yani işlenebilirliğin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.2 Öneriler

Yapılan deneysel çalışmaların diğer çalışmalara yardımcı olacağı ve tamamlayıcı olacağı düşünülmektedir.

- Titreşimler takım aşınmasında ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinde deneyleri etkilediği için takım bağlama boyunun işlenebilirliğe etkisi araştırılabilir.
- Takım bağlama tertibatının titreşim seviyesine etkisi incelenebilir.
- Talaş şekilleri ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki incelenebilir.
- Malzemenin farklı östemperleme şartlarının işlenebilirliğe etkisi araştırılabilir.
- Soğutma sisteminin kullanılmasıyla işlenebilirliğin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü takım aşınması ve takım ömrü üzerine etkileri araştırılabilir.
- ÖKGDD'in işlenebilirliği farklı kesici takım geometrileri ve farklı malzemeden imal edilmiş kesici uç kullanılarak araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Akdemir, A., Yazman, Ş., Sağlam, H. ve Uyaner, M., 2012. The Effects of Cutting Speed and Depth of Cut on Machinability Characteristics of Austempered Ductile Iron, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134,2.
- Akkurt, M., 2000, Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgahları, Birsen Yayınevi.
- Anonim, 2017, Training Handbook Metal Cutting Technology, Sandviken, İsveç, s. 149-183.
- Anonim, 2018, Küresel grafitli dökme demirde karbon yüzmesi sorunu, <https://dokumhane.net/kutuphane/kuresel-grafitli-dokme-demirde-karbon-yuzmesi-sorunu/>, [Erişim Tarihi: 12.05.2021].
- Anonim, 2021a, Adi The Material, <https://www.aditreatments.com/adi-the-material/> [Erişim Tarihi: 12.05.2021].
- Anonim, 2021b, Kesici kenarlarda aşınma, <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>, [Erişim Tarihi: 21.05.2021].
- Anonim, 2021c, Kesici Takım Aşınma Tipleri ve Aşınmanın Nedenleri, <https://www.makinaegitimi.com/kesici-takim-asinma-tipleri-ve-nedenleri/> [Erişim Tarihi: 21.05.2021].
- Anonim, 2021d, Ductile Iron Data for Design Engineers, <https://www.ductile.org/>, [Erişim Tarihi: 21.05.2021].
- Arft, M. ve Klocke, F., 2013, High performance turning of austempered ductile iron (ADI) with adapted cutting inserts, *Procedia CIRP*, 8, 129-134.
- Asiltürk, I. ve Akkuş, H., 2011, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement*, 44,9, 1697-1704.
- Aslantas, K. ve Uzun, I., 2009, The performance of ceramic and cermet cutting tools for the machining of austempered ductile iron, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41,7-8, 642-650.
- ASM-Handbook, 1991, Heat Treating (Vol 4), ASM Handbook Committee, *ASM International*.
- ASM Handbook, 2008, Casting, Volume 15, *ASM International*, ISBN: 978-0-87170-711-6.
- Aydın, B., 2002, Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşleminin İşlenebilirlik Özellikleri Üzerindeki Etkilerini İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Batra, U., Batra, N. ve Sharma, J., 2013, Wear performance of Cu-alloyed austempered ductile iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22,4, 1136-1142.
- Brandenberg, K., Ravenscroft, J., Rimmer, A., & Hayrynen, K., 2001, An ADI Crankshaft Designed for High Performance in TVR's Tuscan Speed Six Sports Car. *In Proceedings of SAE 2001 World Congress*.

- Brandenberg, K., 2001, Successfully machining austempered ductile iron (ADI), *Applied Process Inc. Technologies Div.*—Livonia, Michigan, USA.
- Byers, J. P., 2016, *Metalworking fluids*, crc Press.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G., 2013, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği 8. Baskıdan çeviri, Çeviri Editörü Kenan Genel, *Nobel Yayıncılık*, Ankara. s.402. .
- Čatipović, N., Živković, D. ve Dadić, Z., 2018, The effects of molybdenum and manganese on the mechanical properties of austempered ductile iron, *Tehnički vjesnik*, 25,2, 635-642.
- Chang, L., 1998, Carbon content of austenite in austempered ductile iron, *Scripta Materialia*, 39,1.
- Choudhury, I. ve El-Baradie, M., 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.
- Colpani, A., Fiorentino, A., Ceretti, E. ve Attanasio, A., 2019, Tool wear analysis in micromilling of titanium alloy, *Precision Engineering*, 57, 83-94.
- Çakır, C., 2006, Modern Talaşlı İmalatın Esasları (2. Baskı), Syf. 203, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Çalışkan, H., Kurbanoglu, C., Panjan, P. ve Kramar, D., 2012, Investigation of the performance of carbide cutting tools with hard coatings in hard milling based on the response surface methodology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66,5-8, 883-893.
- Çetin, M. ve Gül, F., 2005, Alaşımsız Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasif Aşınma Davranışına Aşındırıcı Parçacık Boyutu ve Östenitleme Süresinin Etkisi, *4th International Advanced Technologies Symposium*, Konya, 908-913.
- Davim, J. P., 2011, *Machining of hard materials*, Springer Science & Business Media.
- De Oliveira, V. ve Dos Santos, M., 2007, Analysis of the cutting tool's wear behavior for turning machining of austempered ductile, *19th International Congress of Mechanical Engineering*. Brasília.
- DeGarmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A. ve Klamecki, B. E., 2003, *Materials and process in manufacturing*, Prentice Hall Upper Saddle River.
- Demirayak, İ., 2006, Kesme parametreleri ve kaplama tabakasının talaş kaldırma işlemine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- Dilipak, H. ve Gezgin, A., 2010, AISI D3 Çeliğinin Frezelenmesinde, Kesici Uç Sayısı, Kesme Hızı ve İlerleme Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 13, 29-32.
- Dilipak, H., Guedas, A. ve Gezgin, A., 2009, An investigation of the number of inserts effect on the machining time and metal removal rate during the milling of AISI D3 steel at high cutting speeds, *Journal of Mechanical Engineering*, 55,7-8, 438-443.
- DIN EN 1563., 2015, Founding- Spheroidal Graphite Cast Irons, In.
- Durmuş, H., 2012, Optimization of multi-process parameters according to the surface quality criteria in the end milling of the AA6013 aluminum alloy, *Materials and technology*, 46,4, 383-388.

- Eltaggaz, A., Zawada, P., Hegab, H., Deiab, I. ve Kishawy, H., 2018, Coolant strategy influence on tool life and surface roughness when machining ADI, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94,9, 3875-3887.
- Eraslan, D., Balcı, A., Çetin, B., Uçak, N., Çiçek, A., Yılmaz, O. D., ve Davut, K., 2021, Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1443-1456.
- Franco, P., Estrems, M. ve Faura, F., 2004, Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44,15, 1555-1565.
- Garin, J. ve Mannheim, R., 2003, Strain-induced martensite in ADI alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 347-351.
- Goodrich, G., 1993, Ductile Iron Dilemma Primary Carbides, *Modern Casting AFS*, 9, 48-55.
- Górny, M., Angella, G., Tyrała, E., Kawalec, M., Paż, S. ve Kmita, A., 2019, Role of austenitization temperature on structure homogeneity and transformation kinetics in austempered ductile iron, *Metals and Materials International*, 25,4, 956-965.
- Gökkaya, H., Gökhan, S. ve Dilipak, H., 2011, Kaplamasız Sementit Karbür Kesici Takım Ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12,1, 59-64.
- Groover, M. P., 2020, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems, Seventh Edition, John Wiley & Sons.
- Grzesik, W., 2017, Advanced Machining Processes of Metallic Materials (Second Edition) Theory, Modelling, and Applications.
- Haapala, K. R., Zhao, F., Camelio, J., Sutherland, J. W., Skerlos, S. J., Dornfeld, D. A., Jawahir, I., Clarens, A. F. ve Rickli, J. L., 2013, A review of engineering research in sustainable manufacturing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135,4.
- Handayani, D., 2017, The Machinability Of Austempered Ductile Irons (ADI), Doctoral Thesis, The Pennsylvania State University, Industrial and Manufacturing Engineering.
- Hayrynen, K. L. ve Keough, J. R., 2003, Austempered Ductile Iron- The State of the Industry in 2003, *World ADI Conference*, Louisville, Kentucky.
- ISO 8688-2, 1989, Tool life testing in milling — Part 2: End milling.
- ISO, 1997. ISO 4287: 1997/Cor 1: 1998, Geometrical product specifications (GPS)— surface texture: profile method—rules and procedures for the assessment of surface texture.
- Kabakli, E., Bayramoglu, M. ve Geren, N., 2014, Evaluation of the surface roughness and geometric accuracies in a drilling process using the Taguchi analysis, *Materials and technology*, 48,1, 91-98.
- Kacal, A. ve Gulesin, M., 2011, Determination of optimal cutting conditions in finish turning of austempered ductile iron using Taguchi design method.

- Kahraman, Y., Uzun, G. ve Korkut, İ., 2015, Vermiküler Grafitli Dökme Demirlerin Frezelenmesinde Östemperleme Sıcaklığı Ve Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi, DÜZENLEME KURULU, 178.
- Katuku, K., 2010, Exploring The Possibilities Of Extending The Application Of Pcbn Cutting Tools To The Machining Of Adı Through The Understanding Of Wear Mechanisms, University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment.
- Katuku, K., Koursaris, A. ve Sigalas, I., 2009, Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcbN cutting tools under finishing conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 209,5, 2412-2420.
- Kayalı, Y. ve Yalçın, Y., 2006, Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinin araştırılması, *13th International Metallurgy & Materials Congress*.
- Keough, J. ve Hayrynen, K., 2004, Austempered cast irons, Applied Process, Inc., Livonia, Michigan.
- Kırcalı, K. K., 2006, Farklı matriks yapıları sahip küresel grafitli dökme demirlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kıvak, T., 2014, Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts, *Measurement*, 50, 19-28.
- Kıvak, T., Samtaş, G. ve Cicek, A., 2012, Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills, *Measurement*, 45,6, 1547-1557.
- Klocke, F., Klöpper, C., Lung, D. ve Essig, C., 2007, Fundamental Wear Mechanisms when Machining Austempered Ductile Iron (ADI), *CIRP Annals*, 56,1, 73-76.
- Klöpper, C. F. ve Klocke, F. 2006, Untersuchungen zur Zerspanbarkeit von austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI).
- Konodo, E., Ota, H. ve Kawai, T., 1997, A New Method To Detect Regenerative Chatter Using Spectral Analysis, Part 1: Basic Study On Criteria For Detection of Chatter, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119:461-466.
- Korkut, D. S., Korkut, S., Bekar, I., Budakçı, M., Dilik, T. ve Çakıcıer, N., 2008, The effects of heat treatment on the physical properties and surface roughness of Turkish hazel (*Corylus colurna* L.) wood, *International Journal of Molecular Sciences*, 9,9, 1772-1783.
- Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I. ve Seker, U., 2004, Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials & Design*, 25,4, 303-305.
- Kuram, E., 2016, The effect of monolayer TiCN-, AlTiN-, TiAlN-and two layers TiCN + TiN- and AlTiN + TiN-coated cutting tools on tool wear, cutting force, surface roughness and chip morphology during high-speed milling of Ti6Al4V titanium alloy, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 232,7, 1273-1286.
- Labrecque, C. ve Gagn, M., 1998, Canadian Metallurgical Quarterly," Review Ductile Iron: Fifty Years of Continuous Development, 37,5.

- Lefevre, J. ve Hayrynen, K. L., 2013, Austempered Materials for Powertrain Applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22,7, 1914-1922.
- Lin, S. C., Lui, T. S., Chen, L. H. ve Song, J. M., 2002, *Metall Matter Trans*, 33 (A), 2623.
- Moncada, O., Spicacci, R. ve Sikora, J., 1998, Machinability of austempered ductile iron.
- Motorcu, A., 2006, Ç1050, Ç4140 ve Ç52100 çeliklerinin farklı takımlarla işlenebilirliği ve modeller geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Muthukrishnan, N. ve Davim, P., 2011, Influence of coolant in machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V), *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2011.
- Nofal, A., 2013, Advances in the metallurgy and applications of ADI, *Journal of Metallurgical Engineering*, 2,1.
- Nofal, A., Ei-Din, H., Ibrahim, M. ve Ramadan, A., 2003, Cold Rolling of Austempered Ductile Iron, *Journal of Materials Science and Technology(Bulgaria)*, 11,2, 86-96.
- Olortegui-Yume, J. A. ve Kwon, P. Y., 2007, Tool wear mechanisms in machining, *International journal of machining and machinability of materials*, 2,3-4, 316-334.
- Özel, A., 1994, GGG 40-80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme ısı işleminin darbe direnci ve darbe geçiş sıcaklığına etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Öztürk, E., 2019, Östemperleme Sıcaklığının Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- Öztürk, S., 2017, Dökme Demirler Ders Notu, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, KTÜ, Trabzon, 2-20.
- Padan, D., 2012, Microalloying in austempered ductile iron (ADI), *AFS Trans*, 120, 1-12.
- Pilc, J., Šajgalík, M., Holubják, J., Piešová, M., Zaušková, L., Babík, O., Kuždák, V. ve Rákoci, J., 2015, Austempered Ductile Iron Machining, *Technological Engineering*, 12,1, 9-12.
- Polishetty, A., 2011, Machinability and microstructural studies on phase transformations in Austempered Ductile Iron, Auckland University, School of Engineering.
- Polishetty, A., Singamneni, S. ve Littlefair, G., 2008, A comparative assessment of austempered ductile iron as a substitute in weight reduction applications, *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 48517: 49-57.
- Priarone, P. C., Robiglio, M. ve Settineri, L., 2016, Milling of Austempered Ductile Iron (ADI) with recycled carbide tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82,1-4, 501-507.
- Rai, R. N., Datta, G., Chakraborty, M. ve Chattopadhyay, A., 2006, A study on the machinability behaviour of Al-TiC composite prepared by in situ technique, *Materials Science and Engineering: A*, 428,1-2, 34-40.

- Rajnovic, D., Eric, O. ve Sidjanin, L., 2012, The standard processing window of alloyed ADI materials, *Kovove Mater*, 50,3, 199-208.
- Sadettin, O., Ali Osman, E., Necip, C. ve Ersan, A., 2006, Tool Wear Evaluation By Vibration Analysis During End Milling Of AISI D3 Cold Work Tool Steel With 35 HRC Hardness, *NDT&E International*, 121-126.
- Sarıkaya, M., Dilipak, H. ve Gezgın, A., 2015, Optimization of process parameters for surface roughness and tool life in face milling using the Taguchi Analysis, *Materiali in tehnologije / Materials and technology* 49, 139-147.
- Savas, V. ve Ozay, C., 2007, Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter, *Journal of Materials Processing Technology*, 186,1-3, 279-283.
- Savkovic, B., Kovac, P., Dudic, B., Gregus, M., Rodic, D., Strbac, B. ve Ducic, N., 2019, Comparative characteristics of ductile iron and austempered ductile iron modeled by neural network, *Materials*, 12,18, 2864.
- Seah, K. ve Sharma, S., 1995, Machinability of alloyed austempered ductile iron, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35,10, 1475-1479.
- Shaw, M. C. ve Cookson, J., 2005, Metal cutting principles, 2, Oxford university press New York.
- Sinlah, A. I., 2014, A study of machinability in milling of austempered ductile iron (ADI) ADI 900, ADI 1050, and ADI 1200 with carbide tools.
- Sinlah, A., Handayani, D., Voigt, R. C., Hayrynen, K., M'Saoubi, R., & Saldana, C., 2016, Effects of microstructure and strength on wear performance in rough milling of austempered ductile iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(1-2), 62-67.
- Smith, W. F., 2000, Mühendislik Alaşımlarının Yapı Ve Özellikleri 2. Baskıdan çeviri, Çeviri: Mehmet Erdoğan, *Nobel Yayıncılık*, , Ankara. s.236., 2.
- Stephenson, D. A. ve Agapiou, J. S., 2016, Metal cutting theory and practice, *CRC press*.
- Szecsı, T., 1999, Cutting force modeling using artificial neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, 92, 344-349.
- Şah, A., 2018, Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Kesme Enerjisine Etkisinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Şeker, U., 2000, Talaşlı İmalatta Takım Tasarımı, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Ders Notları, Ankara.
- Şeker, U. ve Hasirci, H., 2006, Evaluation of machinability of austempered ductile irons in terms of cutting forces and surface quality, *Journal of Materials Processing Technology*, 173,3, 260-268.
- Taylan, F., 2009, Sert malzemelerin frezelenmesinde takım aşınma davranışlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Thomas, T. R., 198, Rough Surface, London ; New York : Longman, Cop.
- Trudel, A. ve Gagne, M., 1997, Canadian Metallurgical Quarterly," Effect of Composition and Heat Treatment Parameters on the Characteristics of Austempered Ductile Iron, 36,5.

- Ucun, İ., Aslantaş, K., Taşgetiren, S. ve Gök, K., 2007, Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin sinterlenmiş karbür kesici takım ile tornalama işleminde takım performansının incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22,4, 739-744.
- Uzun, G. ve Çakıroğlu, R., 2020, Yüksek İlerlemeli Frezeleme İşleminde İşlenebilirlik Parametrelerinin İncelenmesi.
- Wang, Z., Wong, Y. ve Rahman, M., 2005, High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45,1, 105-114.
- Yalçın, Y. ve Özel, A., 1999, Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir-ÖKGDD, *Metallurji*, 23,119, 15-19.
- Yaldız, S., 2018, Takım Aşınma Mekanizmaları ve Aşınma Tipleri, Ders Notu, Teknoloji Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Yang, J. ve Putatunda, S. K., 2005, Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process, *Materials Science and Engineering: A*, 406,1-2, 217-228.
- Yavuz, K., 2006, GGG-70 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Yazman, Ş., 2006, Östemperlenmiş Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kesme Parametrelerinin İşlemeye Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Konya.
- Yazman, Ş., Gemi, L., Uludağ, M., Akdemir, A., Uyaner, M. ve Dişpinar, D., 2018, Correlation Between Machinability and Chip Morphology of Austempered Ductile Iron, *Journal of Testing and Evaluation*, 46,3.
- Zeyveli, M. ve Karamusaoğlu, H., A., 2011, Effect of Wiper Cutting Tool Geometry on Machining of Ductile Cast Iron, *Sigma*, 29, 358-366.
- Zhang, J., Zhang, N., Zhang, M., Lu, L., Zeng, D. ve Song, Q., 2014. Microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron with different strength grades, *Materials Letters*, 119, 47-50.
- Zhongkui, Z., Quingzhou, S., Hailong, M. ve Junxian, Z., 2006, *Proceedings of the 8th International Symposium on Science and Processing of Cast Iron*, Beijing, China, Experimental study of MACHineable ADI: 464-467.