



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ AL7075-T651 ALAŞIM
MALZEMESİNİN KAPLAMALI VE KAPLAMASIZ KESİCİ
TAKIMLARLA DELİNMESİ**

Serdar ORUN

**Aralık - 2025
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ AL7075-T651 ALAŞIM
MALZEMESİNİN KAPLAMALI VE KAPLAMASIZ KESİCİ
TAKIMLARLA DELİNMESİ**

Serdar ORUN

**Danışman
Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ**

Diğer Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Fikret SÖNMEZ

Doç. Dr. Şehmus BADAY

**Aralık - 2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Serdar ORUN tarafından hazırlanan “Kriyojenik İşlem Uygulanmış Al7075-T651 Alaşım Malzemesinin Kaplamalı ve Kaplamasız Kesici Takımlarla Delinmesi” adlı tez çalışması 21/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Fikret SÖNMEZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

.....

Üye

Doç. Dr. Şehmus BADAY

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

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

ETİK BEYANI

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

ETHICAL DECLARATION

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

İmza
Serdar ORUN
Tarih: 21.11.2025

ÖZET

KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ AL7075-T651 ALAŞIM MALZEMESİNİN KAPLAMALI VE KAPLAMASIZ KESİCİ TAKIMLARLA DELİNMESİ

Serdar ORUN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2025, 93 Sayfa

Al 7075 alüminyum alaşımının talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesinde, işleme verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması büyük bir öneme sahiptir. Ancak alüminyum malzemelerin işlenmesi sırasında yüksek kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğünün artması ve takım aşınması gibi istenmeyen olumsuz durumlar meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Alüminyum (Al7075-T651) alaşımının, kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçalarında, Zirkonyum (Zr) kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar kullanılarak hem kuru hem de Minimum Miktarla Yağlama (MMY) koşullarında delinmesi sonucunda ortaya çıkan kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri, kesici takım aşınmaları, talaş morfolojisi, mikro yapı ve sertlik ölçümleri incelenmiştir. Kriyojenik işlem sonrası Al 7075 iş parçasında sertlik değerinin %11 azaldığı görülmüştür. Kuru ve MMY işleme şartlarında kesme hızı ve ilerleme oranının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmüştür. MMY işleme şartlarında yapılan delme deneyleri sonuçları kuru işlem şartlarına göre daha iyi çıkmıştır. Zr kaplamalı kesici takımlarla elde edilen deneysel sonuçlar kaplamasız kesici takımlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Kriyojenikli iş parçasının işlenmesi esnasında elde edilen ilerleme kuvvetleri kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasına göre daha düşük çıkarken yüzey pürüzlülüğü değerleri açısından ise bu durum tam tersi olmuştur. Takım aşınmalarında en çok görülen aşınma tipi BUE olduğu tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış Al 7075 iş parçasının SEM görüntülerinde, oluşan talaşların testere dişi (tırtıklı) formda ve lamelli yapıda olduğu görülmüştür. Kesici takımlara ait EDS analizlerinde alaşım elementinin kesici takım talaş yüzeyine yapışmasında etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Al 7075, kriyojenik, delik delme, ilerleme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, kaplamalı ve kaplamasız matkap, MMY.

ABSTRACT

MASTER THESIS

DRILLING OF CRYOGENICALLY TREATMENT APPLIED AL7075-T651 ALLOY MATERIAL WITH COATED AND UNCOATED CUTTING TOOLS

Serdar ORUN

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2025, 93 Pages

In the machining of Al 7075 aluminum alloy using chip removal methods, maximizing machining efficiency is of great importance. However, undesirable consequences such as high cutting forces, increased surface roughness, and tool wear occur during the machining of aluminum materials. This study investigated the cutting forces, surface roughness values, cutting tool wear, chip morphology, microstructure, and hardness measurements resulting from drilling aluminum (Al7075-T651) alloy in cryogenically treated and untreated workpieces using coated (Zirconium) and uncoated cutting tools under both dry and Minimum Quantity Lubrication (MQL) conditions. It was observed that the hardness value of the Al 7075 workpiece decreased by 11% after cryogenic treatment. It was observed that feed forces and surface roughness values increased with increasing cutting speed and feed rate in dry and MQL machining conditions. The results of drilling tests performed under MQL machining conditions were better than those under dry machining conditions. Experimental results obtained with Zr coated cutting tools gave better results than uncoated cutting tools. While the feed forces obtained during the machining of the cryogenically treated workpiece were lower than the untreated workpieces, the opposite was true in terms of surface roughness values. It was determined that the most common wear type in tool wear is BUE. SEM images of the cryogenically treated and untreated Al 7075 workpiece revealed that the resulting chips had a sawtooth (serrated) shape and a lamellar structure. EDS analyses of the cutting tools revealed that the alloying element had an impact on the adhesion of the cutting tool to the rake surface.

Keywords: Al 7075, cryogenic treatment, drilling, feed forces, surface roughness, coated and uncoated drill bits, MQL

ÖN SÖZ

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen babam Hacı Mehmet Şah ORUN'a, annem Hacı Zaide ORUN'a, abim Ümit ORUN'a, kardeşim Fahrettin ORUN'a ve bütün geniş aileme minnettarım. Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren değerli danışmanım Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ'e ve çalışmalarım süresince desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Şehmus BADAY'a teşekkür ederim. Ayrıca mikro yapı analizlerinde yardımlarını esirgemeyen Asaş Alüminyum sanayi şirketine, Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN'e ve deney aşamalarında bana yardımcı olan değerli dostum Makine Yüksek Mühendisi Muhammed Enis YILDIZ'a şükranlarımı sunarım.

Serdar ORUN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. GENEL BİLGİLER.....	12
3.1. Alüminyum Genel Özellikleri	12
3.1.1. 7XXX serisi alaşımlar.....	13
3.2. Talaşlı İmalatta Delik Delme İşlemleri.....	18
3.2.1. Kesici takımlar	18
3.2.1.1. Kaplamasız HSS matkap uçları	18
3.2.1.2. PVD kaplamalı matkap uçları.....	19
3.2.2. Delik delme işlemleri.....	19
3.2.3. Delik delme işlemi parametreleri.....	23
3.2.4. Kesici takımların aşınması.....	25
3.2.5. Yüzey pürüzlülüğü.....	28
3.2.6. Sertlik ölçümü.....	30
3.3. Kriyojenik İşlem	30
3.4. Minimum Miktarda Yağlama (MMY).....	33
3.4.1. MMY sistemi bileşenleri	36
4. MATERYAL VE METOD	37
4.1. Deneyde Kullanılan İş Parçası	37
4.2. Kriyojenik İşlem ve Temperleme Aşaması	38
4.3. İş Parçalarının Kesim Aşamaları	39
4.4. Matkap Uçları	40
4.5. Soğutma Sıvısı	41
4.6. Soğutma Sıvısı Debi Ayarı	42
4.7. Delik Delme Deneyleri	43
4.7.1. Kesici takımların bağlanması.....	44
4.7.2. Kuru delme deneyleri.....	44
4.7.3. MMY delme deneyleri.....	46
4.8. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü	48
4.9. İş Parçası Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	51
4.10. İş Parçası Mikro Sertlik Ölçümü	52
4.11. Mikro yapı Analizi.....	52
4.12. Kesici Takım Aşınması.....	53

4.13. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı	55
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
5.1. Kriyojenik İşlemli ve Kriyojenik İşlemsiz Al 7075-T651 Alaşımının Mikro Yapısı	56
5.2. Al 7075 T651 İş Parçası Sertlik Ölçümleri.....	57
5.2. İlerleme Kuvvetlerinin İncelenmesi.....	58
5.3. Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin İncelenmesi	66
5.4. Al 7075 T651 Talaş Parçası SEM Görüntülerinin İncelenmesi	73
5.5. Kesici Takımlara Ait EDS Görüntülerinin İncelenmesi	76
5.6. Kesici Takım SEM Görüntülerinin İncelenmesi	79
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
6.1 Sonuçlar	81
6.2 Öneriler	83
KAYNAKLAR	84

ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ

Tablo 3. 1. Alüminyum alaşımlarının çeşit ve özellikleri.....	12
Tablo 3. 2. Al 7075 ısıt işleml türüne göre mekanik özellikleri.....	15
Tablo 4. 1. Alüminyum 7075 plakaların özellikleri.....	37
Tablo 4. 2. Kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarına ait özellikler	40
Tablo 4. 3. Soğutma sıvısı özellikleri.....	41
Tablo 4. 4. Kuru delme işleml parametreleri	45
Tablo 4. 5. MMY işleme parametreleri.....	47
Tablo 4. 6. Kistler tip 9257B teknik özellikler.....	48



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1. Talaşlı imalat işlem sayılarına göre delmenin diğer talaş kaldırma işlemlerine göre oranı	20
Şekil 3. 2. Delik delme işleminde geçen sürenin farklı talaş kaldırma işlemlerinde geçen süre ile kıyaslanması	21
Şekil 3. 3. Takım dönmesi (v), ilerlemesi (u)	22
Şekil 3. 4. Delme prosesi şematik gösterimi.	24
Şekil 3. 5. Delik delmede ana parametreler	24
Şekil 3. 6. Matkapta aşınma türleri	26
Şekil 3. 7. Matkapta serbest yüzey aşınmasının ölçülmesi	27
Şekil 3. 8. Kesici takımındaki aşınmaların şematik olarak gösterilmesi	28
Şekil 3. 9. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra)	29
Şekil 3. 10. Kontrollü bir şekilde uygulanan kriyojenik işlem şeması	32
Şekil 3. 11. Kriyojenik işleme stratejileri	33
Şekil 3. 12. MMY uygulaması	36
Şekil 4. 1. Deneyde kullanılan alüminyum Al7075 T 651 iş parçası	37
Şekil 4. 2. Kriyojenik sıfırlatı işlem kabini	38
Şekil 4. 3. Kriyojenik işlemin şematik gösterimi	38
Şekil 4. 4. Al 7075 iş parçalarının kesim aşamaları	39
Şekil 4. 5. İş parçası bağlantı deliklerinin belirlenmesi	39
Şekil 4. 6. Matkap uçları	40
Şekil 4. 7. Soğutma sıvısı	41
Şekil 4. 8. Soğutucu akışkan nozul mesafe ve açısının ayarlanması	42
Şekil 4. 9. Soğutma sıvısı debi ölçümü	42
Şekil 4. 10. Delik delme tezgahı	43
Şekil 4. 11. Kesici takımların bağlanması	44
Şekil 4. 12. Kuru delme deneyleri	46
Şekil 4. 13. Kuru delme talaş numuneleri	46
Şekil 4. 14. MMY delme deneyleri	48
Şekil 4. 15. Dinanometreye bağlanmış iş parçası	49
Şekil 4. 16. Kistler type 5070 amplifikatör	49
Şekil 4. 17. DAQ sinyal düzenleyici	50
Şekil 4. 18. CutPro MALDAQ modülü	50
Şekil 4. 19. Ortalama kesme kuvvetleri	51
Şekil 4. 20. Yüzey pürüzlülük ölçümü	51
Şekil 4. 21. İş parçası mikro sertlik ölçümü	52
Şekil 4. 22. Kesici takım matkap uçları	53
Şekil 4. 23. Kesici takım aşınma testi için yapılan delik delme aşaması	53
Şekil 4. 24. Kesici takım aşınma mikroskopik aşınma ölçümleri	54
Şekil 4. 25. Hassas kesim cihazı	54
Şekil 4. 26. Kesilen matkap uçları	55
Şekil 4. 27. SEM görüntüleme cihazı	55
Şekil 5. 1. Al 7075 malzemesinin kriyojenikli ve kriyojeniksiz mikro yapısı	56
Şekil 5. 2. Al 7075 T651 normal ve kriyojenik iş parçasına ait sertlik ölçüm değerleri	57
Şekil 5. 3. Kuru delmede farklı kesme hızlarına bağlı ilerleme kuvveti değişim grafikleri	58
Şekil 5. 4. Kuru delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı ilerleme kuvveti değişim grafikleri	59

Şekil 5. 5. MMY delik delmede farklı kesme hızlarına bağlı ilerleme kuvvet değişim grafikleri.....	61
Şekil 5. 6. MMY delik delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı ilerleme kuvvet değişim grafikleri.....	62
Şekil 5. 7. Normal iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delme grafikleri.....	63
Şekil 5. 8. Normal iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delme grafikleri.....	64
Şekil 5. 9. Kriyojenik iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delme grafikleri.....	65
Şekil 5. 10. Kriyojenik iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delme grafikleri.....	66
Şekil 5. 11. Kuru delmede farklı kesme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri.....	67
Şekil 5. 12. Kuru delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri..	68
Şekil 5. 13. MMY delmede farklı kesme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri...	68
Şekil 5. 14. MMY delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri	69
Şekil 5. 15. Normal iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri	70
Şekil 5. 16. Normal iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri.....	71
Şekil 5. 17. Kriyojenik iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri.....	72
Şekil 5. 18. Kriyojenik iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri.....	73
Şekil 5. 19. Talaş numuneleri	74
Şekil 5. 20. Kuru işlem şartlarında iş parçalarının işlenmesi sonucu oluşan talaş parçalarının SEM görüntüleri a) NCD b) NUD c) KCD d) KUD	75
Şekil 5. 21. MMY işlem şartlarında iş parçalarının işlenmesi sonucu oluşan talaş parçalarının SEM görüntüleri a) NCM b) NUM c) KCM d) KUM.....	76
Şekil 5. 22. Zr kaplamalı HSS matkap ucu EDS analizi	77
Şekil 5. 23. Kaplamasız HSS matkap ucu EDS analizi	78
Şekil 5. 24. Kaplamasız HSS matkap ucu SEM görüntüsü	80
Şekil 5. 25. Zr kaplamalı HSS matkap ucu SEM görüntüsü	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al	: Alüminyum
D	: Delik işlem çapı
F _c	: Esas kesme kuvveti
F _f	: İlerleme kuvveti
F _r	: Radyal kuvvet
R _a	: Ortalama yüzey pürüzlülük
μm	: Mikrometre
K _c	: Özgül kesme kuvveti
L	: Delik işlem boyu (mm)
Mn	: Mangan
mm	: milimetre
N	: İş mili hızı
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
V _c	: Kesme hızı
V _f	: İlerleme hızı

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
BUE	: Yığıntı Talaş
CNC	: Bilgisayar Sayısal Denetim
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EDS	: Enerji Dağıtıcı Spektroskopi
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
KUD	: Kriyojenik İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım-Kuru Delme
KCD	: Kriyojenik İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-Kuru Delme
KUM	: Kriyojenik İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım-MMY
KCM	: Kriyojenik İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-MMY
MMY	: Minimum Miktarda Yağlama
NUM	: Normal İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım-MMY
NCM	: Normal İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-MMY
NUD	: Normal İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım -Kuru Delme
NCD	: Normal İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-Kuru Delme
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

1. GİRİŞ

Son yıllarda sanayi sektöründe kullanım alanı hızla genişleyen alüminyum, sahip olduğu özgün fiziksel ve kimyasal özelliklerin birleşimi sayesinde çok yönlü bir yapı ve mühendislik malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Alüminyumun düşük yoğunluğu ile çeşitli alaşımlarının yüksek mekanik dayanımı, üstün elektriksel iletkenliği ve ısı iletim özellikleri, bu malzemenin bilgisayar, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde tercih edilme oranını artırmıştır. Ayrıca, korozyona karşı üstün direnç göstermesi sebebiyle tıbbi uygulamalarda da kritik bir role sahiptir. Alüminyumun üretim ve işlenme süreçlerindeki davranışları üzerine kapsamlı bilimsel araştırmalar yapılmış olup, bu alandaki çalışmalar halen yoğunlukla sürdürülmektedir.

Al 7075 alüminyum alaşımı malzemelerin talaşlı üretim teknikleriyle şekillendirilmesinde, işleme verimliliğinin optimize edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Alüminyum malzemeleri işlenirken istenmeyen yüksek kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması gibi birçok olumsuzluklara sebep olmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek için son yıllarda iş parçalarına uygulanan kriyojenik işlem malzemenin mikro yapısı, sertliği ve tokluğu üzerinde olumlu etkiler sağlayarak bu olumsuzlukları gidermekte yardımcı olmaktadır. Bunun yanında Minimum Miktarda Yağlama (MMY), işleme etkinliğini artırmak ve takımın ömrünü uzatmak amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Talaşlı imalat esnasında, kesme bölgesinde oluşan ısının kontrol altına alınması ve talaşın etkili biçimde uzaklaştırılması, yüksek kesme performansının sağlanabilmesi için temel gerekliliklerdendir. MMY ile talaş kaldırma esnasında oluşan bu olumsuzlukları giderilmektedir.

Alüminyum alaşımlarının talaşlı imalatında, diğer talaş kaldırma işlemleri gibi birçok etkenin sürece etkisi bulunmaktadır. Bu etkenler arasında yer alan kesici takım, alüminyumun işlenmesi esnasında hem kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü hem de kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaş (BUE) açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. BUE'nin yüksek kesme kuvvetine, düşük parça yüzey kalitesine ve kısa takım ömrüne temel etken olduğu bilinmektedir (Günay, 2003). Talaşlı imalat sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü malzemenin kalitesini belirleyen önemli bir imalat parametresidir. Birbirleriyle temas halinde çalışan makine parçalarının istenilen işlevi

uzun süreli ve minimum enerji harcayarak gerçekleştirmesi yüzey pürüzlülüğüne ve parçanın boyut hassasiyetine bağlıdır. Yüzey kalitesi; yorulma dayanımını, korozyon direncini ve malzemenin tribolojik özelliklerini büyük oranda etkiler (Karayel, 2008). Bu nedenle, yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve karakterizasyonu, talaşlı imalat süreçlerinin optimizasyonu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Talaşlı imalat süreçlerinde verimlilik talebindeki artış ile birlikte, yüksek kesme ve ilerleme hızlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu da beraberinde yüksek kesme sıcaklıklarının oluşmasına yol açmakta, bu durum ise hem kesici takım ömrünü kısaltmakta hem de parça kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Dhar vd., 2007). Talaşlı imalat yöntemlerinde kullanılan kesme sıvıları, soğutma, yağlama, talaş kesme bölgesinden uzaklaştırma, sürtünme sonucu oluşan ısıyı denetim altına alma, kesme işlemini kolaylaştırma, yüzey kalitesini iyileştirme ve talaşın iş parçasına yapışmasını engelleme gibi önemli işlemlere sahiptir. Kesme sıvısı kullanımını azaltmak amacıyla çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında kesme sıvısı olmadan yapılan kesme (kuru kesme), basınçlı hava ile soğutma, Yüksek Hızda Kesme (YHK) ve MMY yer almaktadır. Kuru kesme ve basınçlı hava ile soğutma, şu anda çevre dostu üretim yöntemleri olarak tercih edilse de, yüksek işleme verimliliği, üstün yüzey kalitesi ve zorlu kesme koşullarında bu yöntemlerin etkinliği sınırlı olabilir. Son yıllarda geliştirilen MMY tekniği, bu tür ihtiyaçları karşılamak için uygulanmaktadır (Dhar vd., 2006).

Al 7075 malzemeler için sıklıkla uygulanan yaşlandırma ısı işlemi, bu alaşıma yaygın olarak uygulanan ısı işlem yöntemidir. Bu ısı işlem süreci sırasıyla; çözeltiye alma, su verme ve yaşlanma olmak üzere üç basamakta gerçekleşmektedir. Çözeltiye alma işleminde fazların çözülmesi, su verme işleminde aşırı doymuş yapının oluşturulması ve yaşlanma işleminde ise çözünen atomların oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda çökmesi işlemlerinden oluşmaktadır. 7xxx alaşımlarının oda sıcaklığı gibi düşük sıcaklıklarda yaşlandırılmasıyla, yoğun çökelmelerin oluşumu gözlemlenmektedir. T6 işlemi, çözelti ısı işlemi görmüş ve suni olarak yaşlanmış olarak tanımlanmaktadır (Güleryüz ve Kaçar 2011). Yapılan birçok çalışmada alüminyum alaşımlarına yaşlandırma öncesi veya sonrası kriyojenik işlem uygulaması dikkat çekmektedir. Kriyojenik işlem 0°C altında malzemenin yapısında değişiklik yapan ve özelliklerini geliştiren bir işlemdir. Malzemede kristal kafes kusurları, imalat ve ısı işlem sırasında metalde oluşan artık gerilimler gibi birçok farklı durum vardır. Bu kusurların, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde zararlı etkileri vardır. Bu durum fonksiyonel performansı etkiler (Sonar vd., 2018). Kriyojenik işlem uygulandığında metalin kristal

kusurları azalır ve kristal kafes içindeki boşlukların azalması nedeniyle yapı homojenliği elde edilir. Ayrıca kriyojenik işlem malzemesin mikroyapısındaki tanelerin daha düzgün ve küçük olmasına, malzemenin içindeki kalıntı gerilmelerin dengelenmesine, malzemenin tokluğuna ve sertliğine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış Alüminyum (Al7075-T651) iş parçalarına Zirkonyum (Zr) kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar kullanılarak hem kuru hem de MMY ortamda delinmesi sonucu oluşan kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri, kesici takım aşınmaları, mikro sertlik, mikro yapı ve talaş morfolojisi kapsamlı olarak incelenmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Hüseyinoğlu ve Tosun (2009), yaptıkları çalışmada, AA 7075 alüminyum alaşımının MMY yöntemi ile frezelenmesi sürecinde, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı kesici takım türleri, kesme hızları ve ilerleme miktarlarıyla gerçekleştirilen deneyler sonucunda; ilerleme oranının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde bir artış gözlemlenirken, kesme hızındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, karbür takımların kullanıldığı işlemlerde, TiN kaplamalı ve yüksek hız çeliği (HSS) takımlara kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Çaydaş ve Çelik (2017), AA 7075-T6 alüminyum alaşımı, farklı uç açlarına sahip K20 kalitesindeki karbür matkaplar kullanılarak çeşitli ilerleme hızlarında delinmiş ve işleme parametrelerinin takım sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve eksenel ilerleme kuvveti üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, hem ilerleme hızının hem de matkap uç açısının artmasıyla eksenel ilerleme kuvvetinin tüm deney koşullarında yükseldiği belirlenmiştir. Ayrıca, ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de ilerleme miktarı ve matkap uç açısındaki artışla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, takım uç sıcaklıklarının, ilerleme hızı ve matkap uç açısının artmasıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir.

Kannan vd. (2020), Al 7075 (Al 7075/BN/Al₂O₃) bazlı hibrit nanokompozitler ile güçlendirilmemiş Al 7075 alüminyum matrisli nanokompozit malzemeler, sıkmalı döküm yöntemiyle üretilmiş ve kuru ile MMY koşullarında farklı kesme hızları (150 ve 250 m/dak) ile ilerleme hızları (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/dev) değiştirilerek işlenmiştir. Bu çalışmalar kapsamında, kesme kuvvetlerinin, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelenmiş ve karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. MMY koşullarında gerçekleştirilen işlemin, talaş kaldırma sürecinde oluşan kesme kuvvetlerini azaltmaya yardımcı olduğu, bunun nedeninin ise kullanılan yüksek basınçlı yağlayıcının kesme bölgesindeki ısıyı ve sürtünmeyi düşürmesinin yanı sıra, talaş kırılmasını kolaylaştırarak talaşları bölgeden hızlı bir şekilde uzaklaştırması olduğu ifade edilmiştir. Hibrit nanokompozit malzeme için, düşük ilerleme (0,1 mm/dev) ve yüksek kesme hızı (250 m/dak) koşullarında en az krater ve yan yüzey aşınmasının meydana geldiği

gözlemlenmiştir. Ayrıca, MMY uygulamasının takım aşınmasını azaltıcı etkisi olduğu belirtilmiştir. Hibrit kompozitlerin işlenmesinde minimum yüzey pürüzlülüğüne ulaşmak için en uygun işlem parametrelerinin, yüksek kesme hızı ile MMY koşullarında düşük ilerleme hızı olduğu vurgulanmıştır.

Çagan vd. (2020) yaptığı çalışmada Al7075-T6 alüminyum alaşımının kuru ve MMY koşullarında işlenebilirliğini incelemek amacıyla, üç farklı kesme hızında (400, 450 ve 500 m/dak), sabit ilerleme hızı (0,1 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1 mm) ile tornalama işlemlerini gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada, MMY koşullarında gerçekleştirilen tornalama işlemleri sonucunda elde edilen iş parçası yüzey kalitesinin, kuru işleme koşullarına kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, MMY ortamında oluşan talaşların, kuru ortama göre daha uzun geometrik yapıda olduğu tespit edilmiştir. MMY ile işleme sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, kuru işlemede elde edilen değerlere kıyasla yaklaşık %15 oranında daha iyi olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, MMY uygulaması; çevre dostu yapısı, etkin soğutma ve yağlama özellikleri ile daha kaliteli yüzey elde edilmesine olanak sağlaması nedeniyle en uygun ve güvenilir soğutma-yaglama yöntemi olarak değerlendirilmiştir.

Pirtini ve Lazoğlu (2005), delme işlemi kapsamında delik kalitesi ve kesme kuvvetlerini araştırmışlardır. Çalışmada, teorik modellemenin yanı sıra deneysel çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, alüminyum AA7039 malzemesi sabit kesme hızı altında beş farklı ilerleme hızıyla işlenmiştir. Geliştirilen teorik model ile her bir işlem koşulu için kesme kuvvetleri başarıyla tahmin edilmiştir. Deneysel ölçümlerde ise, Koordinat Ölçme Makinesi (CMM) kullanılarak elde edilen delik kalitesi değerlerinin, teorik model tarafından hesaplanan sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Böylece, deney sayısı minimumda tutulurken, matematiksel modeller aracılığıyla ilgili işlem koşulları için deneysel sonuçlarla tutarlı çıktılar elde edilmiştir.

Dahnel vd. (2022), yaptıkları çalışmada, Al 7075 alaşımının delinmesinde kesme hızı (22, 44 ve 66 m/dak) ile soğutma türünün (kuru ve sıvı) takım aşınması ve talaş yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde, 6 mm çapında matkap ve sabit diş başı ilerleme hızı (0,15 mm/diş) kullanılmıştır. Kesme sıvısı uygulanan deneylerde, kuru delme koşullarına kıyasla daha düşük takım aşınması ve daha küçük geometrik yapıda talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 44 m/dak kesme hızı ile sıvı soğutma altında gerçekleştirilen delme işlemlerinde en az takım aşınmasının meydana geldiği tespit edilmiştir.

Aydın ve Nalbant (2020), yaptıkları çalışmada Al-7075 alaşımından oluşan CFRP/Al-7075 istifli yapıların, 120°, 130° ve 140° uç açlarına sahip kaplamasız karbür matkaplar ile işlenebilirliği incelenmiştir. Al-7075 tabakasında artan delik sayısına bağlı olarak itme kuvveti (Fz) değerlerinde bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle 140° uç açısına sahip matkap ile gerçekleştirilen delme işlemlerinde, esas kesici kenar boyunca yoğun çapak oluşumu ve belirgin BUE meydana gelmiş; ayrıca matkabın helis kanalları boyunca Al talaşlarının sıvanarak biriktiği tespit edilmiştir.

Yaşar (2019), yaptığı çalışmada, Al 7075 alaşımının delinme işlemi, hem deneysel yöntemlerle hem de sonlu elemanlar metodu kullanılarak ilerleme kuvveti açısından incelenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda yüzey pürüzlülüğü de değerlendirilmiştir. Deneylerde kesme hızı (40, 80 ve 120 m/dak), diş başı ilerleme miktarı (0,05, 0,1 ve 0,15 mm/diş), matkap uç açısı (120°, 130° ve 140°) ve kaplama durumu (kaplamalı/kaplamasız) parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen deney sonuçları doğrultusunda, optimum parametreler 40 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş diş başı ilerleme ve kaplamalı, 140° uç açısına sahip matkap olarak belirlenmiştir.

Demir vd. (2017), 4 ve 6 mm kalınlığındaki ön delinmiş Al 7075 T651 iş parçalarına, HSS matkaplar kullanılarak sırasıyla 8 ve 10 mm çaplarında delikler açılmıştır. Ön delik çapları (1,5, 2, 2,5, 3, 3,5 ve 4 mm) ile ön delik derinliklerinin (1, 2, 3 ve 4 mm), delik yüzey pürüzlülüğü ve delikte oluşan kovan geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, 8 mm çapındaki delikler için en uygun ön delik çapının 2,5 - 3 mm, 10 mm çapındaki delikler için ise 3 - 3,5 mm aralığında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ideal ön delik derinliğinin 2 - 3 mm aralığında olduğu ifade edilmiştir.

Çakır (2015), yaptığı çalışmada, Al 2024 ve Al 7075 alaşımlarına MMY, kuru kesme, basınçlı hava ve sıvı soğutma koşullarında delik delme deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada, bu farklı soğutma yöntemlerinin delik kalitesi (dairesellikten sapma, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğü), ilerleme kuvveti ve moment üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kesme parametreleri olarak, kesme hızı 100, 125 ve 150 m/dak, diş başı ilerleme miktarı ise 0,1, 0,15 ve 0,2 mm/diş olarak belirlenmiştir. Farklı soğutma koşulları altında gerçekleştirilen deneylerde, kesme parametrelerinin etkisi de değerlendirilmiş ve en iyi performansın geleneksel sıvı soğutma yöntemiyle elde edildiği belirtilmiştir.

Alpas ve Bhowmick (2008), çalışmalarında %6 Si içeren Al alaşımı (Al319) delinmesinde MMY tekniği kullanılarak elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalı matkap performansı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, kuru delme ile H₂O bazlı

MMY sıvı koşullarındaki delme işlemleri karşılaştırılmıştır. H₂O-MMY ortamında gerçekleştirilen delme işlemlerinde, BUE oluşumunun en düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, tork ve ilerleme kuvvetinde anlamlı azalmalar kaydedilmiştir.

Zhang vd. (2023), yaptığı çalışmada, yapay yaşlandırma ısısal işleminin ardından -196 °C'de 168 saat süreyle kriyojenik işlem uygulanan 7075 alüminyum alaşımının yüksek hızda kesilmesi sonucunda, kriyojenik işlem uygulanmamış numunelere kıyasla daha ince tane yapısı ve daha fazla MgZn₂ çökeltisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kriyojenik işlem görmüş numunelerde istifleme hatalarının belirgin şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir. Yapay yaşlandırma sonrası 7075 alüminyum alaşımında, 0,15 nm ile 0,25 nm arasında değişen düzlemler arası mesafelerde belirgin istifleme hatalarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem sonrası gerçekleştirilen Ters Fourier dönüşümü analizleri, alaşımdaki istifleme hatalarının önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur.

Ogawa vd. (1994), Alüminyum AA5056 alaşımına yönelik mikro delik delme işlemlerinde, talaş şekli, moment, ilerleme kuvveti ve delik yüzey pürüzlülüğü kriterleri kullanılarak işleme performansı incelenmiştir. Ayrıca, kesici kenar uzunluğu ve ilerleme hızının talaş şekline etkileri de değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, mikro delik delmede küçük çapın etkisiyle, kesici kenarların iç kısmındaki talaş açısının yeterli büyüklükte olması durumunda; delik derinliğinin artmasına rağmen moment ve ilerleme kuvvetlerinde aşırı bir yükseliş gözlenmediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, matkapta artan öz kalınlık ve uç açısının, büyük adımli helisel talaş şekli oluşturduğu; bunun ise kolay talaş akışı sağlaması, kesme kuvvetlerinin azalması ve takım kırılmalarının önlenmesiyle ilerleme parametresindeki kritik seviyenin yükselmesine ve dolayısıyla delik delme performansının iyileşmesine katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

Akıncıoğlu vd. (2015), kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımların performansını konu alan bir derleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kriyojenik işlemin tungsten karbür, Yüksek Hız Çeliği (HSS), Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) kaplamalı karbür gibi çeşitli kesici takımlara yaygın şekilde uygulanabilen etkili bir ısısal işlem olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, bu yöntemin kesici takım performansını iyileştirerek üretim maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağladığı ifade edilmiştir.

Wei vd. (2018), 7075 alüminyum alaşımı, 466 °C'de 1 saat çözeltiye alma ısısal işlemine tabi tutulmuş ve ardından su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, -196 °C, -120 °C, -60 °C ve 0 °C sıcaklıklarında 2 saatlik kriyojenik işlemler uygulanmıştır.

Bu işlemleri takiben, kademeli olarak 107 °C’de 7 saat ve 163 °C’de 18 saat yapay yaşlandırma süreçleri gerçekleştirilmiştir. Alaşımın mikro yapısı, artık gerilimi ve boyutsal stabilitesi, optik mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM), X-ışını difraktometresi ve X-ışını stres ölçüm cihazı kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kriyojenik işlemin kaba ikincil fazların Al matrisinde çözünmesini kolaylaştırdığını; Mg, Cu ve Zn elementlerinin daha homojen dağılımını desteklediğini ve 7075 alaşımında ince ikincil fazların yoğunluğunu artırdığını göstermiştir. Ayrıca, kriyojenik işlemin, yeniden kristalleşme süreçleri yoluyla Al tane yapısının (2 0 0) düzlemine dönmesini teşvik edebileceği ileri sürülmüştür. Kriyojenik işlem sonrasında kalıntı gerilimlerin azaldığı ve alaşımda boyutsal kararlılığın arttığı belirlenmiştir. Deneysel veriler doğrultusunda, 7075 alüminyum alaşımı için en uygun kriyojenik işlem sıcaklığının -120 °C olduğu tespit edilmiştir.

Chatha vd. (2016), nanoakışkan katkılı MMY koşulları altında AA 6063 alaşımının delinmesinde işleme performansını değerlendiren çalışmalarında, kuru ve petrol bazlı kesme sıvısı kullanılarak yapılan işlemlerle karşılaştırıldığında, MMY koşullarında yüzey kalitesinin daha üstün olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, iş parçası-takım arayüzeyinde daha etkili yağlama ve soğutmanın sağlanması sonucu matkapta talaş yapışmasının ve buna bağlı olarak BUE azaldığı vurgulanmıştır. Kesme hızı (30 m/dak) ve ilerleme hızı (60 mm/dak) parametrelerinde yapılan deneylerde, yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) kuru işleme kıyasla MMY destekli uygulamalarda anlamlı derecede daha düşük bulunmuştur. Bu farklılığın, kuru işlemde takım ucunda oluşan yüksek sıcaklık ve gerilmelere bağlı olarak meydana gelen talaş yapışması nedeniyle ortaya çıktığı ifade edilmiştir.

Braga vd. (2002), yaptıkları çalışmada, alüminyum-silisyum alaşımlarında kaplamasız karbür ve elmas kaplamalı karbür takımlar kullanılarak gerçekleştirilen delme işlemlerinde, MMY tekniği geleneksel soğutma yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları, takım üzerine etki eden kuvvet, delik kalitesi ve takım aşınması açısından delik delme performansını en çok etkileyen parametrenin soğutma yöntemi olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, hem kaplamalı hem de kaplamasız takımlarda MMY ve geleneksel soğutma tekniklerinin işleme performansı bakımından birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Rahman vd. (2002), yaptıkları çalışmada, 35 HRC sertliğe sahip ASSAB 718HH malzemesinin kaplamasız karbür uçlarla frezelenmesinde kuru kesme, MMY ve

geleneksel soğutma teknikleri uygulanmıştır. MMY yönteminde kesme sıvısı akış hızı 8,5 ml/s olarak belirlenirken, geleneksel soğutma yönteminde bu değer 42 l/dak olarak uygulanmıştır. Kuru kesme koşullarında kesici takımda meydana gelen aşınma ve geleneksel soğutma yönteminde oluşan takım çatlaklarının aksine, MMY yönteminin takım ömrünü olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Yazarlar, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, talaş biçimi ve EDX analiz sonuçlarına dayanarak, MMY yönteminin düşük kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametrelerinde ekonomik ve çevre dostu bir teknik olduğunu belirtmişlerdir.

Sreejith (2008), yaptığı çalışmada, elmas kaplamalı karbür takımlar kullanılarak AA6061 alüminyum alaşımının işlenmesinde farklı kesme sıvısı uygulamaları incelenmiştir. Yazar, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması kriterlerini dikkate alarak kuru kesme, MMY ve geleneksel soğutma tekniklerini analiz etmiş ve bu üç farklı soğutma yöntemini karşılaştırmıştır. Deneyler sonucunda, MMY tekniğinin geleneksel soğutma yöntemine alternatif olabileceği belirlenmiş ve uygun şekilde uygulandığında geleneksel soğutma yönteminin yerini alabileceği ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular ışığında, MMY yönteminin sadece çevre dostu olması nedeniyle değil, aynı zamanda işleme performansını artırması nedeniyle de tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Nouari vd. (2005), Al 2024 malzemesinin kuru koşullarda delinmesinde, delik çapı sapması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme hızı ile kaplama malzemesine bağlı aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Deneyler, üç farklı kesme hızı seviyesinde (25, 65 ve 165 m/dak) ve sabit diş başı ilerleme miktarı (0,04 mm/diş) parametresinde gerçekleştirilmiştir. Kesici takım olarak kaplamalı ve kaplamasız tungsten karbür ile kaplamasız HSS matkaplar tercih edilmiştir. Delik çapı sapması ve yüzey pürüzlülüğü açısından en başarılı sonuçlar tungsten karbür matkaplarla elde edilmiştir. Ayrıca, kaplamasız tungsten karbür matkaplar kullanılarak yapılan kuru delme işlemlerinde düşük kesme hızlarının daha uygun olduğu; buna karşın, kesme hızı ne olursa olsun HSS matkapların Al 2024 alaşımının kuru delinmesi için uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Zhu vd. (2024), yaptıkları çalışmada Al 2024 T351 alaşımına, üç farklı soğutma koşulu altında (kuru, hava ve MMY) delik delme işlemleri uygulanmıştır. Bu koşullar, sıcaklık ve ilerleme kuvveti açısından karşılaştırılmıştır. Kesme hızı seviyeleri 60, 80, 100 ve 120 m/dak; diş başı ilerleme miktarları ise 0,2, 0,3, 0,4 ve 0,5 mm/diş olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sıcaklığın kesme hızına kıyasla diş başı ilerleme

miktarından daha fazla etkilendiğini göstermiştir. MMY soğutma tekniği kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, matkap üzerindeki sıcaklık farklarının kuru ve hava soğutma koşullarına göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, ilerleme kuvveti ve sıcaklık açısından en iyi takım performansının hava soğutma tekniğinde elde edildiği ifade edilmiştir.

Kuan-Ming ve Shih-Yen (2010), yaptıkları araştırmada, MMY yönteminin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada özellikle kesici takım malzemesi, kesme sıvısı (yağ) debisi ve hava debisinin MMY tekniği ile işleme sırasında takım performansına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, MMY tekniği ile yapılan mikro frezeleme işlemlerinde, kuru kesme koşullarına kıyasla takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünde önemli iyileşmelerin sağlandığını ortaya koymuştur. Ayrıca, mikro frezeleme sırasında yüzey pürüzlülüğünün, takım aşınma koşullarıyla yakından ilişkili olduğu belirlenmiştir. Optimum MMY parametreleri olarak, kesme sıvısı debisi 1,88 ml/h ve hava debisi 40 l/dak tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, MMY performansına katkı açısından hava debisinin, kesme sıvısı debisine kıyasla daha kritik bir rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Akben ve Erten (2009), yaptıkları çalışmada, çelik malzemelerde ince delik işleme süreçlerinde TiAlN kaplamalı karbür takımlar kullanılarak, geleneksel soğutma ve MMY yöntemlerinin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, kesici uç için firmanın önerdiği kesme hızı aralığında MMY uygulamasının, geleneksel soğutmaya kıyasla daha iyi yüzey kalitesi ve daha uzun takım ömrü sağladığı gözlemlenmiştir.

Erden vd. (2023), yaptıkları çalışmada, kesme bölgesine soğutucu akışkanın iletilmesiyle yağlama fonksiyonunun artması sonucunda, kesici takım ile talaş arasındaki sürtünmenin azaldığı ve bunun yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde olumlu etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Öndin vd. (2020), bu durumu MMY tekniğinde kullanılan uçucu yağlayıcıların takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak daha etkili bir film tabaka oluşturması ile açıklamışlardır. Benzer bir çalışmada, Abas vd. (2020), MMY soğutma sistemi kullanılarak gerçekleştirilen AA6026-T9 alaşımının tornalanması çalışmasında, yüzey kalitesinde %30'a varan oranda iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir.

Sen vd. (2021), MMY teknolojisinin uygulanmasının, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve takım aşınması gibi işleme performans parametrelerini minimize ettiği belirtilmiştir. Ayrıca, hava basıncı, hava-yağ karışımı oranı, nozul sayısı,

nozul mesafesi ve nozul açısı gibi kritik MMY parametrelerinin işleme performansı üzerinde kayda değer etkiler yarattığı vurgulanmıştır. Bunun yanı sıra, MMY uygulamasının performansının, kullanılan takım malzemesi, takım kaplaması ve iş parçası malzemesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ifade edilmiştir.

Yücel vd. (2021), Al 2024 T3 alaşımının tornalanması işleminde, MOS_2 bazlı nanoakışkan içeren MMY soğutma tekniği kullanılmıştır. Bu soğutma yönteminin yüzey pürüzlülüğü, maksimum sıcaklık ve takım aşınmasına etkileri, kuru işleme ve nanoakışkansız MMY teknikleri ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, MOS_2 bazlı nanoakışkanlı MMY yönteminin, hem kuru işleme hem de nanoakışkansız MMY uygulamasına kıyasla daha düşük takım aşınması sağladığını göstermiştir.



3. GENEL BİLGİLER

3.1. Alüminyum Genel Özellikleri

Al sembolüyle gösterilen, dünyada oksijen ve silikondan sonraki en yaygın üçüncü kimyasal element olan alüminyum, çelikten sonra en çok tercih edilen metaldir. Saf olan alüminyum elementine çeşitli elementler eklenerek alüminyum alaşımları elde edilir. Alüminyum ve alaşımları inşaat, endüstriyel alanlar, ulaşım, savunma ve havacılık, elektrik ve elektronik sektöründe kullanılan metallerdir. Yumuşak ve hafif olması, dayanıklı yapısı ve iyi bir iletken olmasından dolayı dünyada en çok kullanılan metaldir.

Alüminyum periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan, metalik esaslı ve atom numarası 13 olan bir elementtir. Yoğunluk değeri 2,7 g/cm³, atom çapı 1,43 Å, atom ağırlığı 26,97'dir. Gümüş renkli ve sünek yapıda bir metal olup, dünyada boksit cevheri olarak bulunur. Boksit, esasında hidratlı alüminyum oksit (Al₂O₃) bileşiğidir. Alüminyum elementinin üretimindeki başlıca mineraldir (Davis, 1993). Alüminyum alaşımlarının çeşit ve özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir (Schweitzer, 2003).

Tablo 3. 1. Alüminyum alaşımlarının çeşit ve özellikleri

Tanımlar	Alaşım Elementi	Bilgiler
1xxx	%99 yada daha fazla saf alüminyum içerir.	1000 serili Al, korozyon direnci, ısı ve elektrik iletkenliğinin iyi olması kimya ve elektrik endüstrilerinde tercih edilir
2xxx	Bakır bazlı alaşımlar	Bakır bazlı alaşımlar mukavemeti yüksek ve iyi işlenebilirliği ile bilinir. Uçak gövde sanayisinde kullanılır.
3xxx	Manganez	Genelde eloksallama ve kaynak işlemleri için kullanılır. Isıl işlemleri görmez.
4xxx	Silisyum	Alüminyumun malzemelerin birleştirilmesi amacıyla kaynak telleri ve lehimleme işlemlerinde kullanılır.
5xxx	Magnezyum	Korozyon direncinin yüksek ve kaliteli kaynak yapılabilirlik avantajlarını sunar. Araç panelleri, maden kafesleri, deniz suyuna maruz kalan yapılarda kullanılır.
6xxx	Magnezyum ve silisyum	Mukavemet açısından iyi ve işlenebilirlik konusunda mükemmeldir. Mimari ekstrüzyonlar (dış ve iç) pencere çerçeveleri ve sulama borularında kullanılır
7xxx	Çinko	Mukavemet özelliği en yüksek olan alaşımlardır. Motosiklet, zırhlı araçlar, askeri köprülerde kullanılır.
8xxx	Diğer Elementler	Diğer elementlerle yapılan özel alaşımlardır. Alüminyum folyoların üretiminde 8006 alaşımı, tercih edilir.

Alüminyumun ısı ve elektriği iyi iletmesi ve ağırlık olarak bakırın hemen hemen iki katıdır. Bu nedenle, büyük güç iletim hatlarında alüminyumun elementi en çok kullanılan malzemelerden biridir. Buna benzer avantajlar alüminyum ve alaşımlarının gemi, otomobil, uçak, ve elektrik iletim kablolarında yoğun kullanım imkanı tanımıştır (Bajaj, 2008).

3.1.1. 7XXX serisi alaşımlar

7xxx serisinde ana alaşım elementi olarak çinko (Zn) öne çıkmaktadır. Alüminyuma eklenen alaşım elementlerinin temel amacı, süneklik ve korozyon direnci gibi mekanik ve kimyasal özellikleri olumsuz etkilemeden, alüminyumun düşük akma dayanımını artırmaktır. Çinko, bu alaşım grubunda %1 ile %8 arasında değişen oranlarda bulunur. Alüminyuma ilave edilen temel çöktürler, $MgZn_2$ intermetalik bileşiğinden meydana gelmektedir. Genellikle mukavemeti artırmak amacıyla magnezyum (Mg), bakır (Cu) ve düşük oranlarda mangan (Mn) ile krom (Cr) elementi de bu alaşıma dahil edilmektedir. Çinko ve magnezyumun alüminyum içindeki yüksek çözünürlüğü, yoğun çöktürlerin oluşumuna katkıda bulunarak dayanımın önemli ölçüde yükselmesini sağlamaktadır. Bu seride en dikkat çeken alaşım 7075 olup, bileşiminde %5,6 çinko, %2,5 magnezyum, %1,6 bakır ve %0,25 krom içermektedir. 7075-T6 alaşımı, 504 MPa seviyesinde bir çekme dayanımına sahiptir. Bu alaşım grubu, yüksek mukavemet gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın şekilde tercih edilmektedir. Alaşımlarda "T" harfi, uygulanan kararlı temperleme işlemini ifade etmekte olup, bu harften sonra gelen 1 ile 10 arasındaki sayılar, ilgili temper türünü göstermektedir. 7075 serisi, yüksek gerilim altındaki üstün mekanik özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sanayinde kritik bir yapısal malzeme olarak kullanılmaktadır (Yakut, 2009).

%5,5 Zn - %2,5 Mn - %1,5 Cu - %0,3 Cr bileşimine sahip alaşımlar, yüksek mekanik mukavemet ve üstün korozyon direnci gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle havacılık sektöründe, uçak yapı elemanlarının büyük bir kısmı 7075 serisi alaşımlardan üretilmektedir. Bu alaşımın 20°C'deki yoğunluğu 2,80 g/cm³ olup, kayma modülü 14,927 N/cm² olarak ölçülmüştür. Ayrıca, Poisson oranı 0,33'tür. Kesme gerilmesi mukavemeti, çekme gerilmesi mukavemetinin yaklaşık %55'ine tekabül etmektedir. Termal işlenebilirliği oldukça geniş bir aralığa sahiptir ve 260–455°C sıcaklık değerleri arasında sıcak işlem uygulanabilmektedir. Tam tavlama işlemi, 413°C'de 2 ila 3 saat boyunca bekletilerek

gerçekleştirildikten sonra havada soğutma yöntemi ile tamamlanmaktadır. Eğer malzeme uzun süre depolanacaksa, kullanılmadan önce 232°C’de bir yeniden ısıtma işlemine tabi tutulması önerilmektedir. Çinko-magnezyum esaslı alaşımlar, mekanik özellikleri açısından en yüksek mukavemete sahip malzemeler arasında yer almakta olup, bu özelliklerinden ötürü İkinci Dünya Savaşı sırasında hava kuvvetleri için özel olarak geliştirilmiştir. Kimyasal bileşimleri itibarıyla %8’e kadar çinko, %4 magnezyum, %3 bakır ve eser miktarda krom, titanyum, manganez veya nikel içerebilmektedirler. Yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu ve korozyon direnci sayesinde, havacılık, gemi inşası, otomotiv sanayisi ve askeri donanım gibi kritik mühendislik alanlarında önemli bir yapısal malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Yakut, 2009).

7075 alüminyum alaşımı, dövme alüminyum alaşımları arasında en yüksek mukavemete sahip olanlardan biridir. Ancak, farklı alüminyum serileri ile kıyaslandığında korozyon direnci daha düşük seviyededir. Bununla birlikte, uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmesi, korozyon direncinin ikincil bir faktör olarak değerlendirilmesine neden olmaktadır. Bu dezavantajı gidermek amacıyla, literatürde çeşitli kaplama yöntemleri geliştirilmiş olup, belirli uygulamalarda kaplamalı 7075 alaşımı tercih edilebilmektedir. Al7075 alaşımı, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı ile öne çıkmakta ve bu özelliği sayesinde yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanım imkânı sunmaktadır. Sektörel kullanımlarda, farklı amaçlara yönelik çeşitli ısıtma işlemleri uygulanabilmektedir. Bu işlemler arasında en yaygın olarak kullanılanlar 7075-T4, 7075-T6, 7075-T651 ve 7075-T73 ısıtma işlem türleridir (Altuntaş, 2024).

T4 (Çözeltiye Alma + Doğal Yaşlandırma): Alaşım, yaklaşık 470–480 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen bir çözeltiye alma işlemiyle ısıtma işlemine tabi tutulur. Bu aşamanın ardından malzeme, özelliklerini koruyacak şekilde hızlı bir biçimde su verilerek soğutulur. Sonrasında, oda sıcaklığında gerçekleştirilen doğal yaşlandırma süreciyle mikroyapısal kararlılık ve mekanik özellikler geliştirilmektedir. Bu işlem sonrası elde edilen alaşım orta düzeyde bir dayanım sergilemekte, buna karşılık yüksek süneklik özelliği sayesinde kolay şekillendirilebilirlik göstermektedir. Bu tür malzemeler, genellikle şekil verme işlemlerinin ardından yeniden ısıtma işlemi uygulanacak durumlarda tercih edilmektedir. Özellikle dövme öncesi şekil verilecek parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

T6 (Çözeltiye Alma + Suni Yaşlandırma): Alaşım, yaklaşık 475 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen çözeltiye alma işlemiyle ısıtma işlemine tabi tutulur. Ardından, malzemenin

mikroyapısal özelliklerini korumak amacıyla hızlı bir şekilde su verilerek soğutma uygulanır. Bu işlem sonrasında, yaklaşık 120 °C sıcaklıkta birkaç saat süresince gerçekleştirilen kontrollü suni yaşlandırma ile istenen mekanik özelliklerin ve çökeltme sertleşmesinin elde edilmesi sağlanır. Yapılan ısı işlem sonrasında alaşım maksimum mekanik mukavemete ulaşmakta; 7075 serisi için çekme dayanımı yaklaşık 570 MPa seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Ancak bu durum, sünekliğin azalmasına ve özellikle gerilme korozyonu çatlağına karşı direncin düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle söz konusu temper durumu, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda örneğin havacılık bileşenleri, uçak gövdesi yapıları, bisiklet kadroları ve savunma sanayii parçaları gibi yaygın olarak tercih edilmektedir.

T651 (T6 + Gerilim-Stres Giderme): T6 temper işlemi, çözeltiye alma ve ardından gerçekleştirilen suni yaşlandırma aşamalarından oluşmaktadır. Bu işlem sonrasında, malzeme üzerindeki artık gerilmelerin azaltılması amacıyla mekanik gerilim giderme uygulanır. Bu amaçla genellikle malzeme, yaklaşık %1–3 oranında kontrollü bir gerdirme işlemine tabi tutulur. Bu adım, hem boyutsal kararlılığı artırmakta hem de gerilme korozyonuna karşı direncin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu işlemdeki alaşım T6 temperine benzer düzeyde yüksek dayanım göstermektedir. Uygulanan gerilim giderme işlemi ile artık gerilmeler önemli ölçüde azaltılmış, dolayısıyla boyutsal kararlılık artırılmış ve işleme sonrası oluşabilecek deformasyonlar en aza indirilmiştir. Bundan dolayı, söz konusu temper durumu özellikle plaka, blok ve işlenmiş parça üretimlerinde tercih edilmektedir. (URL-1, URL-2) Al 7075 malzemesinin ısı işleme göre mekanik özellikleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir. URL-3

Tablo 3. 2. Al 7075 ısı işlem türüne göre mekanik özellikleri

Özellik	T4	T6	T651
Çekme Dayanımı (MPa)	~430	~570	~560
Akma Dayanımı (MPa)	~240	~500	~495
Uzama (%)	~13	~11	~11
Sertlik (HB)	~120	~150	~150
Artık Gerilme	Yüksek	Yüksek	Düşük

Al7075 alaşımının, yüksek dayanımı ve hafiflik gibi üstün mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle birçok mühendislik uygulaması için ideal bir malzemedir. Özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Starke ve Staley, 1996).

Avantajlarına bakılacak olunursa;

Hafiflik: Düşük yoğunlukları sayesinde Alüminyum alaşımları, hafif yapısal malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Alüminyumun yoğunluğu yaklaşık $2,7 \text{ g/cm}^3$ olup, bu değer çelik gibi metallerin yaklaşık $7,85 \text{ g/cm}^3$ olan yoğunluğuna kıyasla önemli ölçüde daha düşüktür (Starke ve Staley, 1996). Bu düşük yoğunluk özelliği, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yakıt verimliliğini artırma ve taşıma maliyetlerini azaltma açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Hafif malzemelerin kullanımı, enerji tüketimini düşürerek hem operasyonel verimliliği artırmakta hem de çevresel etkileri minimize etmeye katkıda bulunmaktadır (Davis, 1993).

Yüksek Mukavemet: Alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet ve ağırlık oranlarıyla öne çıkan mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Alaşımlandırma ve uygun ısıtma işlem süreçleri ile mekanik mukavemetleri önemli ölçüde artırılabilir. Örneğin, 7075-T6 alüminyum alaşımı, üstün mukavemet ve dayanıklılık özellikleri sayesinde havacılık endüstrisinde yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir (Hatch, 1984).

Korozyon Direnci: Alüminyum, yüzeyinde kendiliğinden oluşan ince oksit tabakası sayesinde korozyona karşı yüksek direnç göstermektedir. Bu doğal oksit tabakası, alüminyumun paslanmasını önleyerek uzun ömürlü ve dayanıklı bir malzeme olmasını sağlamaktadır. Bu özelliği nedeniyle alüminyum, özellikle denizcilik, inşaat ve otomotiv gibi korozyon direncinin kritik olduğu sektörlerde yaygın olarak tercih edilmektedir (Degarmo vd., 2011).

İyi İşlenebilirlik: Alüminyum alaşımları, yüksek şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik ve kaynak yapılabilirlik özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu üstün işlenebilirlik, alüminyum alaşımlarının çeşitli üretim süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle 6061-T6 alüminyum alaşımı, mükemmel işlenebilirlik ve kaynak yapılabilirlik özellikleri ile öne çıkmakta olup, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Totten vd., 2003).

Yüksek Isı ve Elektrik İletkenliği: Alüminyum, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği ile dikkat çeken bir metaldir. Elektrik iletkenliği açısından değerlendirildiğinde, bakırdan sonra en yüksek iletkenliğe sahip metaller arasında yer almaktadır. Bu özelliği nedeniyle, elektrik iletim hatlarında ve ısı eşanjörlerinde yaygın olarak tercih edilir (Murray, 1984).

Geri Dönüştürülebilirlik: Alüminyum, kapalı döngü geri dönüşüm süreçleri sayesinde sürdürülebilir bir şekilde tekrar kullanılabilen bir malzemedir. Bu geri

dönüşüm süreci, enerji tüketimini ve karbon ayak izini önemli ölçüde azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş alüminyumun işlenmesi, birincil alüminyum üretimine kıyasla yaklaşık %95 daha az enerji gerektirdiğinden, ekonomik ve ekolojik açıdan büyük bir avantaj sunmaktadır (Luo ve Sachdev, 2014).

Dezavantajlarına bakılacak olunursa;

Yüksek Maliyet: Yüksek performansa sahip alaşımlar ve alaşım elementleri ile zenginleştirilmiş alüminyum, maliyet açısından daha yüksek olabilir. Özellikle yüksek saflıkta alüminyum ve özel alaşımların üretim ve işleme süreçleri, ileri teknoloji ve enerji gerektirdiğinden, üretim maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle, belirli uygulamalarda maliyet-etkinlik analizi önemli bir faktör olarak değerlendirilmelidir (Degarmo vd., 2011).

Düşük Yüksek Sıcaklık Mukavemeti: Alüminyum alaşımları, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında mekanik mukavemetlerini kaybedebilmekte olup, bu durum belirli mühendislik uygulamalarında kullanımını kısıtlamaktadır. Özellikle motor parçaları ve egzoz sistemleri gibi sürekli yüksek sıcaklıklara maruz kalan bileşenlerde, alüminyumun termal stabilitesinin yetersiz olması nedeniyle alternatif malzemeler tercih edilebilmektedir (Zolotarevsky vd., 2007).

Anodik Paslanma: Alüminyum alaşımları, belirli ortamlarda, özellikle farklı metallerle temas halinde olduklarında, galvanik korozyon riski taşımaktadır. Bu tür korozyon, alüminyumun farklı bir metal ile elektrokimyasal reaksiyona girmesi sonucu meydana gelmekte olup, özellikle denizcilik ve kimya endüstrilerinde ciddi bir problem teşkil edebilmektedir. Galvanik korozyonu önlemek amacıyla uygun yalıtım yöntemleri, koruyucu kaplamalar ve katodik koruma gibi önlemler alınması gerekmektedir. Alüminyum alaşımlarının mühendislik ve endüstriyel uygulamadaki kullanımı, sahip olduğu avantajlar ve dezavantajlar çerçevesinde değerlendirilmektedir. Hafiflik, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajları sayesinde geniş bir kullanım alanı bulurken, yüksek sıcaklıklardaki mukavemet kaybı ve galvanik korozyon riski gibi dezavantajları nedeniyle bazı özel uygulamalarda sınırlamalarla karşılaşabilmektedir. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarının belirli mühendislik uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılması için malzeme seçimi ve koruyucu önlemler büyük önem taşımaktadır (Mondolfo, 1976).

3.2. Talaşlı İmalatta Delik Delme İşlemleri

3.2.1. Kesici takımlar

Kesici takımlar, iş parçalarının şekillendirilmesinde kullanılan, yüksek kaliteli ve yüksek boyutsal hassasiyete sahip ileri teknoloji ürünü malzemelerden üretilmektedir. İşlenecek malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri, tercih edilebilecek kesici takım malzemeleri üzerinde belirleyici bir rol oynamakta olup, aynı zamanda takımın çalışma koşulları da uygun malzeme seçimini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, kesici takım malzemeleri, hem işleme verimliliğini artırmak hem de takım ömrünü optimize etmek amacıyla dikkatle seçilmelidir (Özdemir vd., 2000).

20. yüzyılın başlarından itibaren bilinen ve sürekli geliştirilen kesici takım grubudur. Diğer takım malzemelerine kıyasla daha düşük maliyetli olması ve kolay işlenebilmesi nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu özellikleri, söz konusu kesici takım malzemesini hem genel imalat süreçlerinde hem de çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli bir seçenek haline getirmiştir (Özdemir vd., 2000).

Yüksek hız çelikleri, birçok uygulamada yerini, toz metalürjisi tekniğiyle üretilen, daha yüksek kesme hızlarına olanak tanıyan ve aşınma dirençleri çok daha yüksek olan sert metallere yerini bırakmıştır. Ancak, yüksek hız çelikleri, sahip oldukları yüksek tokluk değerleri sayesinde belirli talaşlı imalat yöntemlerinde hala önemini korumaktadır. Bu çelikler, özellikle helisel matkaplar, azdırma çakıları, kılavuzlar ve parmak frezeler gibi kesici takım malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Trent vd., 2000, ve Şahin 2001).

3.2.1.1. Kaplamasız HSS matkap uçları

Yüksek hız çeliği (HSS) olarak tanımlanan HSS matkap uçları, sıcak haddeleme teknolojisi ile üretilmektedir. Yüksek burulma momenti ve elastikiyet özellikleri sayesinde düşük alaşımlı çelikler, döküm malzemeler, metaller ve metal olmayan malzemelerin talaşlı imalat ve delme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek hız çelikleri, yüksek kesme hızları ve parametreleri altında dahi iş parçası üzerinden etkin bir şekilde talaş kaldırabilme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca, işleme sürecinde ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara karşı sertliğini büyük ölçüde muhafaza edebilen malzemeler arasında yer almaktadır.

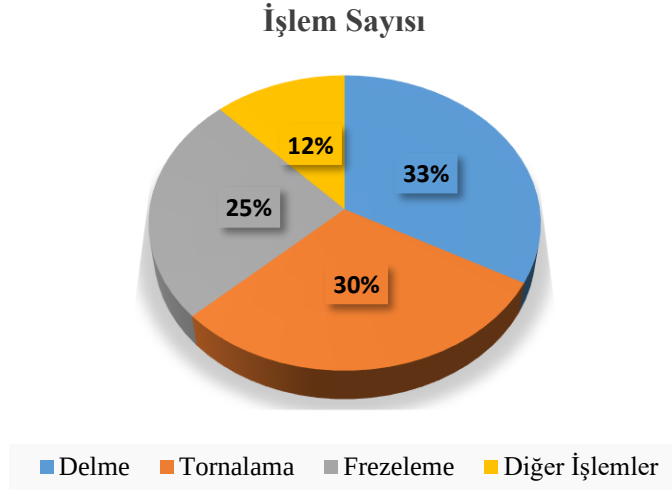
3.2.1.2. PVD kaplamalı matkap uçları

Talaşlı imalat süreçlerinde karşılaşılan olumsuzlukların giderilmesi, ortaya çıkan ısısının kesici takım ve iş parçasından etkin biçimde uzaklaştırılması ve buna bağlı olarak takım ömrünün artırılması hususunda yalnızca soğutucu akışkanların kullanımı yeterli bir çözüm olarak değerlendirilemez. Bu bağlamda, takım ömrünü doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biri de kesici takımlarda uygulanan kaplama teknolojileridir.

Kaplamalı kesici takımlarda kaplama malzemesi katı haldeyken termal bir ısı kaynağı aracılığıyla vakum altında buharlaştırılmakta veya atomik hale getirilerek altlık malzeme yüzeyinde biriktirilmektedir. Bu süreç, oldukça keskin profile sahip takımlar da dahil olmak üzere, hemen her tür katı malzeme üzerine çeşitli kaplamaların uygulanmasına imkan tanımaktadır. Makine mühendisliği alanında yaygın olarak yüksek hız çeliklerinin kaplanması için kullanılan PVD tekniğinin patenti 50 yıl önce alınmış olmasına rağmen, tribolojik amaçlı seramik kaplamaların bu yöntemle üretilmesi son yıllarda artış göstermiştir. Özellikle plazma destekli PVD türlerinin gelişimi sayesinde yüzeye güçlü bir şekilde yapışan, yüksek sertlikte ve yoğun seramik kaplamalar elde edilebilmektedir. Günümüzde, ticari olarak TiCN, CrN, WCC, ZrN gibi sert kaplamaların yanı sıra elmas benzeri karbon kaplamalar da bu teknikle üretilmektedir. Kaplamaların daha da geliştirilmesi amacıyla, yeni nesil sert seramik kaplamalar (AlN, TiNbN, TiCrN, TiAlCN, Al₂O₃ ve elmas) ile çok katmanlı kaplamalar (TiN-TiAlN, TiAlN-AlN, süperkafes kaplamalar) üretilmiştir (Yiğit, 2004).

3.2.2. Delik delme işlemleri

Delme işlemi, imalat endüstrisinde en kritik üretim süreçlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bir imalat sürecinde gerçekleştirilen delik delme işlemi, toplam talaş kaldırma tekniklerinin yaklaşık %33'ünü oluşturmaktadır. Bu oran, delme işleminin üretim süreçlerindeki önemini açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 3.1'de delme işleminin talaş kaldırma yöntemleri arasındaki yerini ve önemini görsel olarak detaylandırmaktadır (Tönshoff vd., 1994).

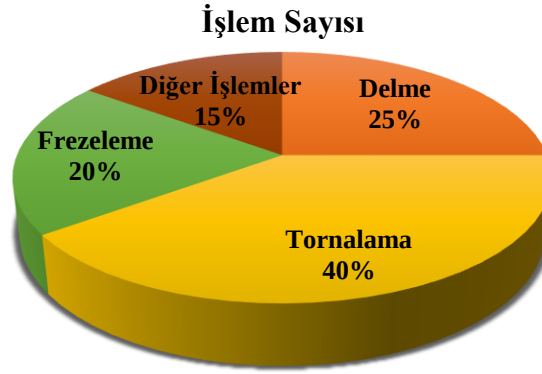


Şekil 3. 1. Talaşlı imalat işlem sayılarına göre delmenin diğer talaş kaldırma işlemlerine göre oranı

Delme işlemi, kesici takım ile iş parçası arasında gerçekleşen bağıl hareket sonucunda talaş kaldırarak gerçekleştirilen bir imalat sürecidir. Bu işlem sırasında, matkap, iş parçası veya her ikisi birden dönebilir. Delme işlemi hızlı ve ekonomik bir yöntem olmakla birlikte, kesme hareketi açısından zor ve verimsizdir. Delme sırasında talaş çıkışı ve kesme sıvısının akışı sınırlı olduğundan, bu yöntem diğer talaşlı imalat süreçlerine kıyasla daha zordur. Talaş oluşumu kapalı bir alanda gerçekleştiği için gözlemlenemez. Ayrıca, takım ile iş parçası arasındaki sürtünme kritik bir faktördür. İşlem sırasında yüzeyden yayılan sıcaklığın yetersiz olması ve dönme ekseninde kesici ağız boyunca kesme hızının sıfır olması, delme işleminin temel zorluklarından biridir. Genel olarak, tüm delme takımları için ortak bir problem, kesme hızının merkezde sıfır, çevrede ise maksimum olmasıdır. Bu nedenle, matkap ve işleme süreci, tezgah ve iş parçasına uygun şekilde adapte edilmeli, delik kalitesi sağlanmalı ve gerekli işlem doğruluğu oluşturulmalıdır. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, farklı takım geometrileri ve takım malzemeleri geliştirilmiştir (Yakut, 2009).

Frezeleme ve tornalama işlemleri, delik delme işlemleri ile kıyaslandığında, bu imalat yöntemlerinin yörünge, hız, ivme ve dinamik yapıları açısından benzerlik gösterdiği; ayrıca talaş akışı ve kesme sıcaklığının dağılımının da benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, delik delme işlemi kapalı bir ortamda gerçekleştiğinden, talaş oluşum sürecinin doğrudan gözlemlenememesi çeşitli olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Delme işleminde, iş parçası ile kesici takım arasındaki sürtünme kritik bir unsur olup, kesici takımdan yeterli miktarda ısıyı uzaklaştırılamaması temel

sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu problemlerin minimize edilmesi amacıyla, farklı takım geometrileri ve gelişmiş takım malzemeleri üzerine çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. İmalat süreçlerine ilişkin yapılan analizler, toplam talaş kaldırma süresinin yaklaşık %25'inin delik delme işlemlerine ayrıldığını ortaya koymaktadır. Talaş kaldırma süreleri Şekil 3.2'te gösterilmektedir (Tönshoff vd., 1994).



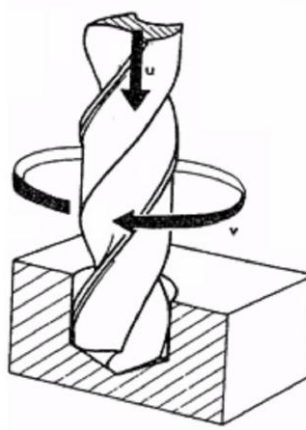
Şekil 3. 2. Delik delme işleminde geçen sürenin farklı talaş kaldırma işlemlerinde geçen süre ile kıyaslanması

Delik delme işlemleri, kesici bir takımın kendi eksen etrafında dönmesi ve aynı zamanda iş parçasına aksenal yönde ilerlemesi yoluyla talaş kaldırarak silindirik boşluklar oluşturmaktadır. Bu imalat yöntemi, farklı endüstrilerde ve çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Delme işlemleri, genellikle "matkap ucu" olarak adlandırılan kesici takımlar aracılığıyla gerçekleştirilmekte olup, farklı özelliklere sahip delme makineleri kullanılarak uygulanabilmektedir (Teodoriu vd., 2021).

Talaş akışını sınırlayan temel faktör, matkapta oluşan talaş kalınlığıdır. İşlem sırasında delik içerisinde biriken talaşların, işlenen yüzeye zarar vermeden ve kesme bölgesinden kolaylıkla uzaklaştırılabilecek bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle, uygun takım seçimi büyük önem taşımaktadır. Takım seçimi; delik derinliği, delik çapı, sağlanması gereken toleranslar, iş parçası malzemesi, üretim hacmi ve kullanılan tezgahın özellikleri gibi çeşitli parametreler doğrultusunda belirlenmelidir. Bu faktörlerin doğru şekilde değerlendirilmesi, delme işleminin verimliliğini ve işlenen yüzeyin kalitesini doğrudan etkilemektedir (Kutlu, 2008).

Delik delme işlemi, yalnızca matkap tezgahlarında değil, aynı zamanda torna tezgahlarında da gerçekleştirilebilmektedir. Matkap tezgahında yapılan delme işlemlerinde, iş parçası sabit tutulurken, kesici takım olarak kullanılan matkap, hem kendi eksen etrafında dönerek hem de aksenal yönde ilerleyerek talaş kaldırma işlemini

gerçekleştirir (Şahin, 2000). Delik delmede kesici takımın dönmesi ve ilerlemesi Şekil 3.3.'de gösterilmiştir (Akkurt, 1998).



Şekil 3. 3. Takım dönmesi (v), ilerlemesi (u)

Delik delme işleminin performans değerlendirmesi yapıldığında, işlem başarısı çeşitli kriterler üzerinden analiz edilebilir. Delik delme performansı; yüzey kalitesi, kesici takım ömrü, deliklerde ölçü ve şekil doğruluğu ile talaşın kaldırma verimliliği gibi temel faktörler doğrultusunda değerlendirilmektedir. Bu kriterleri doğrudan etkileyen unsurlar arasında matkap geometrisi ve malzemesi, işlenen malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri, kullanılan takım tezgahının yapısal özellikleri, kesme hızı ve ilerleme gibi işleme parametreleri yer almaktadır. Ayrıca, soğutma sıvısının kullanımı ve özellikleri, işlem sırasında takım aşınmasını, talaş tahliyesini ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir (Çakır 2009).

Delik delme işlemi, tam delik ve kör delik olmak üzere iki temel teknikle gerçekleştirilebilir. Delikler, farklı işleme stratejileri kullanılarak açılmakta olup, yaygın kullanılan yöntemler arasında sürekli delme, gagalama, bekleme yaparak delme ve kademeli delme gibi teknikler bulunmaktadır. Özellikle gagalama yöntemi, kesme kuvvetlerini azaltarak talaş tahliyesini kolaylaştırmakta ve böylece delik kalitesini artırmaktadır. Delik delme işlemi, yalnızca düz yüzeylerde değil, aynı zamanda düzensiz ve eğimli yüzeylerde de gerçekleştirilebilir. Bu gibi durumlarda, delik giriş ve çıkış noktalarında oluşabilecek olumsuzlukları önlemek amacıyla işleme sürecine ek parametreler dahil edilmektedir. Özellikle yüzey eğim açısı, iç ve dış bükey yüzeylerin yarıçapları gibi değişkenler, işlem parametreleri arasında dikkatle değerlendirilmelidir. Ayrıca, iş parçası üzerinde deliklerin kesişmesi, deliklerin çapraz konumda bulunması veya birden fazla parçanın istiflenerek delinmesi (istifleyerek delme) gibi özel durumlar da söz konusu olabilir. Aynı parça üzerinde birden fazla delik açılabilmekte olup, bu

delikler farklı eksenlerde veya farklı düzlemler üzerinde konumlandırılabilir. Bu tür karmaşık delme uygulamalarında optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi, hassasiyet ve yüzey kalitesinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (Teke, 2024).

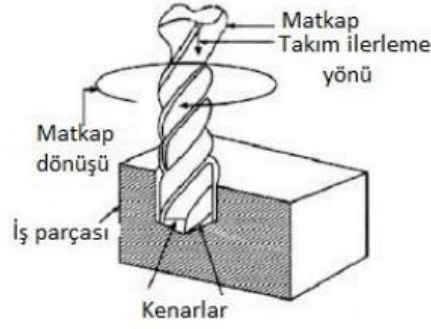
Freze tezgâhlarında küçük, orta ve büyük ölçekli parçalar üzerinde delik delme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. İşlenecek parçanın, tezgâh kapasitesine uygun olarak tezgâh tablasına güvenli bir şekilde bağlanması, işlem sırasında stabilite sağlanması açısından kritik bir faktördür. Delik delme işlemi sırasında, malzeme özellikleri ve delik parametreleri dikkate alınarak matkap ucu veya freze çakısı kullanılır. Freze tezgâhlarında yüksek kaliteli delik delme işlemi gerçekleştirebilmek için, tezgâhın genel kalitesi, iş parçasının doğru konumlandırılması, kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme oranı) uygun şekilde belirlenmesi gibi unsurlar titizlikle optimize edilmelidir. Bu koşullar sağlandığında, yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi elde edilerek verimli bir delik delme süreci gerçekleştirilebilir (Teke, 2024).

3.2.3. Delik delme işlemi parametreleri

Delik delme, talaş kaldırma yöntemlerinden biri olup, iş parçası üzerinde talaş kaldırarak belirli bir delik geometrisi oluşturma işlemidir. Bu süreçte, işleme performansını doğrudan etkileyen çeşitli ana parametreler bulunmaktadır. Bunlar;

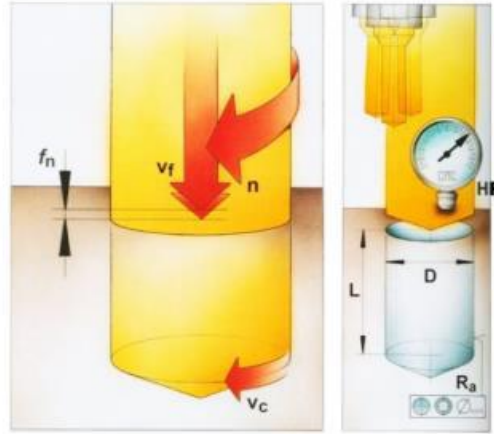
- Kesici takım
- İş parçası özellikleri
- Dönme ve ilerleme hareketleri,
- Kesici yüzeylerin tasarımı ve geometrisi

şeklinde sıralanabilir. Delik delme işleminde, matkap ucu iş parçasına belirli bir dönme hareketiyle ilerleyerek talaş kaldırır ve istenilen delik profili oluşturulur. Şekil 3.4'de, delme prosesi sırasında iş parçası ve matkapın durumu gösterilmektedir. (URL-4)



Şekil 3. 4. Delme prosesi şematik gösterimi.

Kesici takımın iş parçası üzerinden talaş kaldırabilmesi için malzemeye belirli bir kuvvet uygulanması gerekmektedir. Bu kuvvetin etkisiyle, kesici takım ve iş parçası arasında bir sürtünme oluşur ve kesme işlemi devam ettikçe talaş koparak delik oluşumu gerçekleşir. Bu bağlamda, delme işlemine ilişkin temel parametreler, Şekil 3.5'de görselleştirilmiştir (Sandvik, 2008).



Şekil 3. 5. Delik delmede ana parametreler

- f_n : İlerleme (mm/dev)
- V_c : Kesme hızı (m/dak)
- N : İş mili devri (dev/dak)
- V_f : İlerleme hızı (mm/dak)
- D : Delik işlem çapı (mm)
- L : Delik işlem boyu (mm)
- R_a : Delik yüzeyi
- K_c : Özgül kesme kuvveti (N)

Yukarıdaki veriler kullanılarak dönme sayısı olan iş milinin birim zamandaki devir sayısı aşağıda gösterilen formülle hesaplanır; Kesme hızı formülü Eşitlik 3.1’de verilmiştir.

Kesme hızı için:

$$V_c = \frac{D_c \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de gösterilen V_c kesme hızını (m/dak), D_c matkap çapını (mm), n iş mili devir sayısını (dev/dak) göstermektedir. İş mili devri formülü eşitlik 3.2’de gösterilmiştir.

İş mili devri için:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{D_c \cdot \pi} \quad [\text{m/dak}] \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de gösterilen “ n ” iş mili devir sayısını (dev/dak), “ V_c ” kesme hızını (m/dak), “ D_c ” matkap çapını (mm) göstermektedir.

3.2.4. Kesici takımların aşınması

Talaş oluşumu sürecinde, kesici takım yüzeyinde meydana gelen materyal kaybı farklı aşınma mekanizmalarıyla açıklanmaktadır. Bu aşınma türleri, takım ömrü ve işleme kalitesi açısından önemli olup, aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

Abrasyon: Kesme işlemi sırasında talaş ile takım yüzeyi arasındaki sürtünme sonucu takım yüzeyinden malzeme kaybı meydana gelir. Bu tür aşınma genellikle sert partiküllerin takım yüzeyini aşındırmasıyla oluşur.

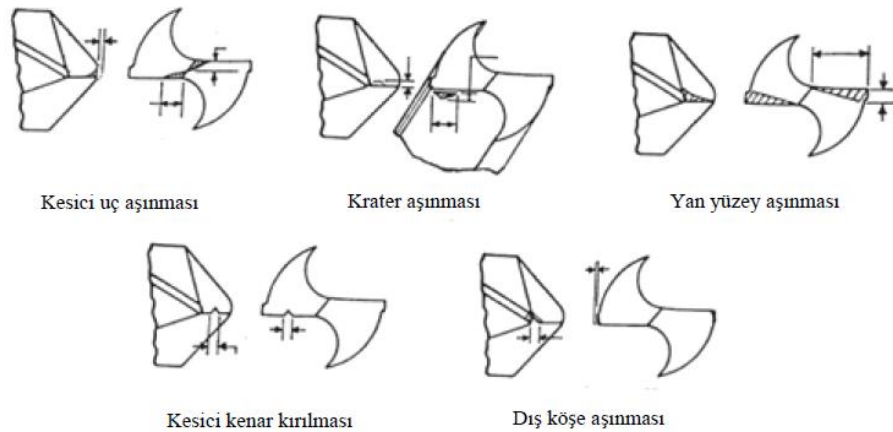
Adhezyon: İş parçası ile kesici takım arasındaki yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle malzemeler birbirine yapışır ve kopmalar meydana gelir. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklıklarda işlenen sünek metallerde yaygındır.

Difüzyon: Adhezyon aşınması sırasında, benzer kimyasal özelliklere sahip metaller arasında atomların karşılıklı yer değiştirmesiyle metal transferi oluşur. Bu süreç, takımın kesme kenarlarında malzeme kaybına neden olarak aşınmayı hızlandırır.

Metal Yorulması: Kesici takım ve iş parçası arasındaki tekrarlayan mekanik yükler sonucu, malzemenin mekanik özelliklerini kaybetmesiyle oluşan aşınmadır. Bu durum, özellikle uzun süreli kesme işlemlerinde ve değişken yük koşullarında görülmektedir (Ertunç ve Sevim, 2001).

Kesici takım aşınması, malzeme türü, ilerleme hızı, dönme hızı ve diğer işleme parametrelerine bağlı olarak farklı şekillerde ortaya çıkmaktadır. Aşınma tipleri, kesici takımın verimliliğini ve ömrünü doğrudan etkilediğinden, bu aşınmaların belirlenmesi ve izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Aşınma tiplerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden biri, sensör sinyalleri aracılığıyla takım aşınmasının izlenmesidir. Titreşim sinyalleri, ilerleme kuvveti, dönme momenti gibi sensör çıkışları, takım aşınmasının farklı türleri üzerinde belirleyici etkiler gösterir. Bu nedenle, aşınma tipi ile ilgili veriler, sensörlerden elde edilen sinyaller yardımıyla analiz edilebilir. Delme operasyonlarında kesici takım aşınmasını inceleyen araştırmacılar, dış köşe aşınmasının en belirgin ve etkili aşınma türü olduğunu ortaya koymuşlardır. Bunun başlıca nedeni, kesme kenarlarının en dış köşelerinde en yüksek kesme hızının meydana gelmesi ve dolayısıyla bu bölgelerde aşınmanın en fazla olmasıdır. Aşınma seviyesinin artmasıyla birlikte kesici kenardaki sürtünme artar, ortaya çıkan ısı enerjisi yükselir, malzeme yorgunluğu hızlanır ve nihayetinde, bu faktörlerin birleşmesiyle takımda ani kırılmalar meydana gelebilir (Ertunç ve Sevim, 2001).

Kesici takım aşınmaları, işleme sürecinde meydana gelen farklı aşınma mekanizmalarına bağlı olarak çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Kesici takım aşınma tipleri, takımın ömrünü ve işleme kalitesini doğrudan etkileyen kritik faktörlerden biridir. Bu aşınma türleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir (Abu-Mahfouz, 2003).



Şekil 3. 6. Matkapta aşınma türleri

A diagram of a parabolic arch. The horizontal span is labeled d . The height from the base to the peak is labeled $d/6$. The arch is shown as a dashed line, with a solid line representing the actual structure.

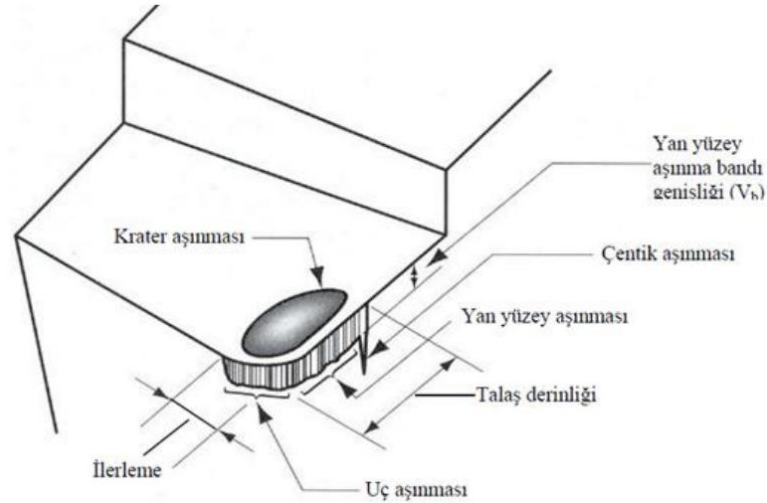
Aşınmış bir kesici takımında, kesici ucun keskin kenarı yerine sürtünmeye maruz kalan bir bölge oluşur. Bu bölgenin iş parçası ile temas etmesi sonucu daha fazla ısı enerjisi açığa çıkar ve kesme bölgesindeki sıcaklık yükselir. Sıcaklığın artması, kesici takımının aşınmasını hızlandırır.

Yüksek sıcaklık, iş parçasının yüzeyinde ve yüzey altı bölgelerinde istenmeyen metalurjik dönüşümlere yol açabilir. Bu dönüşümler, iş parçası yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşturarak yorulma dayanımının azalmasına neden olabilir. Kesici takımın

27

pürüzlülüğünü artırarak yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, kesici takımda meydana gelen küçük kırılmalar da yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olabilir. Talaşlı imalat sırasında oluşan titreşim, kesici takım üzerinde çevrimsel yükler meydana getirerek takımın kırılmasına yol açabilir. Şekil 3.8'da, kesici takımda oluşan aşınmalar şematik olarak gösterilmektedir. Talaş kaldırma sürecinde kesici takım aşınması, aşağıda belirtilen faktörlerden biri veya birkaçının aynı anda gözlemlenmesiyle tespit edilebilir (Zeqırı, 2018).

- Kesme kuvvetlerindeki aşırı yükselme,
- Sıcaklığın artışı,
- Aşırı miktarda titreşim,
- Yüksek oranda gürültü,
- İşlenen malzemenin boyutundaki değişim,
- İşlenen yüzeyin bozulması.



Şekil 3. 8. Kesici takımdaki aşınmaların şematik olarak gösterilmesi

3.2.5. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, delik delme işlemi sırasında elde edilen yüzeyin mikro ölçekteki düzensizliklerini ifade eder. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, iş parçası yüzeyinde istenmeyen dalgalanmalar ve çıkıntılar oluşturarak delik kalitesini ve parçanın genel performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Yüzey pürüzlülüğü, çeşitli değişkenlerden

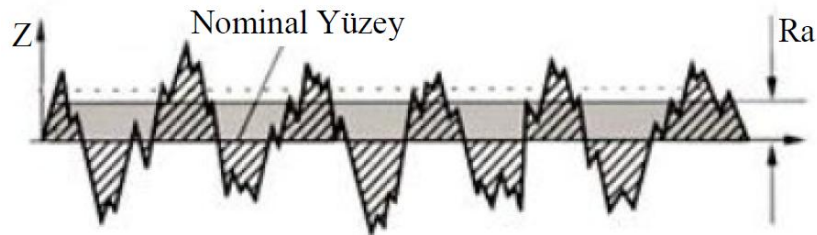
etkilenmekte olup, bu değişkenlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Özellikle kesme hızı ve ilerleme hızı, yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır (Özger, 2024).

Yüksek kesme hızları genellikle daha pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesini sağlar, çünkü bu hızlar daha keskin kesimler ve daha düşük titreşim seviyeleri ile sonuçlanır. Bununla birlikte, aşırı yüksek kesme hızları takım aşınmasını hızlandırarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olabilir. Öte yandan, düşük ilerleme hızları takımın iş parçası ile daha uzun süre temas etmesini sağlayarak daha düzgün bir yüzey oluşumuna katkıda bulunur. Ancak, çok düşük ilerleme hızları işlem süresinin uzamasına ve üretim verimliliğinin düşmesine yol açabilir (Lee, 2020 ve Evans, 2020).

Yüzey pürüzlülüğüne etki eden etmenler aşağıda belirtildiği gibi sıralanabilir (Kaplan, 2010).

- Kesme hızı
- İlerleme miktarı
- Talaşın derinliği
- Kesici takımın geometrisi
- Kesici takımda oluşan titreşimler
- Talaşın kesici ucun üzerine yapışması,
- İşlenen iş parçasında oluşan titreşim ve balans
- İşlenen malzemenin süreksiz talaş vermesi

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde, ortalama değer R_a sembolüyle temsil edilmektedir. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere, bu değer, yüzeyin nominal ölçüsünden artı ve eksi yöndeki çukur ve çıkıntıların ortalama uzaklıklarını μm cinsinden ifade etmektedir (Demir ve Toktaş, 2014).



Şekil 3. 9. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a)

3.2.6. Sertlik ölçümü

Sertlik, malzemelerin mekanik özelliklerinden biri olup, genellikle malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır (Bektas, 2004). Sertlik ölçümleri, mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde genel bir bilgi sağladığı için en yaygın kullanılan malzeme özelliği belirleme testlerinden biridir. Ayrıca, sertlik, mekanik özelliklerin yanı sıra, malzemenin elektriksel ve diğer özellikleri hakkında da bir değerlendirme kriteri olarak kullanılmaktadır (Kayalı, 1996).

Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan pek çok sertlik ölçme yöntemi mevcuttur ve bu yöntemler uzun yıllardır başarıyla uygulanmaktadır. Ayrıca, her bir sertlik ölçme yönteminin uluslararası standartları belirlenmiştir. Sertlik ölçme yöntemleri, genel olarak statik ve dinamik yöntemler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Statik sertlik ölçme yöntemleri, genellikle laboratuvar tipi sertlik ölçme yöntemleri olarak sınıflandırılır ve bu gruba Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop gibi sertlik ölçme yöntemleri dahildir. Dinamik sertlik ölçme yöntemlerine ise Shore sertlik ölçme yöntemi örnek olarak verilebilir (Argıncıklıgil, 2019).

3.3. Kriyojenik İşlem

Kriyojenik işlem, diğer bir adıyla sıfır altı işlem, malzemelerin 0°C altındaki sıcaklıklarda belirli sürelerle bekletilmesi işlemidir. Bu işlem, on dokuzuncu yüzyılın ortalarında İsviçreli saat ustaları tarafından geliştirilmiştir. Daha dayanıklı ve uzun ömürlü saat parçaları üretmek amacıyla, dişliler ve saat parçaları dağ mağaralarına gömülerek kar altında bekletilirdi. Döküm malzemeleri ise genellikle kış aylarında dışarıda bırakılarak yaşlandırılır ve daha istikrarlı hale getirilirdi. 1930-1940 yılları arasında ise, çelik kesici takımların performansını yükseltmek amacıyla kriyojenik işlem kullanılmıştır (Wilkins, 1999).

Kriyojenik işlem, malzemelere yalnızca bir kez uygulanan ve sürekli bir süreç olan bir işlem türüdür. Genellikle, konvansiyonel ısıtma işlemi sonrasında, ancak temperleme aşamasından önce, malzemenin tüm kesitlerini etkileyen bir işlem olarak gerçekleştirilir. Bununla birlikte, kriyojenik işlem, ısıtma işlemin yerini alan bir yöntem değil, aksine, konvansiyonel ısıtma işlemleri tamamlayıcı bir işlem olarak uygulanmaktadır. Üretim sektöründe kriyojenik işlem, henüz düzenli ısıtma işlem süreçlerinin yerini almamıştır. Bu durum, işlemle ilgili yeterli bilgi eksikliğinden, mekanizmalarının tam olarak

açıklanmamış olmasından ve malzemeler üzerindeki olumlu etkilerinin yeterince anlaşılmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, sanayisi gelişmiş ülkeler, özellikle Amerika ve Çin başta olmak üzere, diğer gelişmiş Avrupa ülkeleri, uzay, otomotiv ve elektronik sektörlerinde, rekabet avantajı elde etmek ve malzemelerin aşınma direnci ile boyutsal kararlılığını artırmak amacıyla bu işlemi üretim süreçlerine dahil etmeye başlamışlardır (Çiçek vd.,2012).

Günümüzde, sertliğin yükseltilmesi, aşınma direncindeki iyileştirilmeler, su verme ve işleme kaynaklı gerilmelerin azaltılması, yüzey bütünlüğü ve boyutsal kararlılığın iyileştirilmesi gibi çeşitli avantajlar nedeniyle kriyojenik işleme olan ilgi önemli ölçüde artmıştır. Bu işlem, savunma, havacılık, otomotiv, kesici takım üretimi, imalat sanayi, spor ekipmanları ve müzik enstrümanları gibi birçok sektörde, bileşenlerin performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Kriyojenik işlemin, mekanik bileşenlerin ömrünü uzatarak işlevsel performanslarını iyileştirmesi, malzemenin mekanik özelliklerini geliştirme ve üretkenliği artırma konularında önemli faydalar sağladığını gösteren kanıtlar mevcuttur (Jha, 2011).

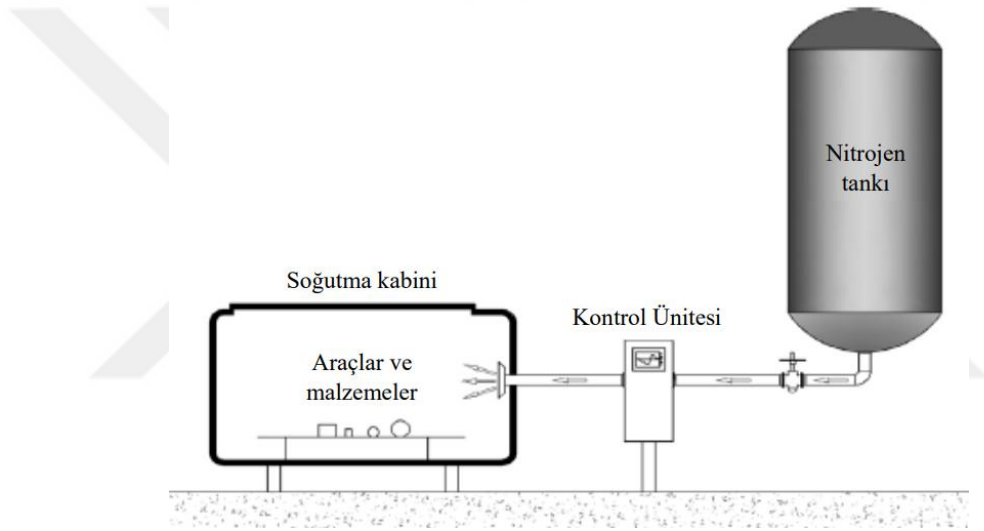
Demir esaslı ve demir içermeyen alaşım metalleri, plastikler, seramikler, bakırlar ve sementit karbürler gibi malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla, nitrojen gazı kullanılarak soğutma işlemi gerçekleştirilir ve bu sayede kriyojenik işlem uygulanır. Literatürde, kriyojenik işlem uygulanan kesici takımların tokluk, aşınma direnci, sertlik, takım ömrü ve yorulma dayanımı gibi bir dizi mekanik özelliğinin iyileştirildiği belirtilmektedir (Kalsi vd., 2014).

Son yıllarda, kriyojenik işlem, metallerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan geleneksel ısı işlemlerin yanı sıra tamamlayıcı bir işlem olarak geliştirilmiştir. Kriyojenik işlem, malzemeye uygulanacak sıcaklık değerine göre sığ kriyojenik ve derin kriyojenik olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Sığ kriyojenik işlem, malzemeye su verme işlemi uygulandıktan sonra, -50°C ile -80°C arasındaki sıcaklık aralığında, nitrojen gazı ile dolu bir ortamda bekletilmesi işleminden oluşur. Derin kriyojenik işlem ise, malzemelerin -125°C'den daha düşük sıcaklıklarda soğutulması işlemidir (Çiçek vd., 2012).

Kriyojenik işlemde en sık kullanılan nitrojen (azot), atmosferde %78 oranında bulunan ve bu nedenle elde edilmesi son derece kolay olan bir gazdır. Nitrojen gazı, renksiz, tatsız ve kokusuz olup, erime noktası yaklaşık -210°C, kaynama noktası ise yaklaşık -196°C'dir. Bu özellikleri, nitrojenin kriyojenik işlemler için uygun bir ortam sağlanmasında etkili bir madde olmasına olanak tanımaktadır (Candane vd., 2013).

Kriyojenik işlem sürecinde, işlenecek numune, kapalı bir bölmeye yerleştirildikten sonra, nitrojen (azot), helyum, oksijen, neon gibi gazlar kullanılarak, -80°C ile -196°C arasında değişen sıcaklık değerlerinde soğutulur. Bu soğutma işlemi, numunenin belirli bir süre boyunca en uygun sıcaklıkta tutulması sağlanarak gerçekleştirilir. Sürecin sonunda, numune, oda sıcaklığına kadar kademeli bir şekilde ısıtılarak işlem tamamlanır. Bu işlemde, sıcaklık, belirli bir oranda ve kontrollü bir şekilde düşürülür ve ardından işlem bitiminde tekrar oda sıcaklığına yükseltilir (Podgornik vd., 2009; Senthilkumar ve Rajendran, 2011).

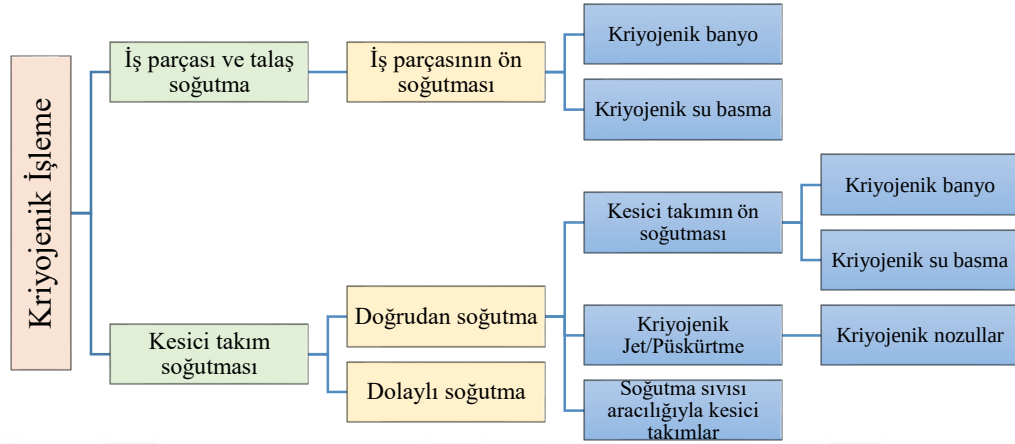
Kontrollü şekilde kriyojenik işlem gerçekleştiren bir sistemin şematik görseli, Şekil 3.10'da gösterilmiştir (Akıncıoğlu vd., 2015).



Şekil 3. 10. Kontrollü bir şekilde uygulanan kriyojenik işlem şeması

Kriyojenik işlem, çeşitli işleme uygulamalarında ve metaller ile kompozitlerde içinde olduğu geniş bir malzeme yelpazesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv, imalat ve havacılık endüstrilerinde, performans artırımı ve daha uzun hizmet ömrü sağlamak amacıyla, belirli bileşenlerde yüksek sertlik, mukavemet gibi üstün malzeme özelliklerinin elde edilmesi veya termal ve elektriksel iletkenliğin iyileştirilmesi istenen durumlarda uygulanmaktadır. Örnek olarak krank milleri ve dişliler gibi motor parçalarının mukavemet ve dayanıklılığının artırılması, kesme işlemlerinde ise daha yüksek kesici takım tokluğu ve aşınma direnci elde edilmesi için kriyojenik işlem genellikle üç aşamada gerçekleşir: yavaş soğutma aşaması, ısıtma aşaması ile temperleme ısınma aşaması (Hocheng, 2012).

Talaşlı imalat işlemlerinde uygulanan kriyojenik soğutma yöntemleri, Yıldız ve Nalbant'a göre Şekil 3.11'de gösterilmiştir (Yıldız ve Nalbant, 2008).



Şekil 3. 11. Kriyojenik işleme stratejileri

3.4. Minimum Miktarda Yağlama (MMY)

Günümüz endüstrisinde, üretim ekonomisi ile birlikte iş parçası nitelikleri, işleme süreleri ve üretilen miktarlar kadar, operatör ve çevre sağlığı da önemli bir faktör haline gelmiştir. İşleme sırasında ortaya çıkan yüksek ısıyı düşürmek amacıyla kesme sıvıları kullanılması gereklidir. Ancak, kesme sıvılarının kimyasal bileşenleri, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceği gibi, atık yönetimindeki hatalar da çevreye zarar verebilmektedir. Kesme sıvılarının zararları ve maliyetleri nedeniyle kullanımının azaltılması, ürün kalitesini ve takım ömrünü olumsuz yönde etkileyebilir. Bu noktada, MMY yöntemi, tazyikli hava ile yağ damlacıklarının kesme işlemi yapılan yüzeye püskürtülmesi suretiyle kesici takımı soğutur, yüzey kalitesini iyileştirir, talaşların uzaklaştırılmasına yardımcı olur ve takımda oluşabilecek aşınmaları engellemeye katkı sağlar (Gürbüz vd., 2017).

MMY sisteminde, etkili yağlama ve yüksek basınç performansı sağlamak amacıyla genellikle bitkisel yağlar tercih edilmektedir. Bitkisel yağ kullanılan bu yöntem "minimum miktarda yağlama" adı verilirken, su bazlı kesme sıvıları kullanılan yöntem ise "minimum miktarda soğutma" olarak adlandırılmaktadır. Uygulamanın türü ve kullanılan sıvının çeşidine bağlı olarak, gerekli sıvı miktarı genellikle saatte 10 ile 150 ml arasında değişmektedir. Parça işleme sırasında, yağ neredeyse tamamen

tükendiğinden havaya sis karışmaz. Bu sayede talaşlar kuruya yakın bir özellik gösterir ve kolayca geri dönüştürülebilir (Akben, 2009).

MMY, talaş kaldırma bölgesine kesme sıvısının düşük miktarda püskürtülerek uygulandığı bir tekniktir. Bu yöntem, çok az miktarda yağlayıcı maddenin yüksek hassasiyetle uygulanmasını sağlayan bir soğutma ve yağlama tekniğidir. Talaşlı imalat işlemlerinde, özellikle frezeleme, tornalama, matkapla delik delme ve testerede kesme gibi işlemlerde etkin bir şekilde kullanılmak için uygun bir yöntemdir (Yanartaş, 2023).

MMY yöntemi ile kullanılan kesme sıvılarının miktarının azalması, kullanılan sıvıların geri dönüşümüne veya etkisiz hale getirilmesine gerek kalmaması gibi önemli avantajlar sağlar. Ayrıca, kesme yapılan bölgenin temizlenmesi sağlanırken, kuru kalan talaşların geri dönüşüm için daha kolay bir şekilde işlenebilmesi mümkün olur. Bu da çevresel ve ekonomik açıdan büyük faydalar sunar (Sharma vd., 2016).

MMY, kesme sıvısının çok az miktarlarda, genel olarak birkaç mililitre/saat oranında, kesme bölgesine uygulandığı bir yağlama yöntemidir. Bu teknik, özellikle talaşlı imalat işlemlerinde sık kullanılmaktadır. MMY sistemleri, basınçlı hava aracılığıyla yağı ince bir film şeklinde kesme bölgesine püskürtür. Bu uygulama, hem yağlama hem de soğutma etkisi yaratarak işleme verimliliğini artırır (Rahman, 2009).

Kesme sıvıları, MMY yönteminde genel olarak 5 bar basınç altında, kesme yüzeyine püskürtülmesi sonucu istenilen seviyede bir yağ filmi oluşturur. Bu film, işlem sırasında oluşan ısıyı ve sürtünme kuvvetlerini azaltmayı amaçlar. Uygulanan kesme sıvısı miktarı, genellikle saatte 10-150 ml arasında değişmektedir. Püskürtülen kesme sıvısının partikül boyutunun 10 µm'den büyük olmaması, insan sağlığını tehlikeye atmamaları açısından büyük önem taşır (Yıldırım vd., 2015).

MMY sistemi, geleneksel soğutma sistemlerinden farklı olarak, kesici takım ile iş parçası arasına sadece çok küçük miktarlarda kesme sıvısı uygulayarak hem soğutma hem de yağlama işlevlerini yerine getirir. Su bazlı soğutma yöntemleri ise, MMY işlemine kıyasla 3 ila 4 kat daha verimli olup, bu süreçte soğutma sıvısının pompalama, soğutma veya filtreleme gibi ek işlemler gerektirmemesi, dolayısıyla maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Furness vd., 2017).

MMY yöntemi, kesme sıvısı kullanımını önemli ölçüde düşürdüğü için çevresel atıkları ve işleme esnasında ortaya çıkan tehlikeli atıkları en aza indirir. Geleneksel kesme sıvılarının aksine, MMY daha az atık üretir ve bu durum atık yönetimi maliyetlerinin düşmesine katkı sağlar (Srikant, 2011). Daha az yağ kullanımı, maliyetleri düşürürken, MMY ile işlenen parçaların temizlik maliyetlerini de azaltır. Ayrıca, MMY uygulamaları

enerji tasarrufu sağlayarak işletme maliyetlerinin düşmesine yardımcı olur (Kumar, 2013).

MMY yöntemi, kesme bölgesinde etkili bir yağlama ve soğutma sağlamak suretiyle kesici takım ömrünü uzatmakta ve yüzey kalitesini iyileştirmektedir. Bu iyileşmeler, üretim verimliliğinin artırılmasına ve işleme sürelerinin optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Silva, 2012).

MMY genelde yüksek hızlarda talaş kaldırma işlemleri, mikro işleme ve sert malzemelerin işlenmesi gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Örnek olarak, alüminyum ve alaşımlarının işlenmesi sırasında, MMY teknolojisinin takım ömrünü uzatmaya ve yüzey kalitesini artırmaya yönelik olumlu etkileri gözlemlenmiştir (Santos, 2013).

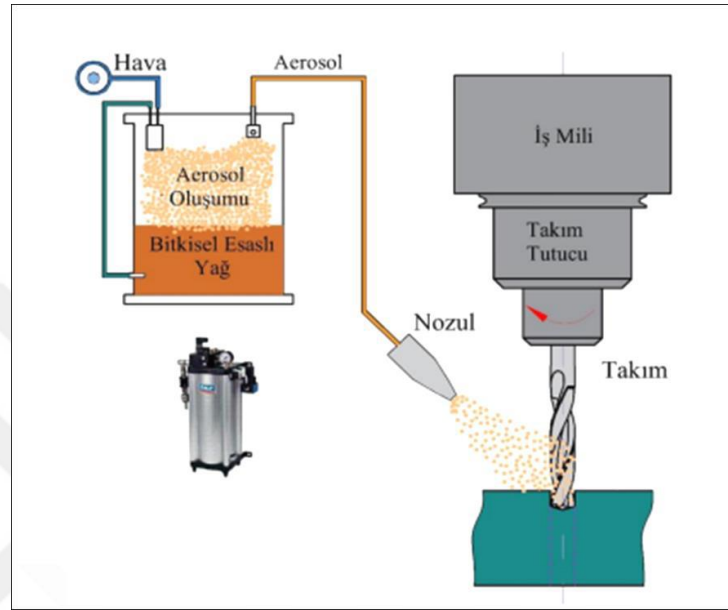
MMY uygulamaları, havacılık, otomotiv ve elektronik gibi birçok endüstriyel alanlarda sık kullanılmaktadır.

MMY sisteminin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Kullanılan yağ tamamen doğal, çevreye ve insana zararsız, içinde hiç bir zehirli madde içermez.
- Kesme sıvısı ihtiyacını ortadan kaldırması
- Yağ kullanım oranı çok az olduğundan atık oluşturmaması
- Bakteri üreme, koku yapma, gibi herhangi bir problem teşkil etmemesi
- İş parçası ve kesici takımda, tezgâhta içinde bir paslanmaya sebep olmaması
- Ölçü toleranslarının sağlanmasında daha istikrarlı ve hassas operasyonlar gerçekleştirilmesi
- Kesici takım ömrünü uzatmaya katkı sağlar.
- Tezgâhta işlem yapılırken kesici takım ve iş parçasının rahatça izlenebilmesini temin eder.
- Talaşların kuruya yakın şekilde elde edilmesini sağlayarak, talaşların yeniden eritilip kullanılabilmesine olanak tanır.
- Kuru ve emniyetli bir çalışma ortamı sunar
- Yağın bozulması gibi bir problem oluşturmadiğundan tankın boşaltılıp temizlenmesi gibi uzun süren bir işlemler gerektirmez
- Saf yağ ile yapılan işlemlere göre, operasyonlardan sonra ara yıkama işlemi yapılmasına gerek kalmaz. (URL-5)

3.4.1. MMY sistemi bileşenleri

MMY uygulamalarında, kesme sıvısı basınçlı hava ile birlikte özel hortumlar aracılığıyla taşınarak, bir nozul vasıtasıyla kesme bölgesine iletilmektedir. Bir MMY sistemi genellikle Şekil 3.12'deki bileşenlerden meydana gelmektedir (Çakır, 2009).



Şekil 3. 12. MMY uygulaması

MMY, kesme bölgesine gönderilen yağlayıcıya bağlı olarak çalışmaktadır. Bazı işlemlerde harici püskürtme yeterliyken, diğer bazı işlemlerde ise dahili püskürtme kullanılması gerekmektedir. Maliyet konusunda dahili püskürtmeli sistemler, dıştan püskürtme sistemine göre daha yüksektir. Harici püskürtme, kesici takım ve iş parçasının yüzeyine uygulanır. Çift kanallı sistemlerde ise dıştan püskürtme, hava ve yağlayıcıyı ayrı ayrı alarak, bunları uç kısmında veya yakınında karıştıracak şekilde tasarlanmıştır (Walker, 2015).

Yağ dozajlama kısmı, yağ miktarını ve püskürtme oranını hassas bir şekilde kontrol eden bir sistem olup, yağın kesme bölgesine istenen miktarda uygulanmasını sağlar. Basınçlı hava kaynağı, yağın ince sis şeklinde püskürtülmesini sağlayarak kesme bölgesine eşit bir dağılımı sağlayıp etkili bir yağlama imkanı sunar. Püskürtme nozulları, yağın kesme bölgesine istenen bir şekilde yönlendirilmesini temin eder. Bu nozullar, kesme işleminin türüne ve işlenen malzemenin özelliklerine göre farklı tasarımlarda olabilir (Davim, 2012).

4. MATERYAL VE METOD

4.1. Deneyde Kullanılan İş Parçası

Yapılan deneylerde kullanılan iş parçası 12 × 250 × 350 mm ebatlarında 2 adet ısıtıl işlem uygulanmış Alüminyum plakalar kullanılmıştır (Al7075 T651). Seykoç Alüminyum Firmasından alınan iş parçaları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. Deneyde kullanılan alüminyum Al7075 T 651 iş parçası

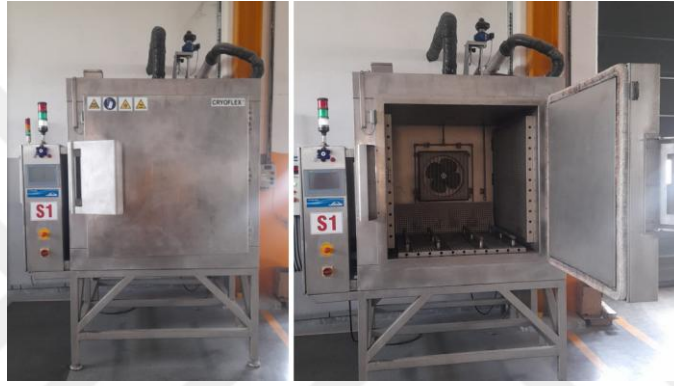
Deneylerde kullanılan Alüminyum 7075 plakalara ait teknik özellikler Tablo 4.1.’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 1. Alüminyum 7075 plakaların özellikleri

Genel Bilgiler												
Plaka Ölçüleri	12x250x350					Temper		T651				
Alaşım	7075					Standartlar		EN 485 EN 573				
Kimyasal Özellikler												
Standart	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Each	Tot al	Al	
Min				0,18		1,2	2,1	5,1				
Max	0,5	0,4	0,3	0,28	0,2	2	2,9	6,1	0,05	0,15	RE M.	
Mekanik Özellikler												
Çekme Dayanımı (Mpa)				Akma Dayanımı (Mpa)			Uzama (%)			Sertlik (Hv)		
540				460			8			149,56		

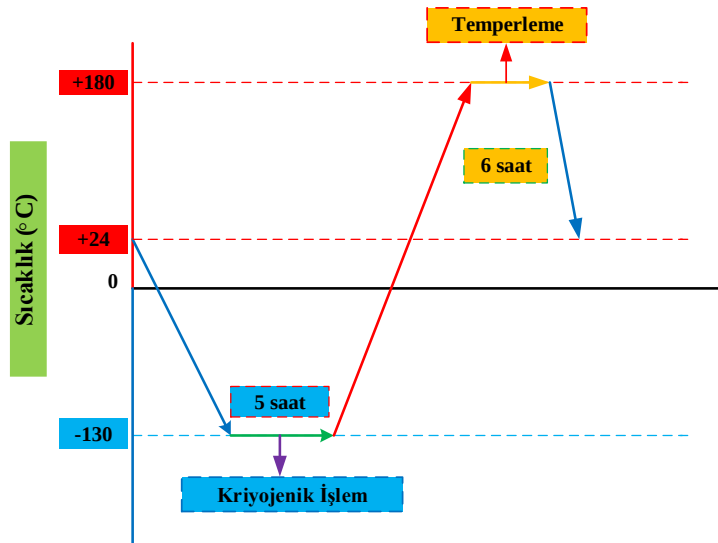
4.2. Kriyojenik İşlem ve Temperleme Aşaması

Yapılan deneylerde kullanılan Al 7075 iş parçalarından birine kriyojenik işlem uygulanması amacıyla Sağlam Metal San. ve Tic. A.Ş. firmasına gönderilmiştir. Firma tarafından iş parçası 5 saat süreyle -130°C 'de ısıtıl işlem fırınında soğutulduktan sonra, 5 saat oda sıcaklığında beklemeye alınmıştır. Kriyojenik işlem sonrasında iş parçası $+180^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat temperleme işlemi ısıtıl işlem fırınında yapılmıştır. Al7075 T651 iş parçasına uygulanan kriyojenik işlem, Şekil 4.2'deki 900x900x1200 mm ölçülerinde Cryoflex marka kriyojenik (sıfırlı işlem) kabininde yapılmıştır.



Şekil 4. 2. Kriyojenik sıfırlı işlem kabini

İş parçasına uygulanan kriyojenik işlemin grafiksel gösterimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 3.Kriyojenik işlemin şematik gösterimi

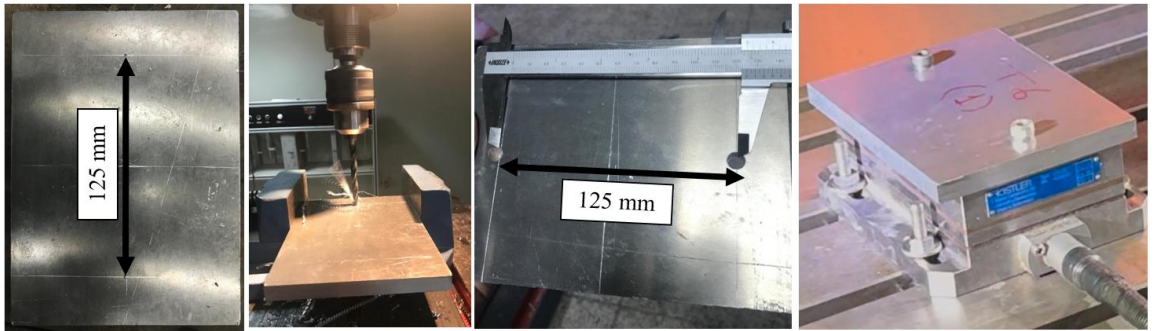
4.3. İş Parçalarının Kesim Aşamaları

Deneylerde kullanılan $12 \times 250 \times 350$ mm ebatlarındaki kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış (Al 7075) iş parçaları, Batman Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi atölyelerinde, her bir parça dört eşit parçaya ayrılmak üzere kesimleri yapılmıştır. Kesim aşamaları Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 4. Al 7075 iş parçalarının kesim aşamaları

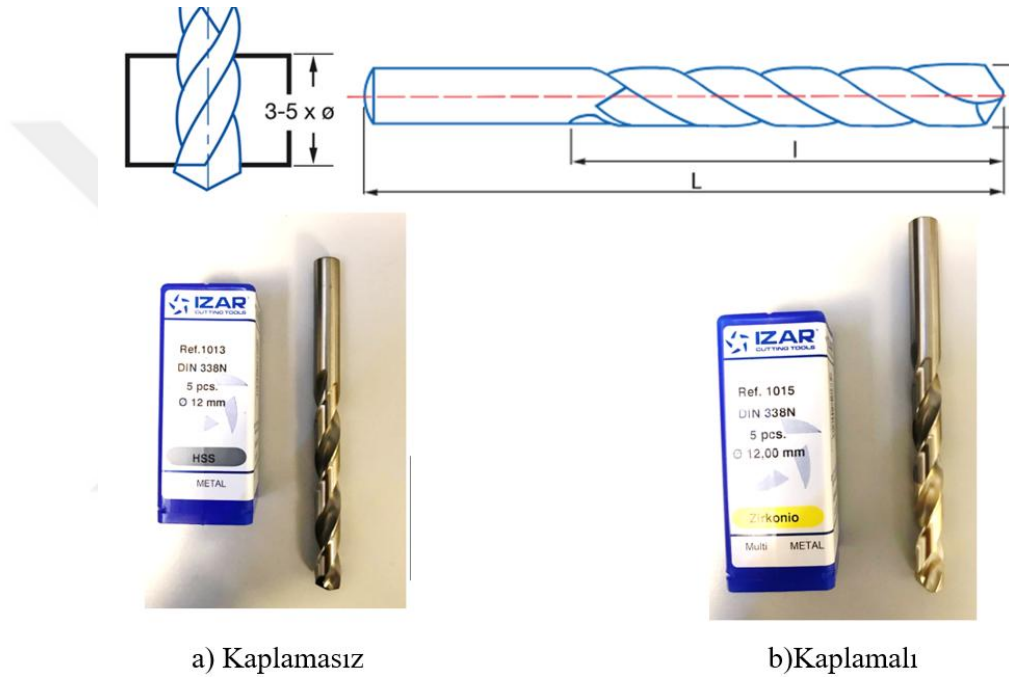
Dört eşit parçaya ayrılan iş parçalarını, delik delme işlemi öncesi dinamometreye bağlanmak için, iki delik mesafesi 125 mm olacak şekilde Şekil 4.5’de kumpas ile ölçülerek çapı 8 mm olan matkap ucu ile delinmiştir.



Şekil 4. 5. İş parçası bağlantı deliklerinin belirlenmesi

4.4. Matkap Uçları

Zr elementinin, alaşım malzemelerin mekanik dayanımını artırdığı ve bu alaşımlara sertlik kazandırdığı bilinmektedir (Gök, 2023). Bu nedenle deneyde kesici takım olarak DIN 338N Zr kaplamalı yüksek hız çeliği (HSS) matkap ucu seçilmiştir. Deneylerde kullanılan matkaplar Ata Teknik Endüstriyel Teknolojiler firmasından temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan kesici takımlara ait matkap uçları Şekil 4.6'da gösterilmiştir (URL-3).



Şekil 4. 6. Matkap uçları

Kesici takıma ait teknik özellikler Tablo 4.2’de gösterilmiştir (URL-3).

Tablo 4. 2. Kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarına ait özellikler

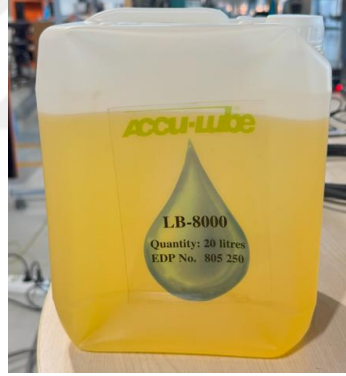
Türü	DIN	Uç Açısı	Çapı	Kesme Uzunluğu (l)	Boy (L)
Kaplamasız HSS	338 N	130°	12 mm	101 mm	151 mm
Zr Kaplamalı HSS					

Avantajları

- Sürtünme katsayısını azaltır.
- Korozyon direncini yükseltir.
- Demir dışı metallerin işlenmesine uygundur.
- Kesici ağızlar, talaş birikimini önlemek amacıyla özel olarak tasarlanmıştır.
- Otomatik merkezlemeli 130° uç açısına sahiptir.
- Yeni nesil Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemiyle uygulanan Zr kaplamaya sahiptir.

4.5. Soğutma Sıvısı

MMY delme deneylerinde soğutucu akışkan olarak kullanılan Accu-Lube LB-8000 (EDP No:805 250) metal kesme sıvısı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 7. Soğutma sıvısı

MMY sistemi için kullanılan LB 8000 yağ özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4. 3. Soğutma sıvısı özellikleri

Yağ cinsi	İçerik	Yoğunluk (20 °C)	Viskozite (40 °C)	Yanma Noktası
Lubrioil	Bitkisel ester bazlı	0,90 g/cm ³	10-6 m ² /s	310 °C

Soğutucu akışkan, CNC tezgahında bulunan deney boyunca farklı hız ve devirlerdeki kesici takıma tek nozul ile 30° açılı ve 52 mm mesafede Şekil 4.8’deki gibi ayarlanmıştır.



Şekil 4. 8. Soğutucu akışkan nozul mesafe ve açısının ayarlanması

MMY soğutma sisteminde hava yağ karışımı, pompa yardımı ile 8 bar ayarlanarak delik delme sırasında iş parçasının yüzey kalitesi, kesme kuvvetleri, kesici takım aşınmaları ve talaş morfolojileri incelenmiştir.

4.6. Soğutma Sıvısı Debi Ayarı

CNC tezgahında yapılacak olan delik delme deneylerinde kullanılan MMY sistemi tezgâha bağlantısı yapıldıktan sonra MMY sıvısının ml/dak cinsinden kullanım miktarı ve debinin tespiti amacıyla gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda hassas terazi olarak “Radwag AS 220.R2” markalı cihaz kullanılmıştır. MMY sisteminde debi miktarını bulmak için boş beherin ağırlığı ölçülmüş sonrasında MMY vana 0, 1, 2 ve 3 konumlarına getirilerek her biri ayrı ayrı gr/dak cinsinden hesaplanarak ölçümleri yapılmıştır. Yapılan debi ölçümleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 9. Soğutma sıvısı debi ölçümü

0	konumundayken = 1 dakikada	4,6280 gr
1	konumundayken = 1 dakikada	0,1236 gr
2	konumundayken = 1 dakikada	0,0162 gr

MMY deneylerinde hava yağ karışım pompası 0 (sıfır) konumunda 1 dakikada 4,6280 gr/dak olarak kullanılmış ve bu değer 5,1422 ml/dak cinsine çevrilmiştir. MMY debisi yapılan tüm deney boyunca sabit olarak alınmıştır.

4.7. Delik Delme Deneyleri

İş parçalarında delik delme deneylerini yapmak için Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM)'deki laboratuvarlarda bulunan Hartford VMC-1020 marka CNC 4 Eksen Dik İşleme Merkezi tezgâhı kullanılmıştır. Tezgâha ait görüntü Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4. 10. Delik delme tezgahı

Her biri dört eş parçaya kesilerek ayrılmış olan Normal ve Kriyojenik Al7075 T651 iş parçaları, hem kuru hem de MMY delme işlemi yapmak üzere şekil 4.10'daki tezgaha bağlanmıştır. Kesici takım olarak iki farklı matkap ucu kullanılmış olup, bunlar kaplamasız HSS matkap ucu ile Zr kaplamalı HSS matkap uçlarıdır.

Kesme parametreleri olarak; kesme hızı (30, 50, 70, 90 m/dak) ve ilerleme hızı (0,03-0,06-0,09-0,12 mm/dev) olarak alınmıştır. 12 mm kalınlığındaki her bir iş parçasına 9 mm kesme derinliğinde 16 adet delik delinerek toplam 128 adet kör delik açılmıştır.

4.7.1. Kesici takımların bağlanması

Deneylerde kullanılan matkap uçlarımız CNC tezgahındaki kesici takım tutucularına Şekil 4.11'deki gibi bağlanmıştır.



Şekil 4. 11. Kesici takımların bağlanması

4.7.2. Kuru delme deneyleri

Normal ve Kriyojenik iş parçaları üzerinde, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar ile sabit kesme derinliği, farklı kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında delik delme işlemleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçaları ile kesici takımlara ait kısaltmalar aşağıda belirtilmiştir.

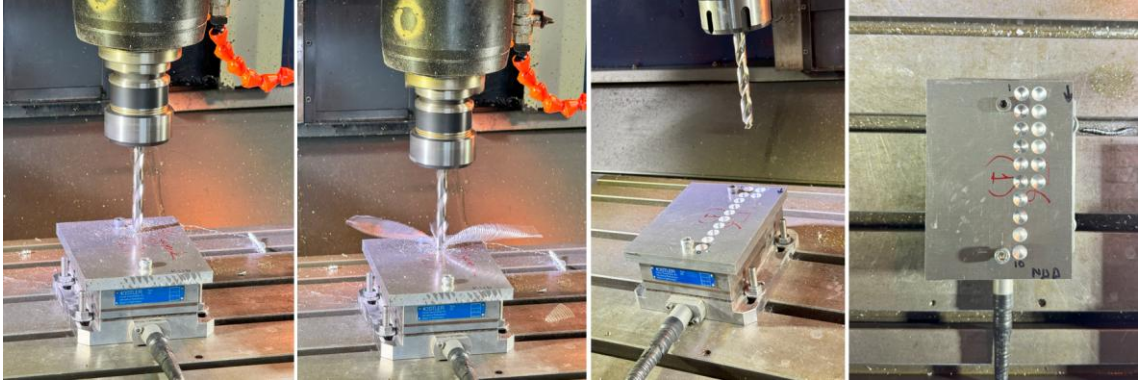
- NUD : Normal İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım -Kuru Delme
- NCD : Normal İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-Kuru Delme
- KUD : Kriyojenik İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım-Kuru Delme
- KCD : Kriyojenik İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-Kuru Delme

Tablo 4.4'de belirtilen kesme hızı ve devir başına ilerleme değerlerine göre kaplamalı ve kaplamasız kesici takım ile normal ve kriyojenik her bir iş parçası üzerinde 16 delik olmak üzere toplamda 64 kuru delik delme işlemleri yapılmıştır.

Tablo 4. 4. Kuru delme işlem parametreleri

KOD	Kesme hızı, Vc (m/dak)	Devir başına ilerleme, fn (mm/dev)	KOD	Kesme hızı, vc (m/dak)	Devir başına ilerleme, fn (mm/dev)
NUD 1	30	0,03	KUD 1	30	0,03
NUD 2	30	0,06	KUD 2	30	0,06
NUD 3	30	0,09	KUD 3	30	0,09
NUD 4	30	0,12	KUD 4	30	0,12
NUD 5	50	0,03	KUD 5	50	0,03
NUD 6	50	0,06	KUD 6	50	0,06
NUD 7	50	0,09	KUD 7	50	0,09
NUD 8	50	0,12	KUD 8	50	0,12
NUD 9	70	0,03	KUD 9	70	0,03
NUD 10	70	0,06	KUD 10	70	0,06
NUD 11	70	0,09	KUD 11	70	0,09
NUD 12	70	0,12	KUD 12	70	0,12
NUD 13	90	0,03	KUD 13	90	0,03
NUD 14	90	0,06	KUD 14	90	0,06
NUD 15	90	0,09	KUD 15	90	0,09
NUD 16	90	0,12	KUD 16	90	0,12
NCD 1	30	0,03	KCD 1	30	0,03
NCD 2	30	0,06	KCD 2	30	0,06
NCD 3	30	0,09	KCD 3	30	0,09
NCD 4	30	0,12	KCD 4	30	0,12
NCD 5	50	0,03	KCD 5	50	0,03
NCD 6	50	0,06	KCD 6	50	0,06
NCD 7	50	0,09	KCD 7	50	0,09
NCD 8	50	0,12	KCD 8	50	0,12
NCD 9	70	0,03	KCD 9	70	0,03
NCD 10	70	0,06	KCD 10	70	0,06
NCD 11	70	0,09	KCD 11	70	0,09
NCD 12	70	0,12	KCD 12	70	0,12
NCD 13	90	0,03	KCD 13	90	0,03
NCD 14	90	0,06	KCD 14	90	0,06
NCD 15	90	0,09	KCD 15	90	0,09
NCD 16	90	0,12	KCD 16	90	0,12

Kuru delme ortamında yapılan delik delme deneylerindeki işlemler Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 12. Kuru delme deneyleri

Her bir iş parçası üzerinde kuru delik delme işlemleri yapılırken 16. delme sonucunda oluşan talaş numunesi SEM’de incelenmek üzere Şekil 4.13’deki poşetlere konulmuştur.



Şekil 4. 13. Kuru delme talaş numuneleri

4.7.3. MMY delme deneyleri

Soğutma sıvısı kullanılarak normal ve kriyojenik iş parçaları üzerinde, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar ile sabit kesme derinliği, farklı kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında delik delme işlemleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçaları ile kesici takımlara ait kısaltmalar aşağıda belirtilmiştir. MMY işleme parametreleri Tablo 4.5’te verilmiştir.

NUM : Normal İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım-MMY

NCM : Normal İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-MMY

KUM : Kriyojenik İş Parçası-Kaplamasız Kesici Takım-MMY

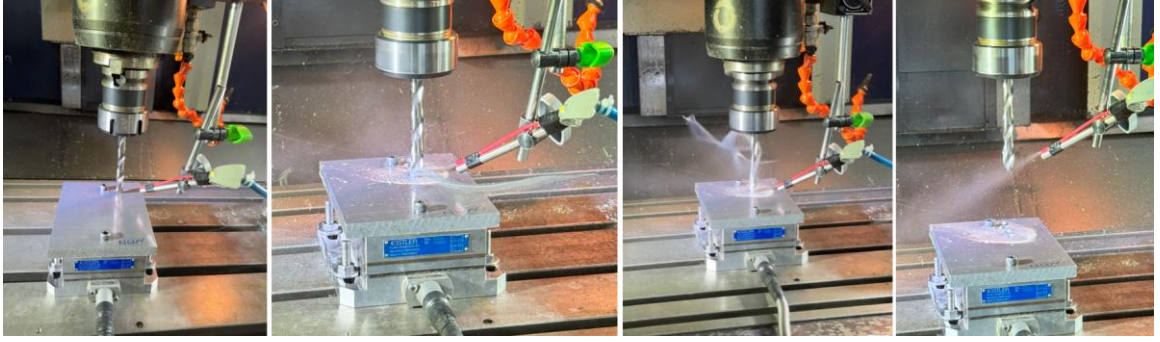
KCM : Kriyojenik İş Parçası-Kaplamalı Kesici Takım-MMY

Tablo 4.5’da belirtilen kesme hızı ve devir başına ilerleme değerlerine göre kaplamalı ve kaplamasız kesici takım ile normal ve kriyojenik her bir iş parçası üzerinde 16 delik olmak üzere toplamda 64 delik MMY delme işlemleri yapılmıştır.

Tablo 4. 5. MMY işleme parametreleri

KOD	Kesme hızı, Vc (m/dak)	Devir başına ilerleme, fn (mm/dev)	KOD	Kesme hızı, Vc (m/dak)	Devir başına ilerleme, fn (mm/dev)
NUM 1	30	0,03	KUM 1	30	0,03
NUM 2	30	0,06	KUM 2	30	0,06
NUM 3	30	0,09	KUM 3	30	0,09
NUM 4	30	0,12	KUM 4	30	0,12
NUM 5	50	0,03	KUM 5	50	0,03
NUM 6	50	0,06	KUM 6	50	0,06
NUM 7	50	0,09	KUM 7	50	0,09
NUM 8	50	0,12	KUM 8	50	0,12
NUM 9	70	0,03	KUM 9	70	0,03
NUM 10	70	0,06	KUM 10	70	0,06
NUM 11	70	0,09	KUM 11	70	0,09
NUM 12	70	0,12	KUM 12	70	0,12
NUM 13	90	0,03	KUM 13	90	0,03
NUM 14	90	0,06	KUM 14	90	0,06
NUM 15	90	0,09	KUM 15	90	0,09
NUM 16	90	0,12	KUM 16	90	0,12
NCM 1	30	0,03	KCM 1	30	0,03
NCM 2	30	0,06	KCM 2	30	0,06
NCM 3	30	0,09	KCM 3	30	0,09
NCM 4	30	0,12	KCM 4	30	0,12
NCM 5	50	0,03	KCM 5	50	0,03
NCM 6	50	0,06	KCM 6	50	0,06
NCM 7	50	0,09	KCM 7	50	0,09
NCM 8	50	0,12	KCM 8	50	0,12
NCM 9	70	0,03	KCM 9	70	0,03
NCM 10	70	0,06	KCM 10	70	0,06
NCM 11	70	0,09	KCM 11	70	0,09
NCM 12	70	0,12	KCM 12	70	0,12
NCM 13	90	0,03	KCM 13	90	0,03
NCM 14	90	0,06	KCM 14	90	0,06
NCM 15	90	0,09	KCM 15	90	0,09
NCM 16	90	0,12	KCM 16	90	0,12

MMY ortamında yapılan delik delme deneylerindeki işlemler Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 14. MMY delme deneyleri

Her bir iş parçası üzerinde MMY delik delme işlemleri yapılırken 16. delme sonucunda oluşan talaş numunesi SEM’de incelenmek üzere poşetlere konulmuştur.

4.8. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

Delik delme işlemleri esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçümü için, üç eksenli kesme kuvvetlerini ölçen Kistler Tip 9257B dinamometre kullanılmıştır. Tablo 4.6’da dinamometrenin teknik özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 4. 6. Kistler tip 9257B teknik özellikler

Kuvvet Aralığı (Fx, Fy, Fz)	-5 - 10 kN
Tepki Verme	<0,01 N
Hassasiyet Fx, Fy	-7,5 pC/N
Hassasiyet Fz	-3,5 pC/N
Doğal Frekans f_0 (x,y,z)	3,5 kHz
Çalışma Sıcaklığı	0 - 70°C
Kapasitans	220 pF
20 °C’deki Yalıtım Direnci	> 1013 Ω
Topraklama Yalıtımı	> 108 Ω
Ağırlık	7,3 kg

Delik delme deneylerde kesme kuvvetlerinin ölçülmesi amacıyla Al 7075 T651 iş parçalarına iki adet delikler açılmış ve dinamometrenin üzerine yerleştirilmiştir. Dinamometre ile deney numunesi arasında doğrudan temas sağlanması sayesinde delme işlemleri esnasında oluşan kuvvet verileri iş parçası üzerinden okunmuştur. Şekil 4.15’te iş parçasının dinamometreye bağlı durumdaki şekli verilmiştir.



Şekil 4. 15. Dinanometreye bağlanmış iş parçası

Kesme kuvvetlerine ait sinyallerin dinamometreden veri toplama kartına iletilmesi sürecinde, elektronik sinyallerin güçlendirilmesi amacıyla Multichannel Charge Amplifier Type 5070 cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.16’da kullanılan amplifikatör şekli verilmiştir.



Şekil 4. 16. Kistler type 5070 amplifikatör

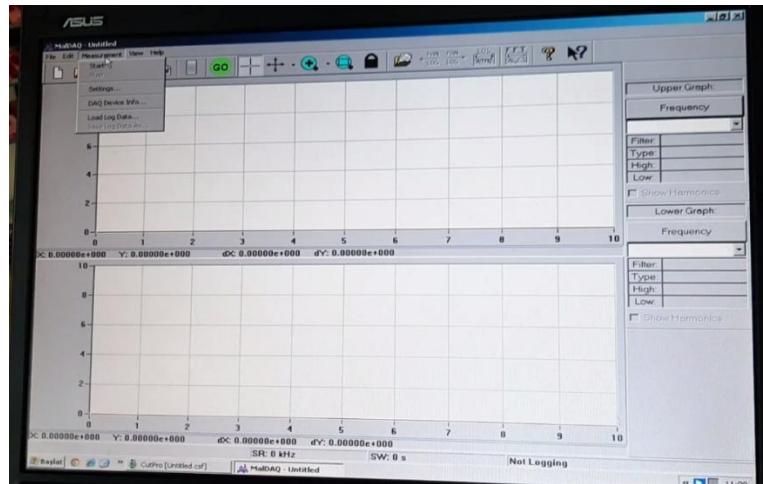
Amplifikatörden elde edilen kuvvet sinyalleri, dört kanallı DAQ Dynamic Signal Conditioner birimine aktarılmakta ve buradan da bilgisayar ortamına iletilmektedir. Söz konusu veri toplama sistemi, sinyalleri dijital formata dönüştürerek bilgisayar üzerinde analiz ve görselleştirme işlemlerine olanak sağlamaktadır. Şekil 4.16’da sinyal düzenleyiciye ait görsel verilmiştir.



Şekil 4. 17. DAQ sinyal düzenleyici

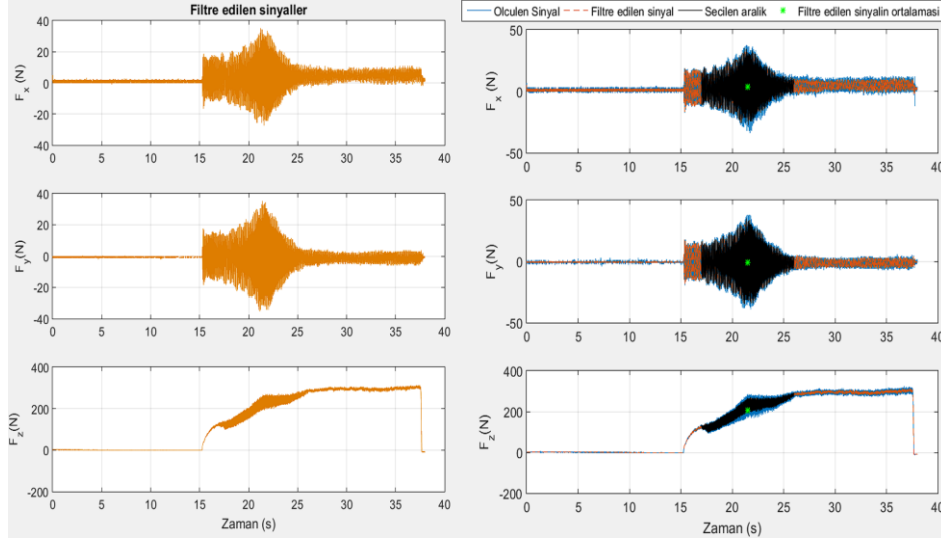
Şekil 4.17'deki DAQ cihazından elde edilen veriler, bilgisayar ortamında CutPro yazılımının MALDAQ veri toplama modülü aracılığıyla dışa aktarılmıştır. Bu yöntemle, deney süresince elde edilen tüm veriler kaydedilmiş; görselleştirme ve analiz işlemleri için uygun hale getirilmiştir.

Şekil 4.18'de kullanılan programa ait görüntü verilmiştir. Elde edilen veriler MATLAB ortamında analiz edilerek ortalama kuvvet değerleri hesaplanmış ve sonuçların görselleştirilmesi amacıyla grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 4. 18. CutPro MALDAQ modülü

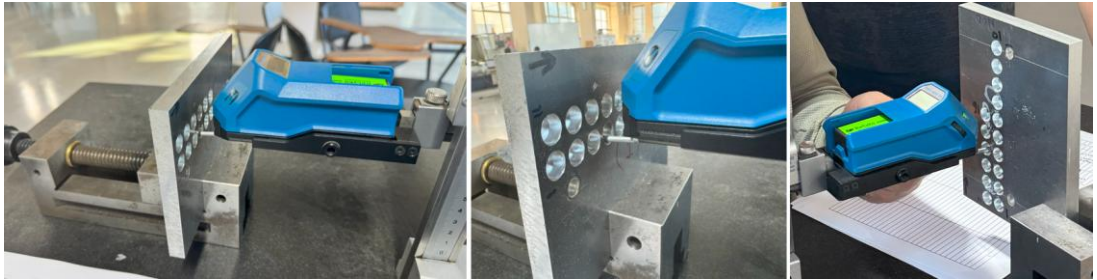
Delik delme işlemi sırasında Hartford VMC-1020 CNC 4 eksen dik İşleme merkezinden elde edilen veriler Matlap programında programlanarak anlamlı hale getirilip Şekil 4.19'deki kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Delmenin başladığı ve sonlandığı ilerleme kuvvetlerinin ortalama değerleri alınarak grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 4. 19. Ortalama kesme kuvvetleri

4.9. İş Parçası Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Deneylerde kullanılan Al 7075 T651 normal ve kriyojenik iş parçalarında delik delme sonucunda oluşan delik yüzeylerinin pürüzlülük ölçümleri, Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM’de bulunan Hommel Tester T500 cihazı ile ölçümleri alınmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

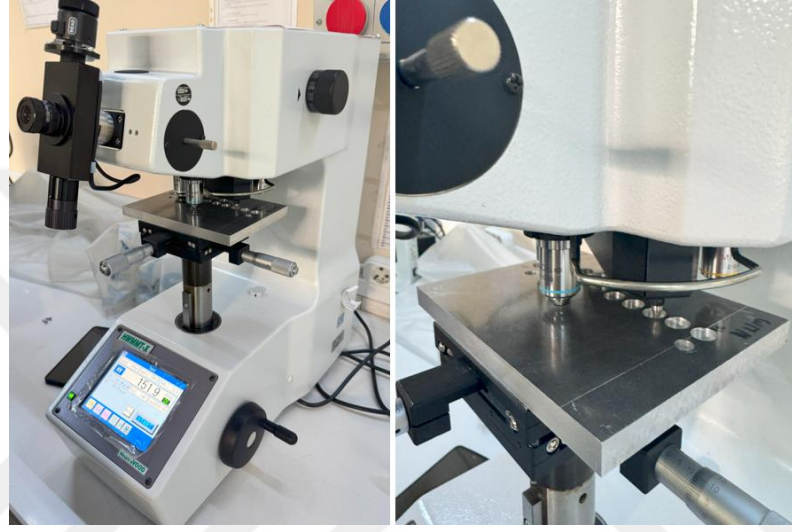


Şekil 4. 20. Yüzey pürüzlülük ölçümü

Numuneler üzerinde her bir deliğin DIN 4768 ve ISO 4287/1 standartlarına göre 4,8 mm ölçüm boyunda ve 0,8 mm kesme uzunluğunda 3 farklı (Ra_1 , Ra_2 , Ra_3) bölgelerinden ölçümler alınarak tablolara işlenmiştir. Alınan bu 3 farklı değerlerin aritmetik ortalamaları (Ra) hesaplanmıştır.

4.10. İş Parçası Mikro Sertlik Ölçümü

Al 7075 T651 normal ve kriyojenik iş parçaları, Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM'deki laboratuvarlarında bulunan TTS Matsuzawa HWMMT-X3B markalı cihazda Vickers mikrosertlik ölçümleri 3 farklı noktadan alınan değerlerin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Sertlik deneylerine ait yapılan işlemler Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 21. İş parçası mikro sertlik ölçümü

4.11. Mikro yapı Analizi

Kriyojenikli ve kriyojeniksiz iş parçalarının mikro yapı görüntülemeleri 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada iş parçaları kademeli olarak 2500 gride kadar zımparalanmıştır. İkinci aşamada parlatma çuhası kullanılarak 1 ve 0,5 μm aşındırıcı ile kademeli olarak parlatılmıştır. Son aşamada ise Floroborik asit solüsyonunda kriyojenikli ve kriyojeniksiz numuneler dağlanmıştır. Daha sonra kriyojenikli ve kriyojeniksiz iş parçası numuneleri Nikon L150A optik mikroskopunda polarize filtre ve görüntü işleme uygulamalarıyla clemex görüntü işleme yazılımıyla görüntü işleme ve renk atamaları yapılarak Mikro yapılar görüntülenmiştir.

4.12. Kesici Takım Aşınması

Al 7075 T651 kriyojenik iş parçaları üzerinde delik delme işlemi sonucu kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarında meydana gelen kesici takım aşınmaları incelenmiştir. Kullanılan matkap uçları Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 22. Kesici takım matkap uçları

Al 7075 T651 kriyojenikli iş parçası üzerinde kaplamalı ve kaplamasız uçlardan her bir plaka için kuru işleme şartlarında 33 adet kör delik açılmıştır. Takım aşınma deneylerinde kesme parametreleri olarak işleme deneylerinde kullanılan en yüksek kesme parametreleri olan kesme hızı 90 m/dak, ilerleme hızı 0,12 mm/dev ve kesme derinliği 9 mm kullanılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarıyla toplamda 122 adet delik delme işlemi yapılmıştır. Yapılan işlemler Şekil 4.23’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 23. Kesici takım aşınma testi için yapılan delik delme aşaması

Yapılan delik delme işlemi sırasında kesici takımlarda meydana gelen aşınmaları incelemek üzere her 11 adet delik sonrası Şekil 4.24’ deki Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM de bulunan OLYMPUS BX51 markalı optik mikroskopta incelenmiştir.



Şekil 4. 24. Kesici takım aşınma mikroskopik aşınma ölçümleri

İş parçaları üzerinde yapılan delik delme işlemi sonrası kesici takımlar üzerinde meydana gelen aşınmaları ayrıca SEM’de incelemek üzere kesici takım uçları 10 mm uzunluğunda Şekil 4.25’deki Brilliant 220 hassas kesim cihaz ile her biri 50 dakika süren kesim işlemi yapılmıştır.



Şekil 4. 25. Hassas kesim cihazı

SEM’e gönderilmek üzere hassas kesim cihazı ile kesilen 10 mm uzunluğundaki matkap uçları Şekil 4.26’de gösterilmiştir.



Zr Kaplamalı kesici takım



Kaplamasız kesici takım

Şekil 4. 26. Kesilen matkap uçları

4.13. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı

İş parçaları üzerinde yapılan delik delme işlemi sonrası kesici takımlar üzerinde meydana gelen aşınmalar ile iş parçasından alınan talaş örneklerini mikroskobik ortamda gözlemlemek amacıyla Şekil 4.27 deki Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM’de bulunan FEI QUANTA FEG 250 isimli Sem (Taramalı Elektronik Mikroskop) cihazı kullanılmıştır.

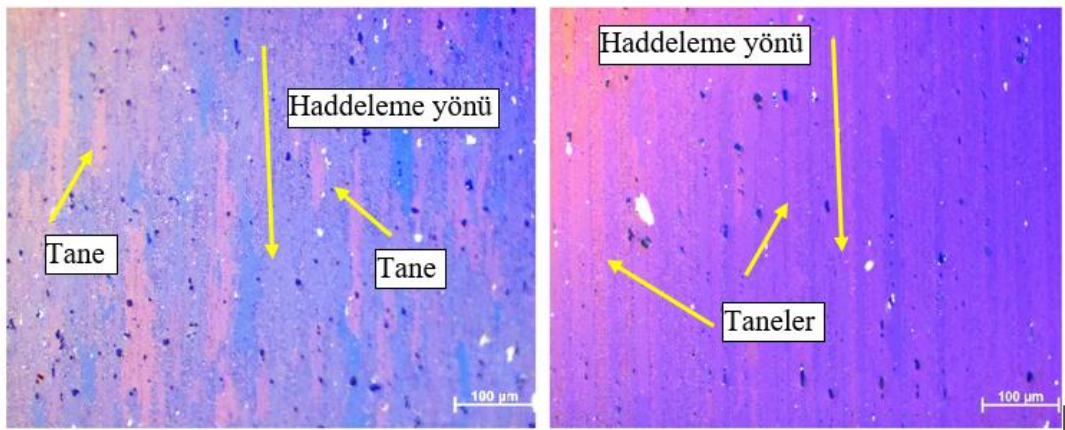


Şekil 4. 27. SEM görüntüleme cihazı

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Kriyojenik İşlemlili ve Kriyojenik İşlemsiz Al 7075-T651 Alaşımının Mikro Yapısı

Al 7075 T651 kriyojenikli ve kriyojeniksiz iş parçasına ait mikroyapı görselleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasındaki mikro yapı kriyojeniksiz iş parçasına ait mikro yapıya göre tanelerde bir küçülme tespit edilmiştir. Kriyojeniksiz iş parçasındaki mikro yapı içerisinde yer alan taneler ince ve uzun şeklindedir. Haddeleme esnasında uygulanan plastik deformasyon neticesinde taneler deformasyon yönünde (hadde yönü) uzamıştır. Kriyojenikli iş parçasında ise tanelerde daha kısa tanelerin oluştuğu gözlenmiştir. Tane küçüklüğü; malzemelerin dayanımını ve tokluğunu, akma dayanımı ve mukavemetini artırmakta, sünekliği azaltmaktadır. Malzeme içerisindeki taneler küçüldükçe birim hacme düşen tane sınırı miktarı arttığı için, malzeme güçlenmektedir. Tane boyutu büyüdüğünde ise toplam tane sınır alanı azalmakta ve mukavemet azalmaktadır. Literatürde kriyojenik işlemin Al 7075 malzemesine uygulandığında malzemenin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır (Zhang vd., 2023).

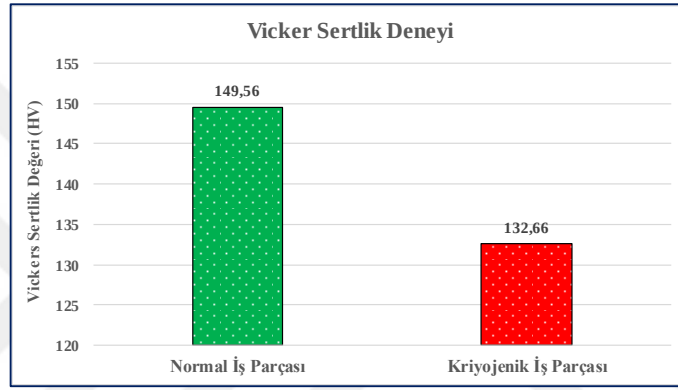


a) Kriyojenik işlem uygulanmış Al 7075 T6 b) Kriyojenik işlem uygulanmamış Al 7075 T6

Şekil 5. 1. Al 7075 malzemesinin kriyojenikli ve kriyojeniksiz mikro yapısı

5.2. Al 7075 T651 İş Parçası Sertlik Ölçümleri

Al 7075 T651 normal ve kriyojenik işlem görmüş iş parçası üzerinde yapılan vickers sertlik değerleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Kesici takımların mikrosertlik değerleri, elde edilen ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Deney sonucunda kriyojenik işlem sonrası Al 7075 T651 iş parçasının sertlik değerinin 149,56 HV’den 132,66 HV değerine düştüğü görülmektedir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, yapılan kriyojenik işlemin iş parçasının mikrosertlik değerinde yaklaşık % 11,2 oranında bir düşüş sağladığı tespit edilmiştir.



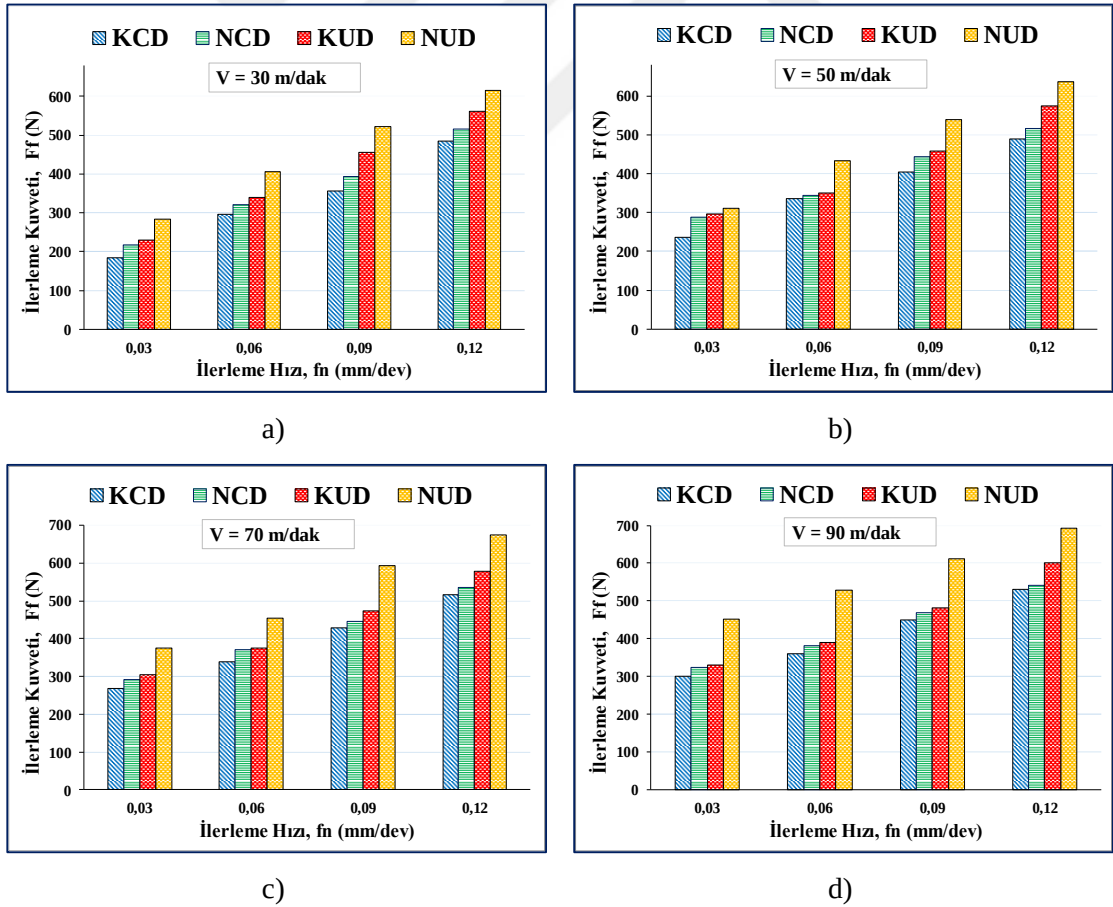
Şekil 5. 2. Al 7075 T651 normal ve kriyojenik iş parçasına ait sertlik ölçüm değerleri

Geleneksel ısıtıl işlem ve yaşlandırma yöntemlerinin yanı sıra, son yıllarda kriyojenik işlemler de malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmede dikkat çekmektedir. Kriyojenik işlemler, malzeme içinde daha ince ve homojen karbürlerin çökmesini, iç gerilmelerin giderilmesini ve dislokasyon hareketlerinin teşvik edilmesini sağlamaktadır. Ancak, yaptığımız çalışmada Al 7075-T651 alaşımına uygulanan kriyojenik işlem ile 149,56 HV olan sertlik değeri 132,66 HV’ye düşmüştür. Kriyojenik işlemlili alaşımlarda sertlik düşüşünün ana nedeneleri, kriyojenik işlem sonrası Al7075 alaşımına 6 saat süreyle temperleme işlemi yapılmasından ötürü malzemenin tane içi ve tane sınırlarındaki çökeltilerin kabalaşması, iç gerilmelerin azalmasına ve kararlı MgZ2 fazının ana yapı içerisinde çözünmesine atfedilebilir (Demirel ve Karaağaç, 2019). Al 7075-T651 gibi çökelme sertleşmesi ile yüksek mukavemet kazanmış alaşımlarda, kriyojenik işlemin etkisi karmaşık olabilir ve bazı durumlarda sertlikte düşüşe neden olabilir (Lulay vd., 2002). Bununla birlikte, yaşlandırma ve ardından kriyojenik işlemin sertlik üzerinde olumlu etkiler gösterdiği çalışmalar da mevcuttur. Ancak bu

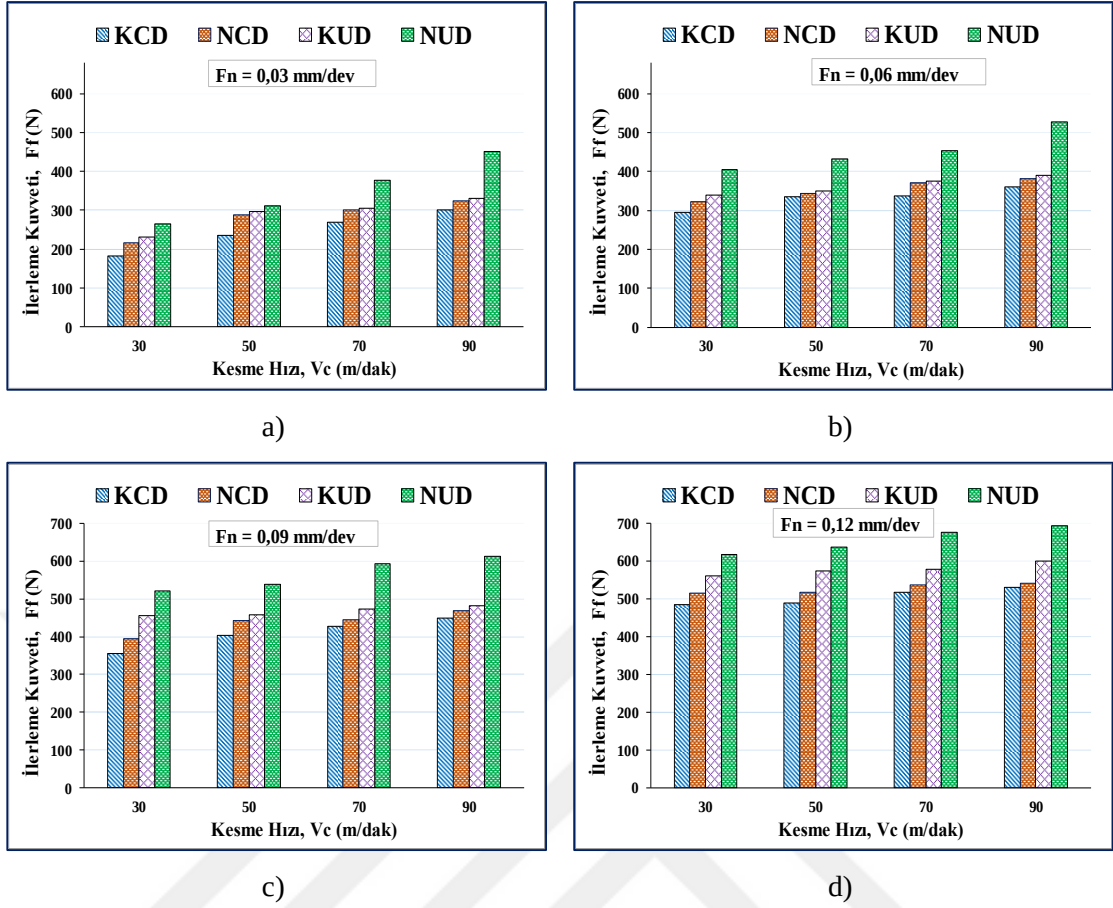
çalışmalarda, artan kriyojenik işlem sũresinin sertliği olumsuz etkilediği gũrũlmũřtũr (Gogte vd., 2014; Mavi vd., 2021). Bu durumun, malzeme içerisindeki şokelti sertleşmesi mekanizmalarıyla ilişkili olduğu dũřũnũlmektedir.

5.2. İlerleme Kuvvetlerinin İncelenmesi

Farklı kesme hızı ve ilerleme miktarlarına göre normal ve kriyojenik işlem gũrmũř Al7075 iş parçası ũzerinde kaplamalı ve kaplamasız matkap uçları ile yapılan delme sonucunda elde edilen ortalama ilerleme kuvvetleri sonuçlarına bakılmıştır. 0,03 - 0,06 - 0,09 ve 0,12 mm/dev ilerleme ve 30 - 50 - 70 ve 90 m/dak kesme hızlarında ve 9 mm kesme derinliği parametrelerine göre Ff ilerleme kuvvetleri incelenmiştir. Yapılan her deneyde kullanılmamış kesici takım yerleştirilerek uygun deney ortamı sağlanmıştır. Farklı delme ve işleme parametrelerine bağlı olarak kuru delme işlemi sırasında elde edilen ilerleme kuvvetleri şekil 5.3 ve 5.4'te gũsterilmiřtir.



şekil 5. 3. Kuru delmede farklı kesme hızlarına bağlı ilerleme kuvveti değişim grafikleri



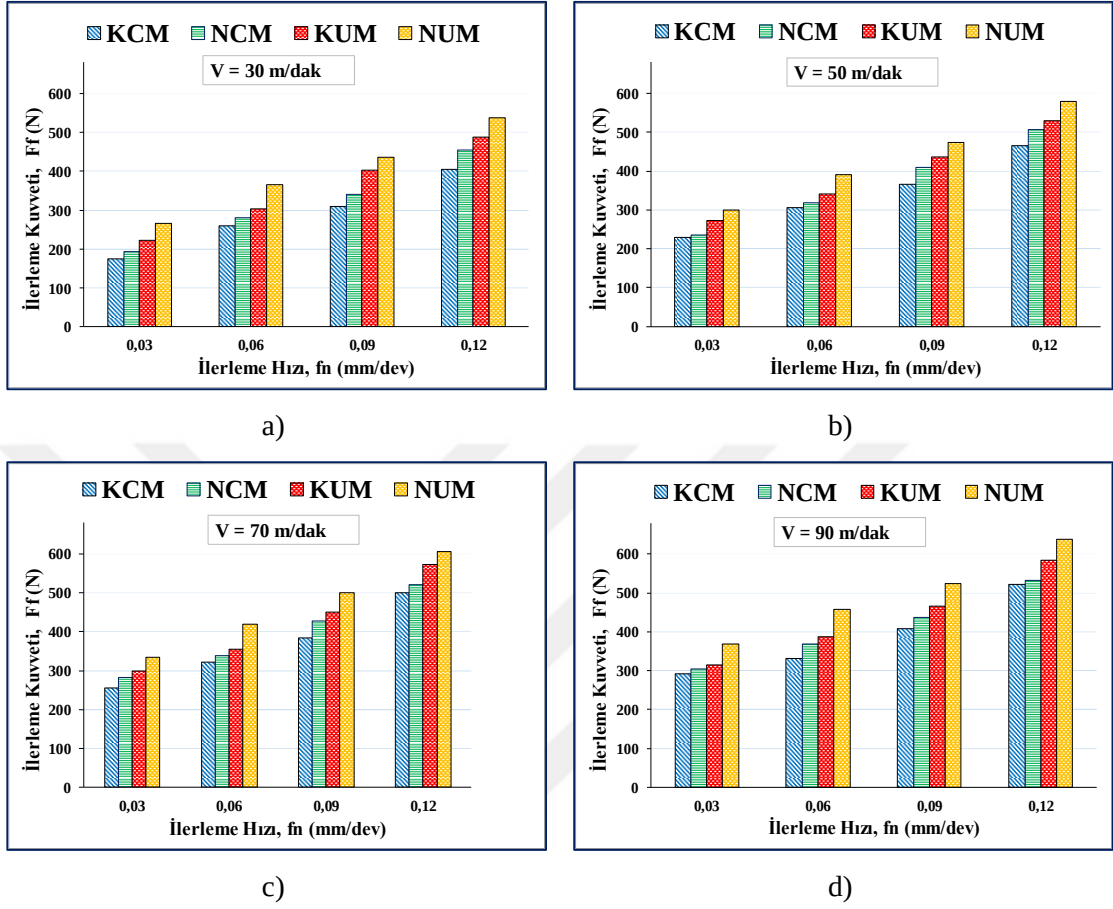
Şekil 5. 4. Kuru delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı ilerleme kuvveti değişim grafikleri

Şekil 5.3 ve 5.4'teki kuru delme işlemi sırasında elde edilen ilerleme kuvvetleri incelendiğinde, tüm delik delme işlemlerinde ilerleme hızının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmektedir. İlerleme kuvvetlerine ait büyüklük değerleri $NUD > KUD > NCD > KCD$ şeklinde gerçekleşmiştir. En düşük ilerleme kuvveti 0,03 mm/dev ilerleme hızı ve 30 m/dak kesme hızında kriyojenik iş parçası üzerinde kaplamalı kesici takım (KCD) ile yapılan delik delme deneyleri olmuştur. En yüksek ilerleme kuvveti ise 0,12 mm/dev ilerleme hızı ve 90 m/dak kesme hızında normal iş parçası üzerinde kaplamasız kesici takım (NUD) ile yapılan deneylerde gerçekleşmiştir. İlerleme hızındaki artış, malzemenin kopma direncinin yükselmesine ve buna bağlı olarak talaş kesit alanının genişlemesine neden olmakta, bundan dolayı ilerleme kuvvetlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir (Saini ve ark., 2014). Literatürde yapılan çalışmalarda kesme ve ilerleme hızının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmektedir (Çaydaş ve Çelik 2017; Yaşar, 2019; Aydın ve Nalbant 2020). Kuru delmede kriyojenikli iş parçasının normal iş parçasına göre ilerleme kuvveti değerlerine bakıldığında, kriyojenik iş parçasına ait ilerleme kuvvetinin daha düşük çıktığı görülmektedir ($KCD < NCD$). Bu

durum, kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasına ait mikroyapının daha kararlı bir hâle gelmesi, iş parçasında aşınmanın azalması ve işleme sırasında daha az deformasyona uğraması ile açıklanabilir. Bununla beraber kriyojenik malzemelerin delinmesi esnasında kesici takım ömrünün artacağı öngörülebilir. Literatürdeki çalışmalarında benzer sonuçlar verildiği görülmektedir (Çiçek vd., 2012 , Akıncıoğlu vd., 2015, Khanna vd., 2020). Şekil 5.3 ve 5.4'teki Al 7075 malzemesinin delinmesinde kesme hızının artışına bağlı olarak kesme kuvvetlerin arttığı tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda da elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir (Santos vd., 2016). Kesme hızının artmasıyla birlikte, takım-talaş temas bölgesinde yüksek sıcaklık, gerilim ve gerinim (plastik deformasyon) koşullarının ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Bu durum, malzemenin sünekliğini artırarak kesici takım yüzeyine yapışma eğilimini ve dolayısıyla BUE oluşumunu teşvik eder. Alüminyum, sünek bir malzeme olduğundan, talaşlı işleme sırasında talaşlar kesici takım yüzeyine yapışarak BUE oluşumuna neden olur. Bu oluşum, kesme işlemini zorlaştırmakta ve daha yüksek ilerleme kuvveti gereksinimini beraberinde getirmektedir (Santos vd., 2016). Yüksek kesme hızı, delme işlemleri sırasında oluşan yüksek ısı nedeniyle takım ile iş parçası arasındaki kesme sıcaklıklarının artmasına ve dolayısıyla takımın daha fazla aşınmasına neden olabilir. Kesme hızı arttığında, kesme sıcaklığı da artar ve bu da iş parçası malzemesinin kesme kenarlarına yapışmasına neden olur (Bağcı ve Özcelik 2005). Bu yüzden kesme hızı arttıkça ilerleme kuvvetleri artmaktadır.

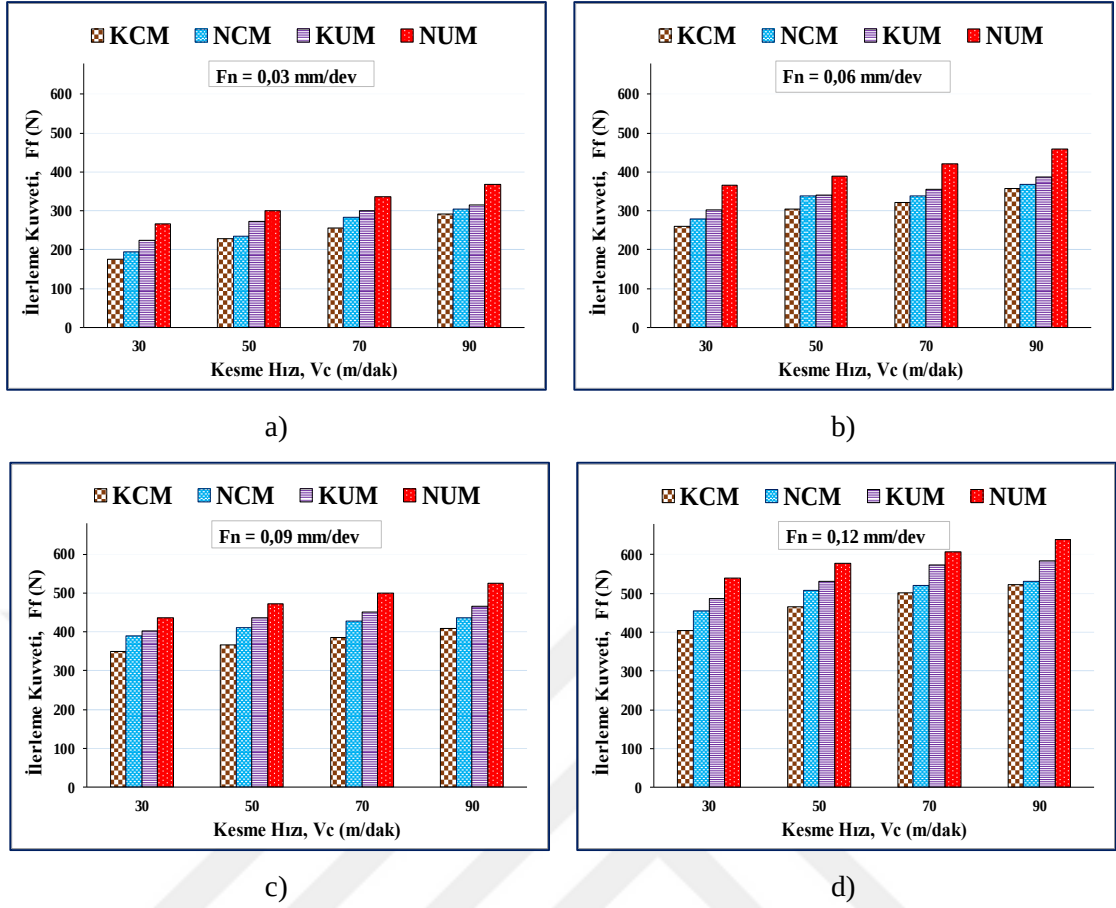
Kuru delmede kaplamasız HSS ve Zr kaplamalı HSS kesici takımların iş parçası üzerindeki etkileri incelendiğinde, hem kriyojenikli hem de normal iş parçası üzerinde ilerleme ve kesme hızlarına göre Zr kaplamalı kesici takımlardaki ilerleme kuvvetleri daha yüksek çıktığı görülmüştür. Deney sonuçlarında kriyojenikli iş parçası ve kaplamalı kesici takım (KCD) ile yapılan delik delme işlemlerinde en düşük ilerleme kuvvetine sahip olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan bu durum Zr kaplamalı HSS kesici takımın sürtünme katsayısının kaplamasız HSS kesici takıma göre düşük olmasına atfedilmiştir. Aynı zamanda her iki kesici takıma ait EDS analizlerine bakıldığında delme esnasında kaplamasız kesici HSS takımın üzerine Al talaş sıvanması daha fazla olduğu görülmektedir (Bkz bölüm 5.5). Al 7075 T6 iş parçasını delirken iş parçası ve Zr kaplı kesici takım arasındaki sürtünme etkileşiminin düşük olması talaş kaldırma için gerekli olan kuvvetlerin düşmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca Şekil 5.24 - 5.25'deki SEM görüntülerine bakıldığında Zr kaplamalı kesici takımın kaplamasız kesici takıma göre daha az aşındığı görülmektedir. Buda delik delme esnasında Zr kaplamalı kesici takımın

kesici kenar keskinliğini koruyarak ilerleme kuvvetlerinin daha düşük çıkmasına yol açmıştır.



Şekil 5. 5. MMY delik delmede farklı kesme hızlarına bağlı ilerleme kuvvet değişim grafikleri

MMY yöntemi ile yapılan Şekil 5.5'deki delik delme deneyleri incelendiğinde kuru delmede olduğu gibi tüm delik delme işlemlerinde ilerleme hızının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Yapılan delik delme deneylerinde ilerleme kuvvetlerine ait büyüklük değerleri NUM>KUM>NCM>KCM şeklinde gerçekleşmiştir. En düşük ilerleme kuvveti 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme hızında kriyojenik iş parçası üzerinde kaplamalı kesici takım (KCM) ile yapılan delik delme deneyleri olmuştur. En yüksek ilerleme kuvveti ise 90 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme hızında normal iş parçası üzerinde kaplamasız kesici takım (NUM) ile yapılan deneylerde gerçekleşmiştir.



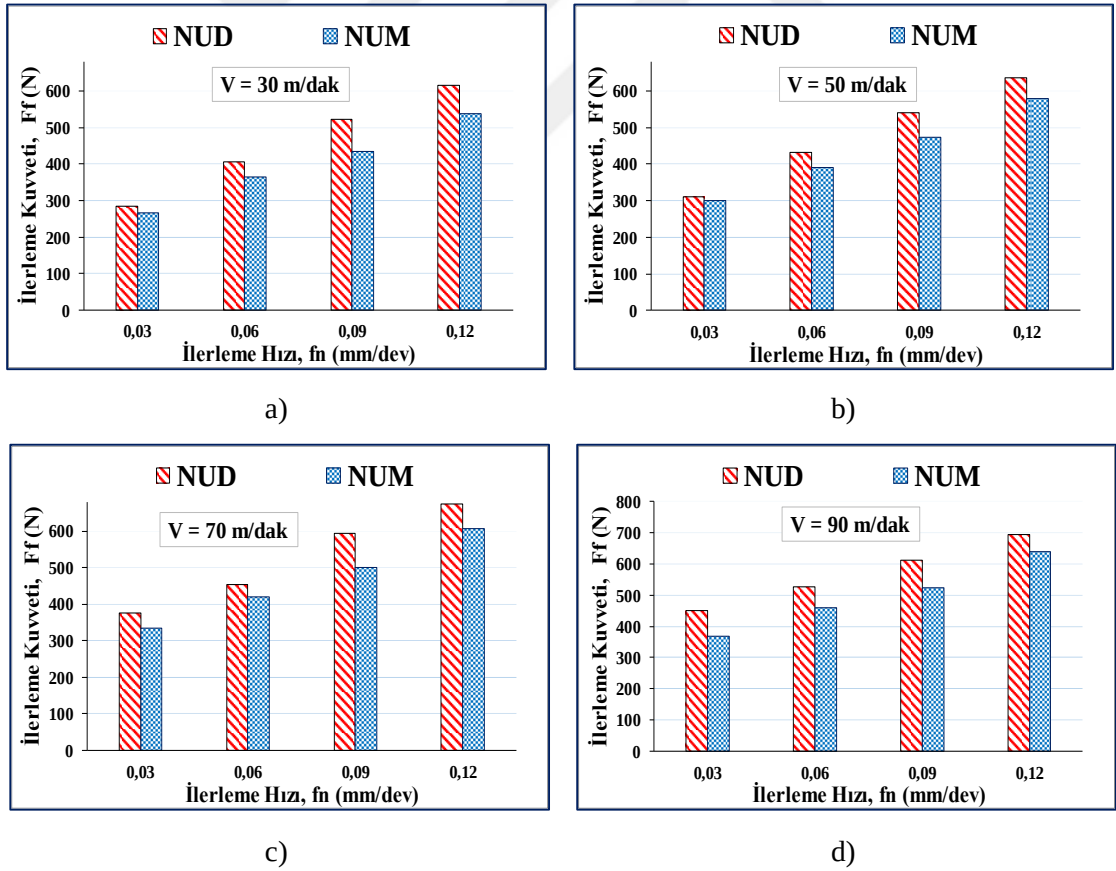
Şekil 5. 6. MMY delik delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı ilerleme kuvvet değişim grafikleri

Şekil 5.6.'da MMY ile gerçekleştirilen delme işlemlerinde, ilerleme kuvvetlerinin incelenmesi sonucunda, ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak ilerleme kuvvetlerinde de belirgin bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan delik delme deneylerinde ilerleme kuvvetlerine ait büyüklük değerleri $NUM > KUM > NCM > KCM$ şeklinde gerçekleşmiştir. En düşük ilerleme kuvveti 0,03 mm/dev ilerleme hızı ve 30 m/dak kesme hızında kriyojenik iş parçası üzerinde kaplamalı kesici takım (KCM) ile yapılan delik delme deneyleri olmuştur. En yüksek ilerleme kuvveti ise 0,12 mm/dev ilerleme hızı ve 90 m/dak kesme hızında normal iş parçası üzerinde kaplamasız kesici takım (NUM) ile yapılan deneylerde gerçekleşmiştir.

Şekil 5.3 - Şekil 5.6.'daki grafikler incelendiğinde MMY ile işlemeden elde edilen kesme kuvvetleri kuru delmeye göre daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, MMY yöntemi, ısı ve sürtünmeyi azaltmanın yanı sıra, yüksek basınçlı yağlayıcı sıvı sayesinde kesme bölgesinde oluşan talaşların hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayarak talaş kırılmasına katkıda bulunmakta ve bu sayede daha düşük ilerleme kuvvetiyle kesici takım aşınması önlenabilmektedir. Literatürde yer alan birçok

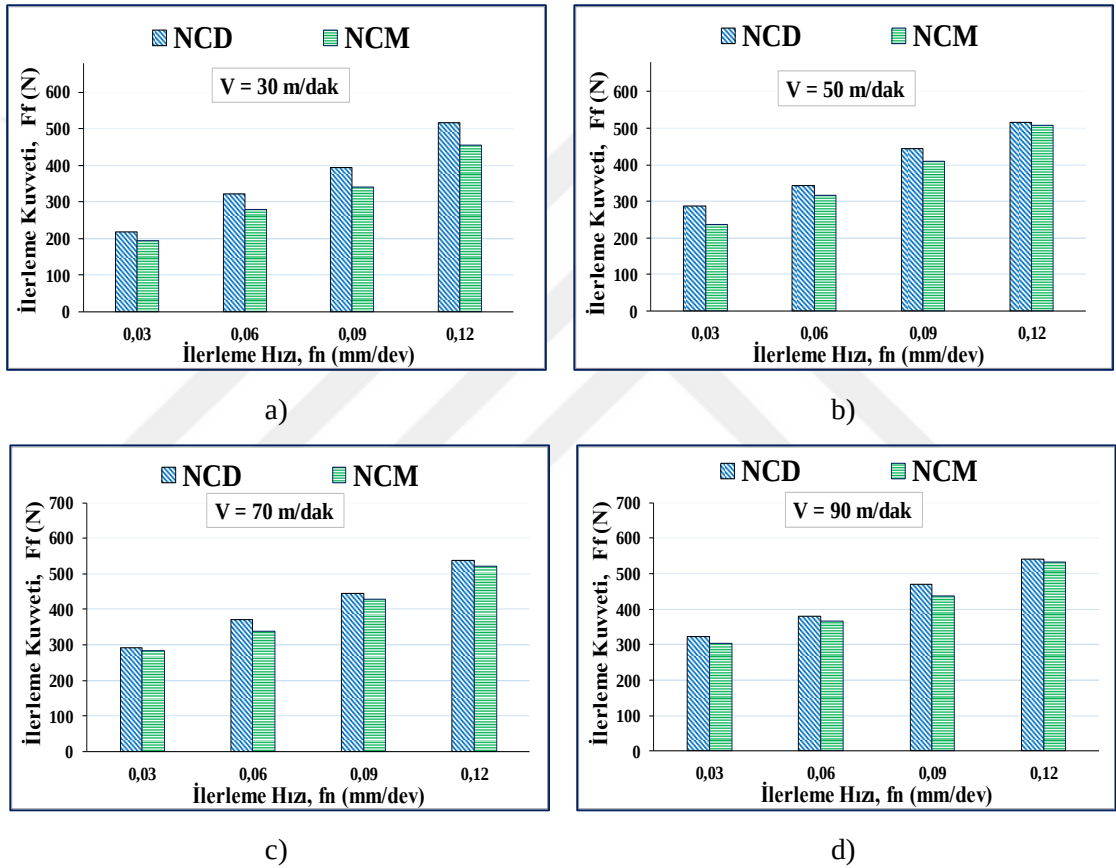
çalışmada, MMY tekniğiyle gerçekleştirilen delik delme işlemlerinin, hem kesici takımında oluşan aşınmayı önemli ölçüde azalttığı hem de iş parçasının yüzey kalitesini iyileştirdiği rapor edilmiştir. (Chatha vd., 2016; Yücel vd., 2021). Öndin ve arkadaşları, bu durumu MMY tekniğinde kullanılan yağlayıcıların takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak daha iyi bir film tabaka oluşturması (penetrasyonu) ile açıklamışlardır (Öndin vd., 2020).

Şekil 5.7’de kuru ve MMY ortamında normal iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delme işlemleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; hem kuru hem de MMY ortamında kesme ve ilerleme hızları arttıkça ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. Literatürde yapılan birçok çalışmada görüldüğü gibi burada da MMY ortamında yapılan delik delme işlemlerinde uygulanan ilerleme kuvvetleri daha düşük çıkmıştır (Sen, 2021). Kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delme işleminde en düşük ilerleme kuvvetleri 0,03 mm/dev ilerleme ve 30 m/dak kesme hızı değerlerinde olduğu görülmüştür.



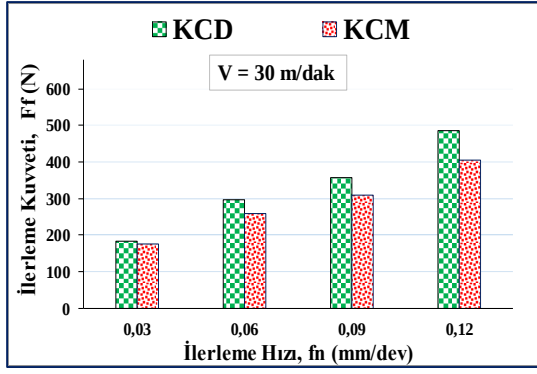
Şekil 5. 7. Normal iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delme grafikleri

Şekil 5.8’de kuru ve MMY ortamında normal iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takım ile yapılan delik delme işlemleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; hem kuru hem de MMY ortamında kesme ve ilerleme hızları arttıkça ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. MMY ortamında yapılan delik delme işleminde daha düşük ilerleme kuvvetlerinin olmasının nedeni kullanılan soğutma sıvısının oluşan ısıyı azaltması ve talaşların uzaklaştırılmasını sağlamasıdır. Literatürde yapılan çalışmalarda MMY ile yapılan delik delme işlemlerinde kuru delmeye göre daha az takım aşınmaları gerçekleştiği görülmektedir (Kannan vd., 2020; Rahman vd., 2002).

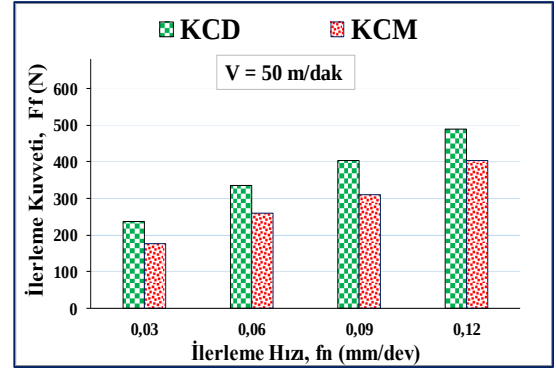


Şekil 5. 8. Normal iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takım ile yapılan delik delme grafikleri

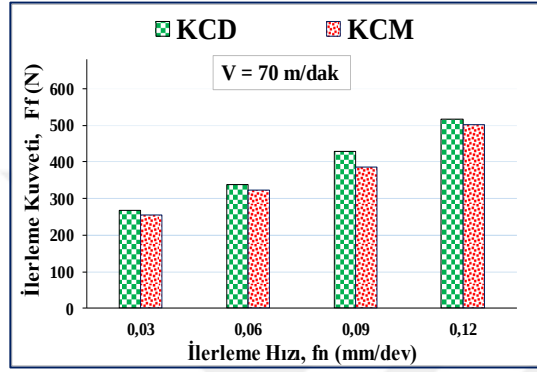
Şekil 5.9’de kuru ve MMY ortamında kriyojenik iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takım ile yapılan delik delme işlemleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; en düşük ilerleme kuvvetlerinin MMY ortamında yapılan delik delme deneylerinde (KCM<KCD) gerçekleşmiştir. 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme hızında minimum kuvvetlerin olduğu, 90 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme hızında da maksimum ilerleme kuvvetlerinin olduğu görülmektedir.



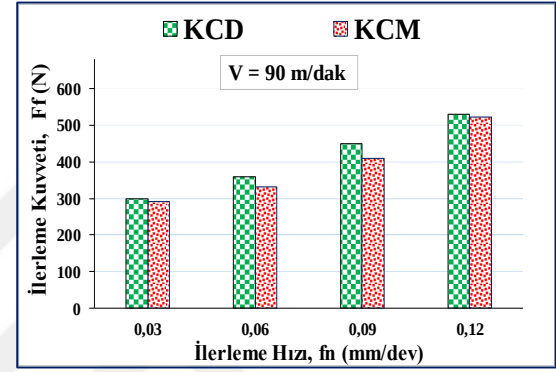
a)



b)



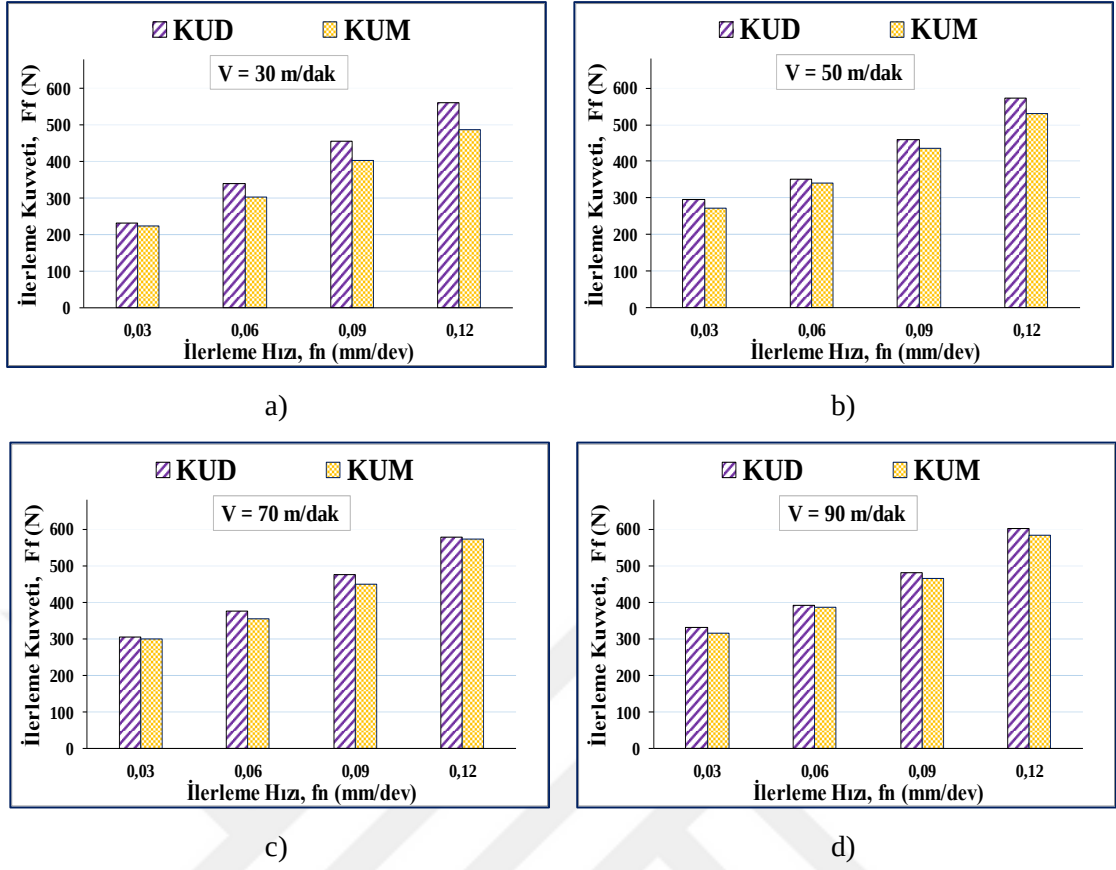
c)



d)

Şekil 5. 9. Kriyojenik iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delme grafikleri

Şekil 5.10’da kuru ve MMY ortamındaki kriyojenik iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delme işlemlerinin sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; en düşük ilerleme kuvvetlerinin MMY ortamında yapılan delik delme deneylerinde ($KUM < KUD$) gerçekleşmiştir. 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme hızında minimum kuvvetlerin olduğu, 90 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme hızında da maksimum ilerleme kuvvetlerinin olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 10. Kriyojenik iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delme grafikleri

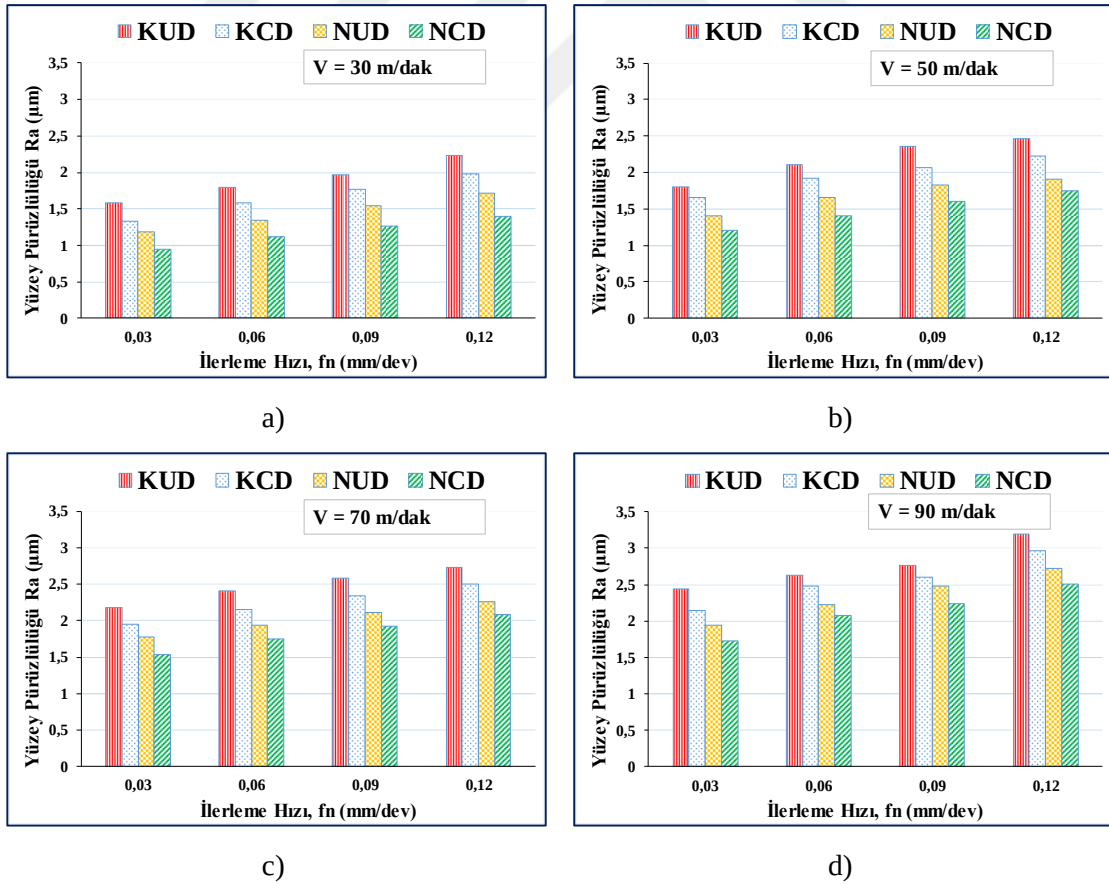
5.3. Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin İncelenmesi

Farklı kesme hızı ve ilerleme miktarlarına göre normal ve kriyojenik işlem görmüş Al7075 iş parçası üzerinde kaplamalı ve kaplamasız matkap uçları ile yapılan delme sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) sonuçlarına bakılmıştır. Yapılan her deneyde kullanılmamış kesici uçlar yerleştirilerek uygun deney ortamı sağlanmıştır. Delik delme işlemleri sonrasında iş parçası üzerindeki işlenmiş yüzeylerin farklı dört noktasından yüzey pürüzlülük değerleri alınmıştır. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalamalarına göre hesaplamalar yapılmıştır. Al7075 iş parçasının delinmesinde işleme şartlarına ve kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri Şekil 5.11 - Şekil 5.14'te verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde ilerleme hızının etkisini görmek için Şekil 5.11 ve 5.14'teki grafikler incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin kötüleştiği tespit edilmiştir. Bu durumu, ideal yüzey pürüzlülüğün tahmini için kullanılan teorik denklemle eşitlik 5.1'de açıklamak mümkündür (Hagiwara vd., 2009).

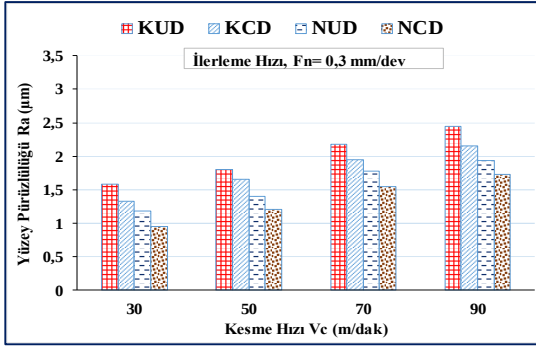
$$R_a = \frac{0.0321xf^2}{r_e} \quad (5.1)$$

Eşitlikte 5.1’de verilen f: ilerleme (mm/dev), Ra: yüzey pürüzlülüğü, r_e : kesici takım burun yarıçapını temsil etmektedir. Bu denkleme göre ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülük değerleri arasında bir doğru orantı olduğu anlaşılmaktadır. İlerleme hızının artması yüzey pürüzlülük değerlerini arttıracaktır.

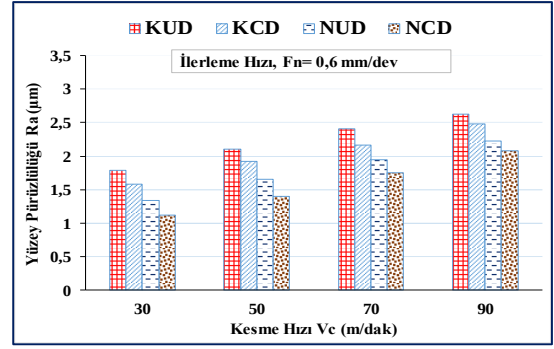
Şekil 5.11 ile 5.14’teki grafikler incelendiğinde kesme hızın artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerini arttığı görülmüştür. Ortaya çıkan bu durum literatürde yapılan benzer çalışmalarla örtüşmektedir (Dahnel vd., 2022). Daha yüksek kesme hızlarında delme işlemi sırasında, daha yüksek ısı nedeniyle alüminyum alaşımının süneklik özellikleri artacaktır. Daha yüksek kesme sıcaklığı, iş parçasının termal olarak yumuşamasına ve dolayısıyla işlenen yüzeye daha fazla malzeme yapışmasına neden olur (Dahnel vd., 2022). Bunun sonucu olarak kesme hızı arttığında yüzey pürüzlülük değerleri artacaktır.



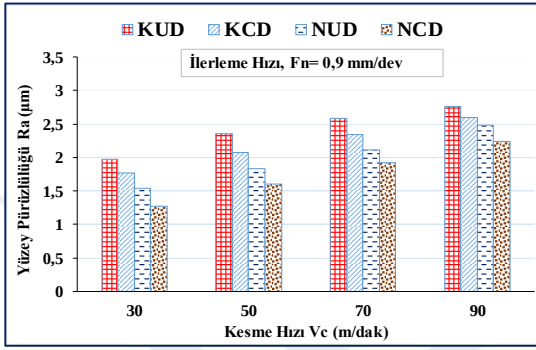
Şekil 5. 11. Kuru delmede farklı kesme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri



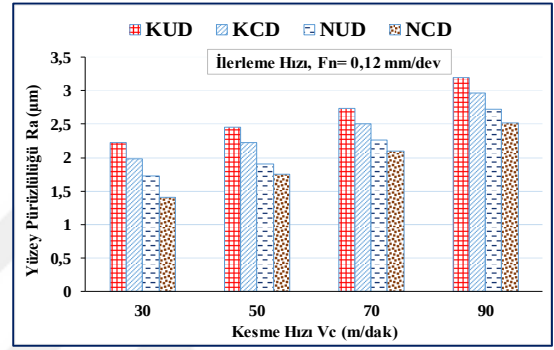
a)



b)

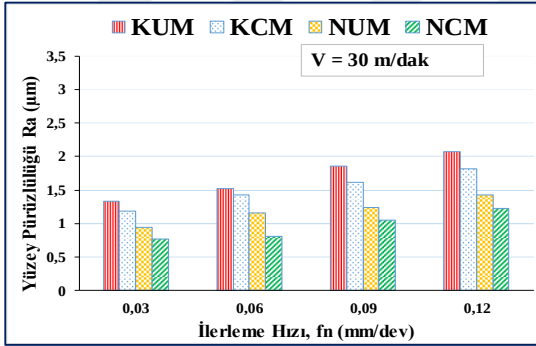


c)

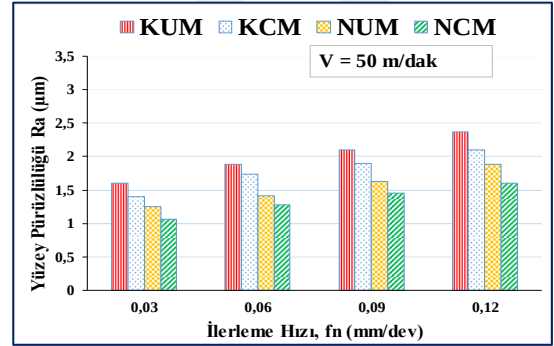


d)

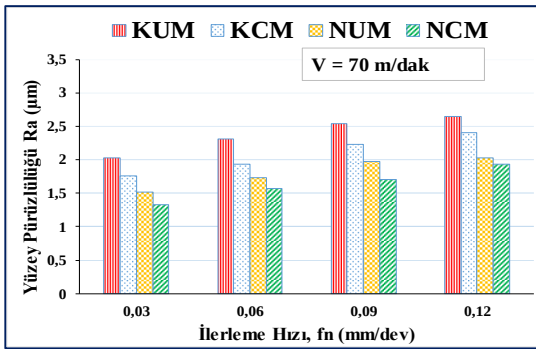
Şekil 5. 12. Kuru delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri



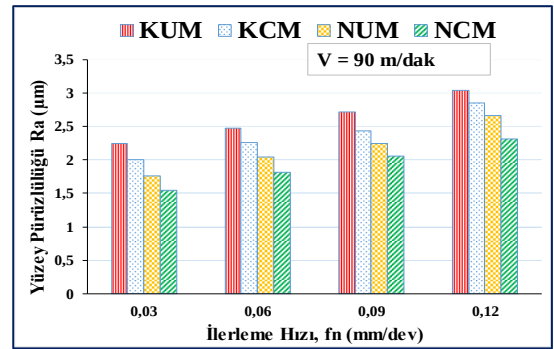
a)



b)

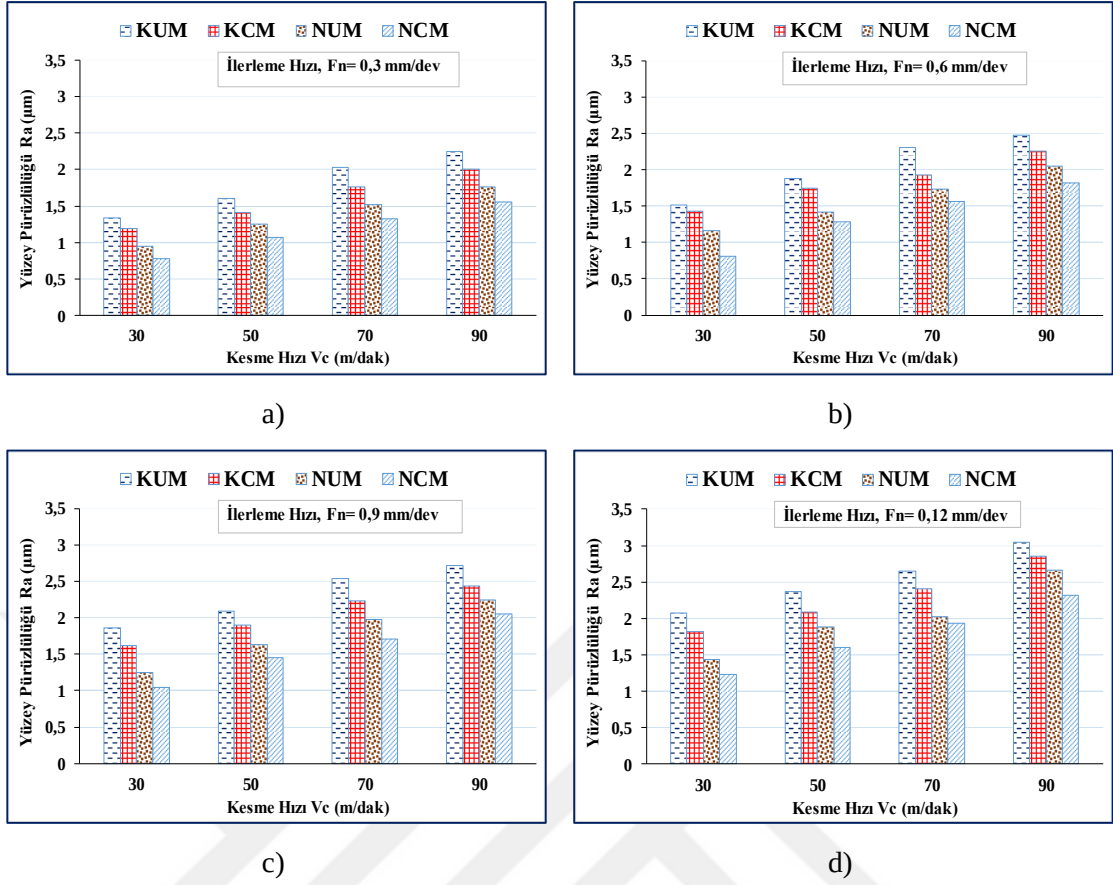


c)



d)

Şekil 5. 13. MMY delmede farklı kesme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri



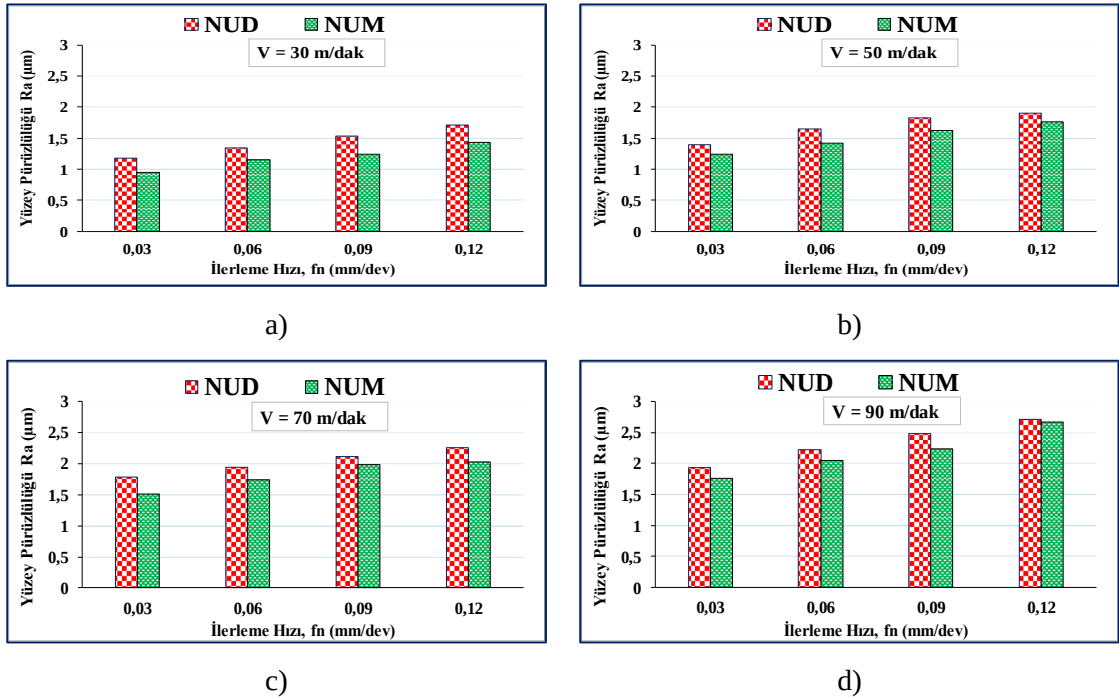
Şekil 5. 14. MMY delmede farklı ilerleme hızlarına bağlı yüzey pürüzlülük grafikleri

MMY ve kuru işleme şartlarında yapılan delik delme işlemlerindeki yüzey pürüzlülük değerlerini veren Şekil 5.11 – Şekil 5.14'teki grafikler incelendiğinde; normal iş parçasındaki pürüzlülük değerleri kriyojenik iş parçasına göre azaldığı görülmektedir. Bu durumun nedeni, kriyojenik işlem sonrasında iş parçasında meydana gelen yumuşamanın (sertlik azalması), kesici takıma yapışan BUE oluşumunu artırarak yüzey kalitesinin bozulmasına yol açmasıdır. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri, normal iş parçası üzerinde kaplamalı kesici takım (NCM) kullanılarak, 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilen delik delme işleminde elde edilmiştir. Buna karşılık, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ise 90 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme hızında yapılan delik delme işlemi sırasında meydana gelmiştir (KUD).

Şekil 5.11 – Şekil 5.14'teki yüzey pürüzlülük grafikleri incelendiğinde, kuru delme şartlarındaki deneylerdeki yüzey pürüzlülük değerleri ile MMY şartlarındaki delik delme deneylerindeki yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırıldığında MMY ortamındaki pürüzlülük değerlerinin daha iyi çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi MMY tekniğinde tercih edilen uçucu yağlayıcılar, takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi minimize

ederek kesme bölgesinde daha kararlı ve etkili bir yağ film tabakasının oluşmasına katkı sağlamaktadır Öndin vd. (2020). Kesme bölgesine soğutucu akışkanın iletilmesiyle birlikte yağlama işlevinin etkinliğinin artması, kesici takım ile talaş arasındaki sürtünmenin azalmasına neden olmakta; bu durumun, elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde iyileştirici etkiler oluşturduğu çeşitli çalışmalarda gözlemlenmiştir Erden vd. (2023). Literatürdeki çalışmalara bakıldığında MMY ortamında yapılan işlemlerde yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük çıktığı görülmektedir (Khan ve Dhar, 2016; Bedi vd., 2020, Çagan vd., 2020; Kuan-Ming, 2010; Abas vd., 2020).

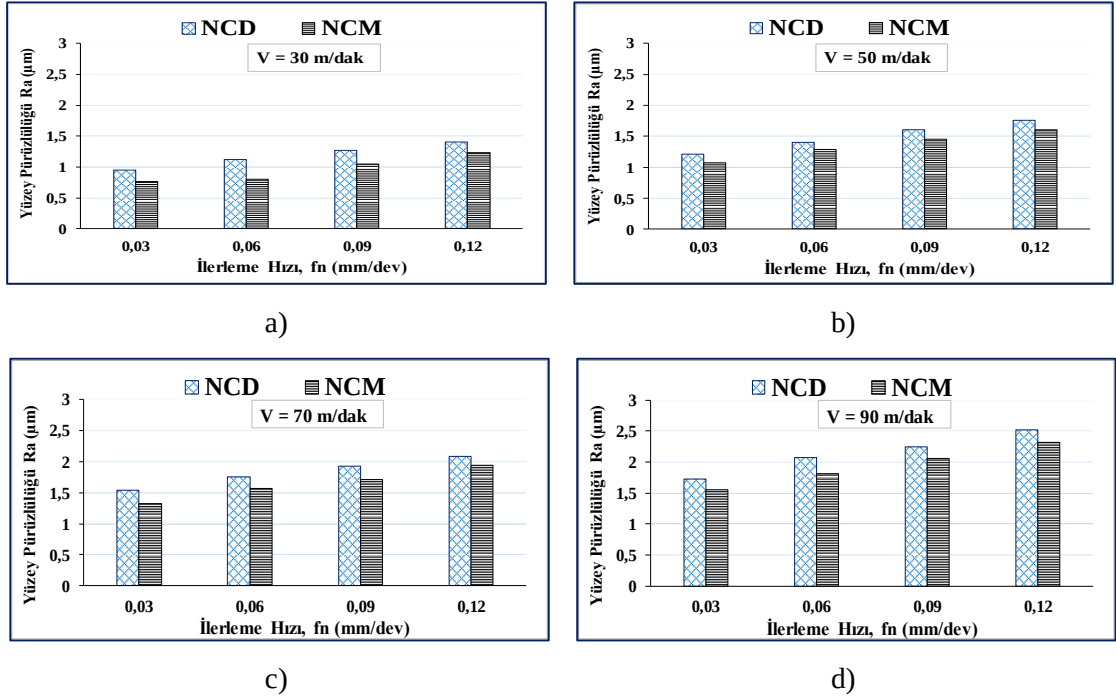
Şekil 5.11 – Şekil 5.14’teki grafikler incelendiğinde, Zr kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla Al 7075 iş parçasının delinmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları incelendiğinde, kaplamalı kesici takımlarda işlenen yüzeylerin pürüzlülük değerleri kaplamasız kesici takımlara göre daha düşük çıkmıştır. Bu durum kaplamalı kesici takım kaplamasız kesici takıma göre sürtünme katsayısını düşük olmasına ve kesici takıma yapışan BUE oluşumunun az olmasına atfedilmiştir. Kaplamasız kesici takım üzerinde BUE oluşumu kesici takım keskinliğini kaybetmesine ve kesici kenarın kırılmasına yol açmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Yapılan bu çalışmadaki EDS analizlerine bakıldığında kaplamasız kesici takımdaki BUE oluşumu kaplamalı kesici takıma göre daha fazla çıktığı görülmektedir.



Şekil 5. 15. Normal iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri

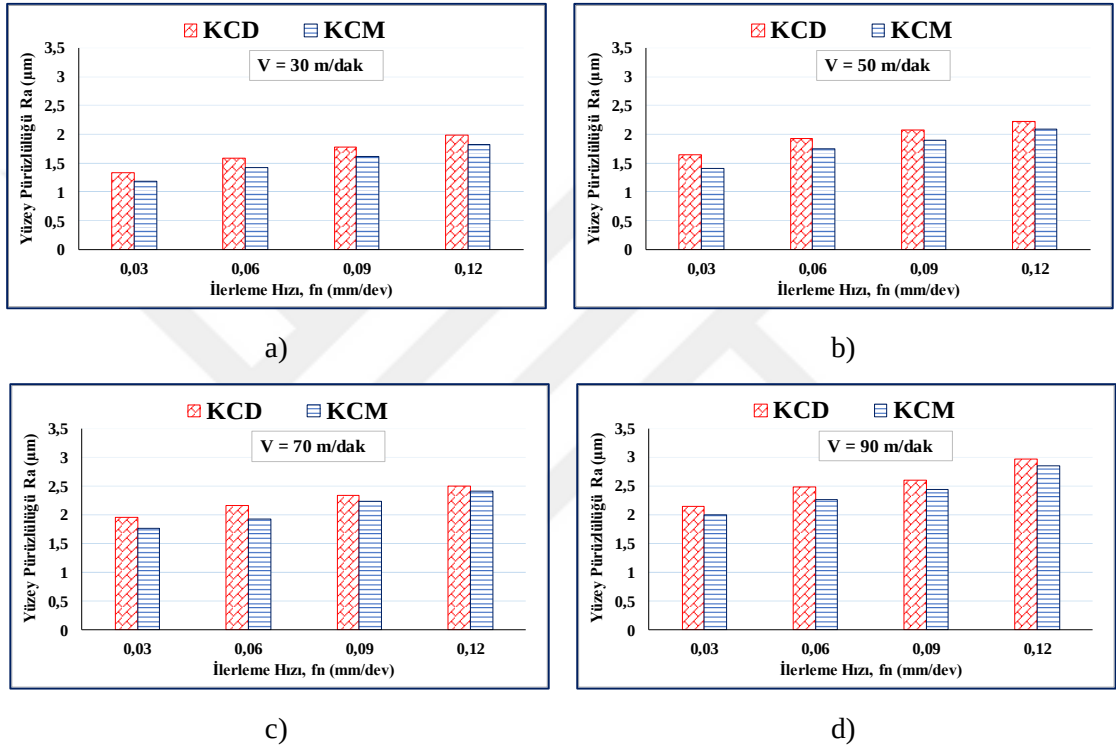
Şekil 5.15'te kuru ve MMY ortamında normal iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takım ile yapılan delik delme işlemleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; hem kuru hem de MMY ortamında kesme ve ilerleme hızları arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmektedir. Kaplamasız HSS kesici takım ile yapılan delik delme işleminde en düşük yüzey pürüzlülük değeri 0,03 mm/dev ilerleme ve 30 m/dak kesme hızı değerlerinde olduğu görülmüştür. Şekil 5.13'teki grafikler incelendiğinde MMY ortamında elde edilen pürüzlülük değerlerinin daha iyi çıktığı tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında MMY ortamında yapılan işlemlerde yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük çıktığı görülmektedir (Çagan vd., 2020; Kuan-Ming, 2010; Abas vd., 2020).

Şekil 5.16'da kuru ve MMY ortamında normal iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takım ile yapılan delik delme işlemleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; hem kuru hem de MMY ortamında kesme ve ilerleme hızları arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmektedir. MMY ile işlemede elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin kuru işleme şartlarına göre daha düşük çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi MMY tekniğinde tercih edilen uçucu yağlayıcılar, takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi minimize ederek kesme bölgesinde daha kararlı ve etkili bir yağ film tabakasının oluşmasına katkı sağlamaktadır (Öndin vd., 2020).



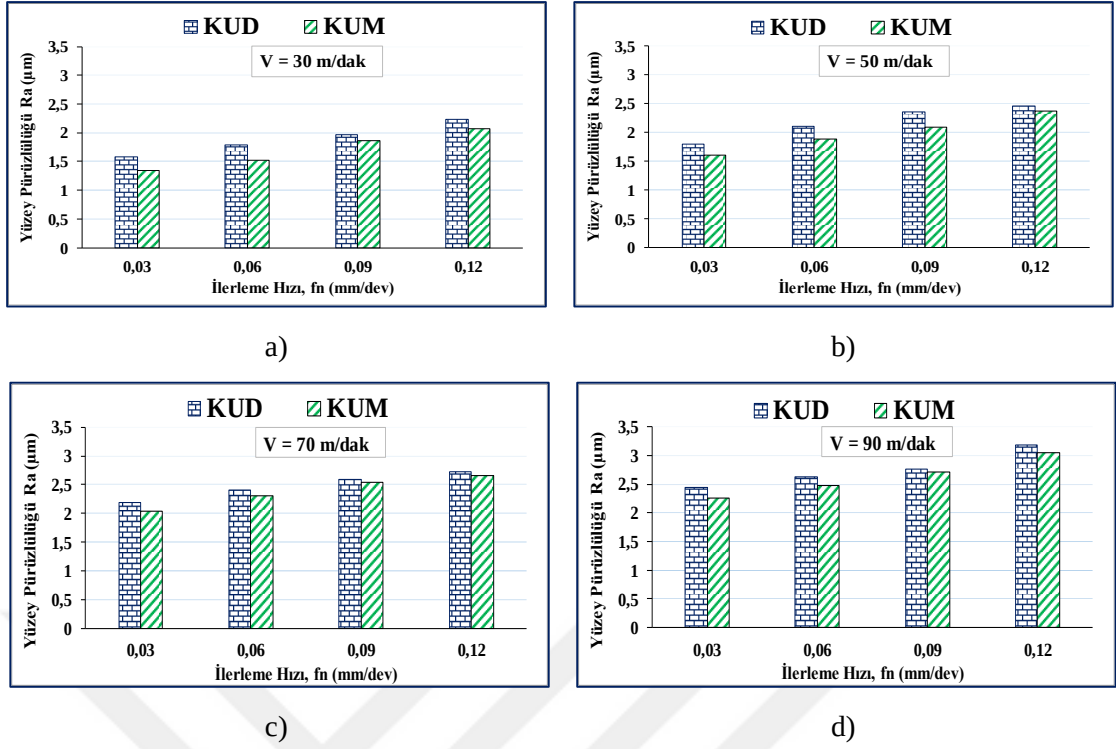
Şekil 5. 16. Normal iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takım ile yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri

Şekil 5.17’de kuru ve MMY ortamında kriyojenik iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delme işlemleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; en düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin MMY ortamında yapılan delik delme deneylerinde ($KCM < KCD$) gerçekleşmiştir. 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme hızında minimum yüzey pürüzlülük değerlerinin olduğu, 90 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme hızında da ise maksimum yüzey pürüzlülük değerlerinin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. 17. Kriyojenik iş parçası ve Zr kaplamalı HSS kesici takımla yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri

Şekil 5.18’de kuru ve MMY ortamında kriyojenik iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delme işlemleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde; en düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin MMY ortamında yapılan delik delme deneylerinde ($KUM < KUD$) gerçekleşmiştir. 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme hızında minimum yüzey pürüzlülük değerlerinin olduğu, 90 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme hızında da ise maksimum yüzey pürüzlülük değerlerinin olduğu belirlenmiştir.



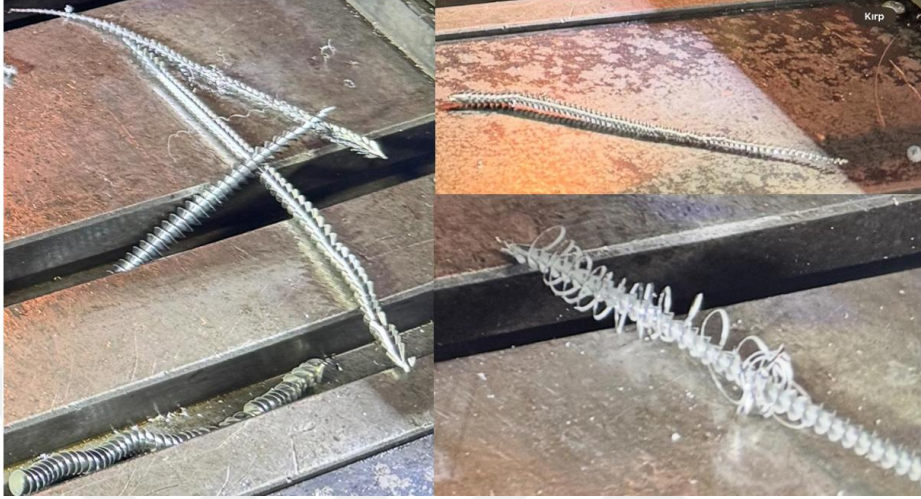
Şekil 5. 18. Kriyojenik iş parçası ve kaplamasız HSS kesici takımla yapılan delik delmede elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri

5.4. Al 7075 T651 Talaş Parçası SEM Görüntülerinin İncelenmesi

Talaşın şekli ve tipi yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve titreşim üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir. Talaşın yapısı, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve BUE oluşumu gibi işlenebilirlik kriterleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu yüzden, araştırmacılar çalışmalarında talaş morfolojisini incelemeye önem vermiştir. Yapılan deneylerde hem kuru hem de MMY işleme şartlarında iş parçaları üzerinde yapılan delik delme deneylerinde 16. delme sonucunda oluşan Şekil 5.19'daki sürekli uzun talaş numuneleri (helisel) SEM'de incelenmiş olup elde edilen görseller Şekilde 5.20 ve Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Şekil 5.19'daki talaşlar incelendiğinde talaş tiplerinin helisel olduğu görülmüştür. Literatürde benzer bir çalışmada Al 7075 alaşımının işlenmesi sırasında oluşan talaşların birçoğunun helisel formda meydana geldiği gözlemlenmiştir (Bican, 2021).

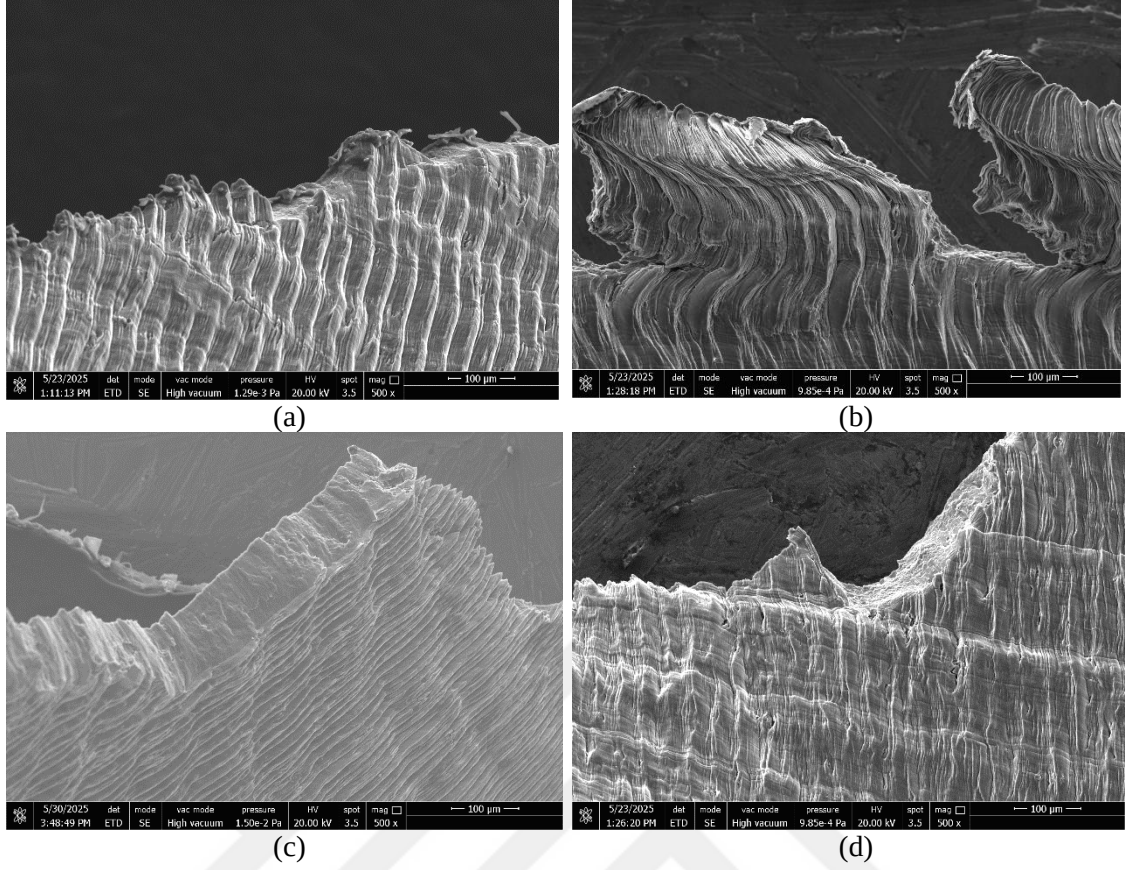
Helisel şeklindeki sürekli talaş, artan kesme hızıyla delme sırasında oluşur. Bu, sürekli talaşların yüksek kesme sıcaklığının bir sonucu olarak termal yumuşamanın neden olduğu malzeme gerilmesi nedeniyle oluştuğu literatürde ifade edilmiştir (Dahnel vd., 2022). Artan kesme hızıyla malzeme daha sünek hale gelir ve bu da sürekli talaş

oluşumuna yol açmaktadır. Ayrıca sürekli talaşlar genellikle istenmez çünkü talaşlar matkabın etrafına dolanıp kanallarda sıkışarak talaş tahliyesinde zorluğa neden olabilirler ve bu da sonuç olarak yüksek yüzey pürüzlülüğüne ve düşük matkap deliği kalitesine neden olur (Dahnel vd., 2022).



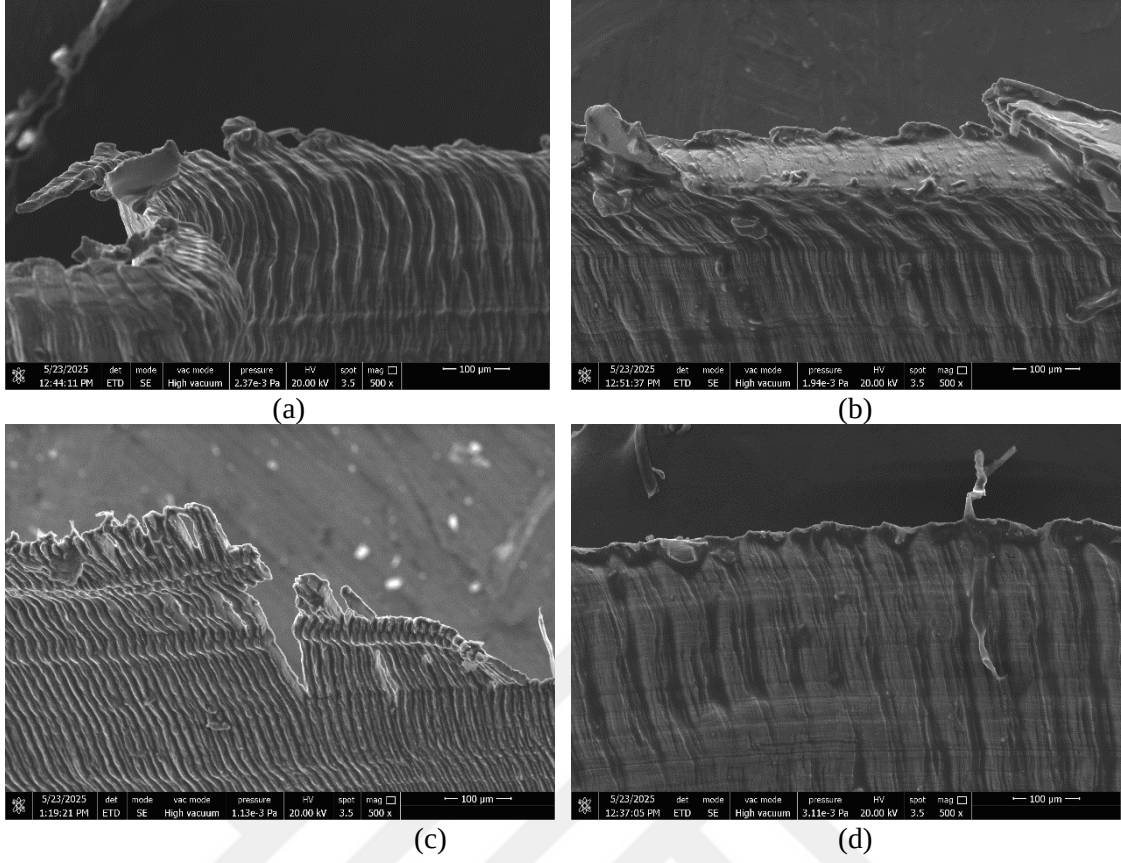
Şekil 5. 19. Talaş numuneleri

Şekil 5.20’de verilen SEM görüntüleri, sabit kesme parametrelerinde ve kuru işleme koşulları altında işlenmiş Al 7075-T651 alaşımına ait talaşların morfoloji göstermektedir. Al 7075-T651 işlenmesi sonucunda oluşan talaş morfolojilerini veren Şekil 5.20’deki SEM görüntüleri incelendiğinde talaşların yapı ve tipleri testere tipi ve lamelli yapı olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde, alüminyum malzemelerin yüksek kesme hızlarında işlenmesi sonucu oluşan talaşların testere tipi ve düzgün aralıklı lameller şeklinde meydana geldiği ifade edilmiştir (Bolat vd., 2022). Lamelli yapıdaki talaşlar, testere dişi benzeri bir talaş deseni oluşturan düşük ve yüksek kesme gerinim bantlarına sahiptir. Lamel yapıları, sünek malzemedeki termal veya elastomekanik işlem nedeniyle oluşur (Giasin 2017 ve Hans 2013). Testere tipi talaşlar, yüksek kesme hızlarında oluşan yüksek kesme sıcaklıklarından ve AL 7075 gibi malzemelerinin düşük ısı iletkenliklerinden kaynaklandığı literatürde ifade edilmiştir. Ayrıca, kesme düzleminde ortaya çıkan yüksek gerinim hızlarının testere tipi talaş oluşumuna yol açtığını belirtmişlerdir (Bolat vd., 2022).



Şekil 5. 20. Kuru işlem şartlarında iş parçalarının işlenmesi sonucu oluşan talaş parçalarının SEM görüntüleri a) NCD b) NUD c) KCD d) KUD

MMY koşulları altında işlenmiş Al 7075-T651 alaşımından elde edilen talaş parçalarının yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri Şekil 5.21’de verilmiştir. Şekil 5.21’de verilen talaş morfolojilerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, kuru işleme koşullarına kıyasla Şekil 5.20 daha düzenli, süreksizliği azalmış ve deformasyon bantları arasında daha homojen bir tabakalı yapı gözlenmektedir. Bu durum, MMY ortamında kesme bölgesine taşınan mikro miktarda yağın sürtünme ve sıcaklık artışını sınırlamasıyla açıklanabilir (Dhar, 2006 ve Khan, 2009). MMY’nin sağladığı minimum yağlama ve soğutma etkisi ile takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmeyi azaltarak talaşın yüzeyden daha kolay akmasını sağlamıştır. Bu etki sonucunda, ısıl yumuşama (thermal softening) yerine daha dengeli bir plastik deformasyon mekanizması baskın hale gelmiştir.



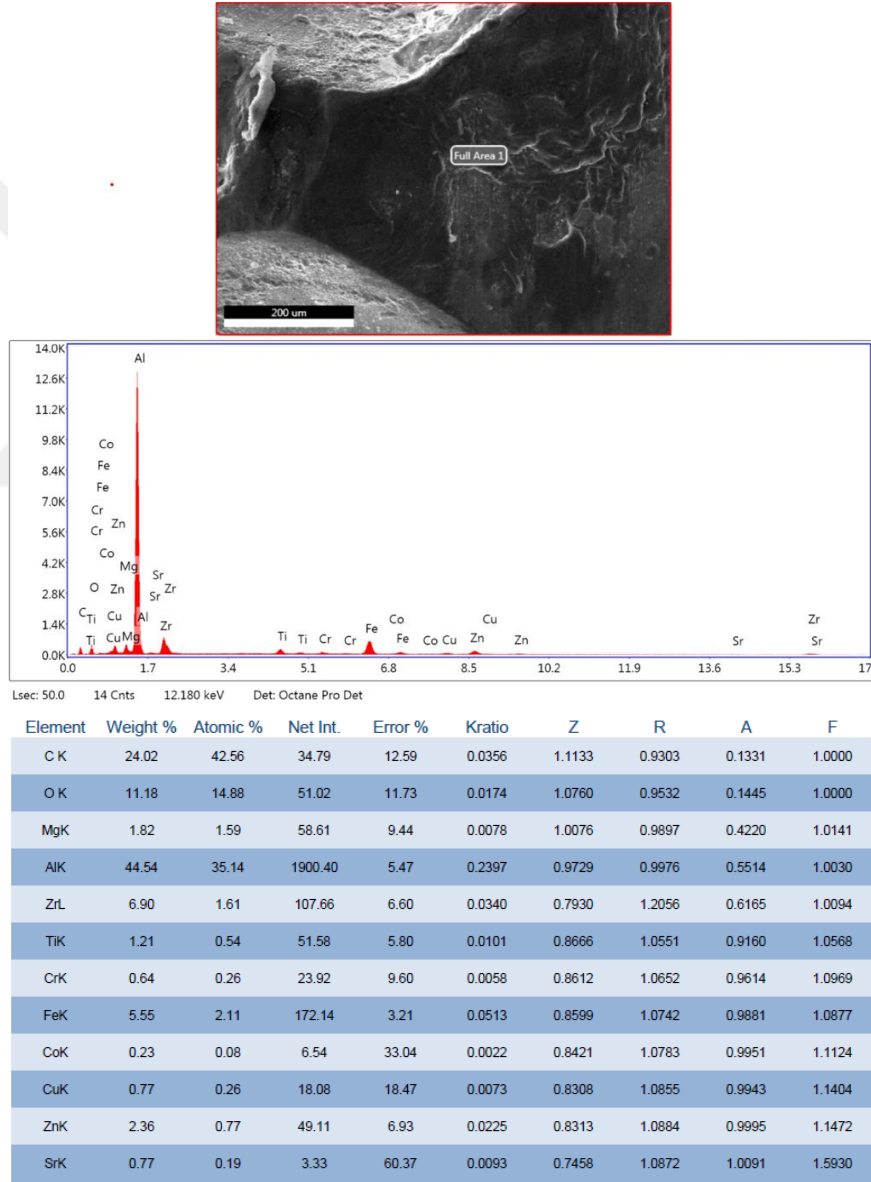
Şekil 5. 21. MMY işlem şartlarında iş parçalarının işlenmesi sonucu oluşan talaş parçalarının SEM görüntüleri a) NCM b) NUM c) KCM d) KUM

Şekil 5.20 ve 5.21'deki SEM görüntüleri incelendiğinde, Al 7075 iş parçasından oluşan talaşların testere dişi (tırtıklı) formda ve lamelli yapıda olduğu görülmektedir. Lamelli yapıların fazlalığı ve belirginliği, talaş içerisinde tırtıklı formlu yapıların yoğun olduğunu göstermektedir. Bu durum, kesici takım ile talaş arasındaki sürtünmenin neden olduğu deformasyonlar sonucunda, talaşın morfolojik yapısında testere dişi biçiminde oluşumların meydana geldiğini ortaya koymaktadır. MMY ortamında yapılan delik delme deneylerinde elde edilen talaşların, kuru işleme şartlarında elde edilen talaşlara göre tırtıklı yapısının daha az ve düzenli olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

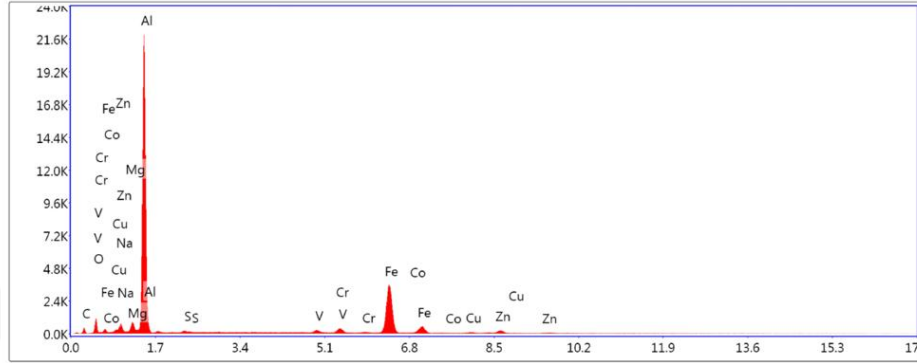
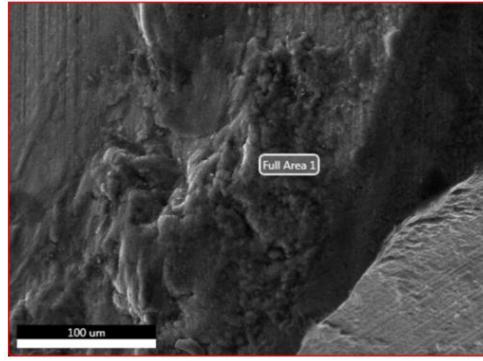
5.5. Kesici Takımlara Ait EDS Görüntülerinin İncelenmesi

Al 7075 T651 kriyojenikli iş parçası üzerinde kaplamalı ve kaplamasız uçlardan her biri için en yüksek işlem parametreleri olan 90 m/dak kesme hızı, 0,12 mm/dev ilerleme hızı ve 9 mm kesme derinliğinde kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarıyla kuru işleme şartlarında toplamda 122 adet delik delme işlemi sonrası EDS görüntüleri

incelenmiştir. Kaplamasız ve Zr kaplamalı HSS matkap uçlarına ait EDS (enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi) analizi Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te verilmiştir. EDS Analiz sonuçlarında yüzeyde tespit edilen başlıca elementlerin yoğun olarak Al, Fe, C ve O elementlerinin bulunduğunu göstermektedir. Bunun yanında daha düşük oranlarda Zn, Mg, Cr ve Cu elementleri de tespit edilmiştir. EDS analizine göre elde edilen elementlerin değerleri ile Tablo 4.1'de verilen Al 7075-T651 alaşımının kimyasal bileşimindeki değerler birbirleriyle benzer çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum kesici takıma yapışan talaşın Al 7075-T651 alaşımına ait olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. 22. Zr kaplamalı HSS matkap ucu EDS analizi



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	15.86	30.99	41.36	12.03	0.0233	1.1277	0.9258	0.1303	1.0000
O K	9.85	14.45	106.85	10.54	0.0201	1.0901	0.9488	0.1873	1.0000
NaK	0.00	0.00	0.02	29.68	0.0000	1.0009	0.9772	0.2394	1.0071
MgK	2.34	2.25	114.98	8.91	0.0086	1.0210	0.9857	0.3545	1.0130
AlK	49.03	42.66	3257.57	6.16	0.2288	0.9858	0.9937	0.4721	1.0027
S K	0.34	0.25	21.28	21.60	0.0016	0.9935	1.0155	0.4818	1.0108
V K	0.68	0.31	50.44	10.53	0.0063	0.8581	1.0571	0.9566	1.1372
CrK	1.09	0.49	80.26	5.59	0.0110	0.8726	1.0621	0.9755	1.1802
FeK	18.08	7.60	991.18	1.67	0.1653	0.8713	1.0713	0.9933	1.0564
CoK	0.29	0.12	14.50	25.73	0.0027	0.8532	1.0755	0.9949	1.0722
CuK	0.59	0.22	23.27	14.81	0.0053	0.8418	1.0828	0.9690	1.0955
ZnK	1.85	0.67	65.79	6.50	0.0169	0.8422	1.0859	0.9785	1.1069

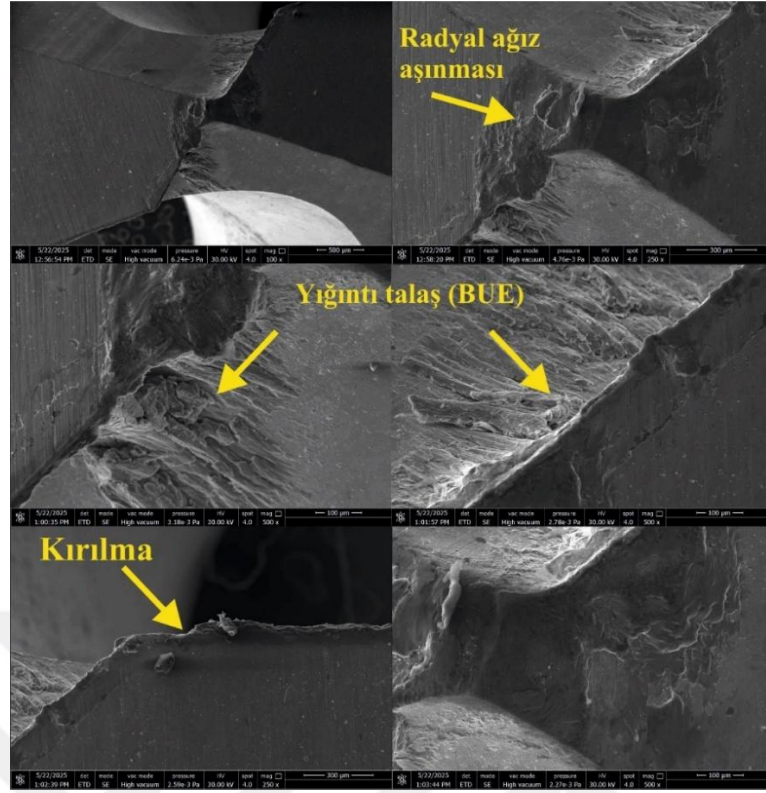
Şekil 5. 23. Kaplamasız HSS matkap ucu EDS analizi

Genel olarak kesici takımların talaş yüzeylerinde gerçekleştirilen analizleri sonucunda, yapışma aşınma mekanizmaları üzerinde ana alaşım elementlerinin etkili olduğu bilinmektedir. Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'teki EDS analizleri incelendiğinde kesici takım yüzeylerinde çoğunlukla Al ve Fe atomları tespit edilmiştir. Bu da ana alaşım elementinin kesici takım talaş yüzeyine yapışmasında etkili olduğu görülmektedir. Zr kaplamalı HSS matkap ucuna ait kesici takımda Al yapışması 12,6 K düzeylerinde iken kaplamasız kesici takımda Al yapışması 21,6 K seviyelerinde görülmektedir. Al yapışma oranı kaplamasız kesici takımda % 71,42 daha fazla oluşmuştur.

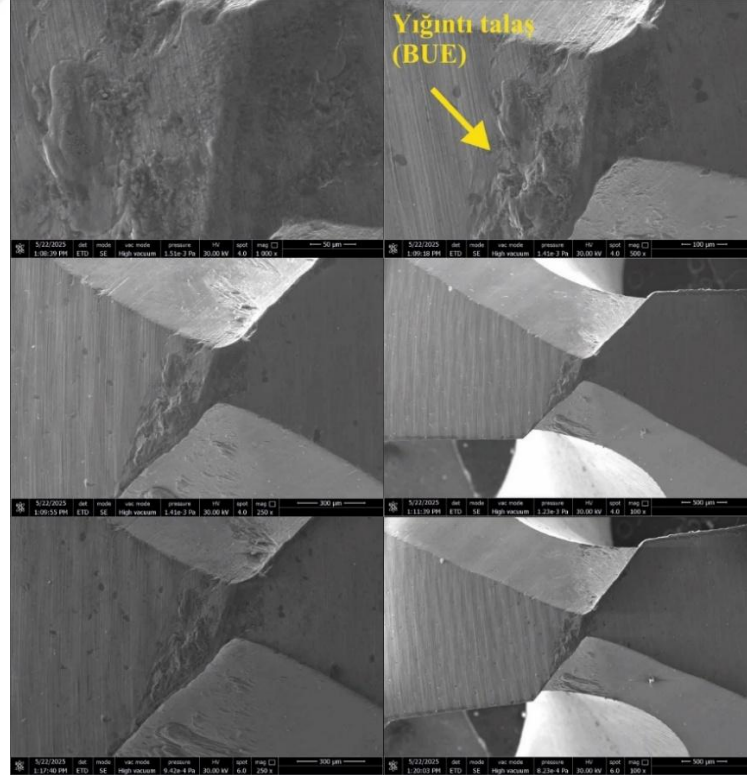
5.6. Kesici Takım SEM Görüntülerinin İncelenmesi

Takım aşınması, takım ömrünü, delinmiş deliğin işlenmiş yüzey kalitesini ve dolayısıyla delik kalitesini etkileyebilen önemli bir faktördür. Takım aşınması, kesici takımın önemli sayıda delik açılması birlikte oluşan özellikle kesme kenarlarında geometri ve boyutta meydana gelen değişikliktir. Takım aşınma deneyleri, en yüksek kesme parametreleri olan kesme hızı 90 m/dak, ilerleme hızı 0,12 mm/dev ve kesme derinliği 9 mm'de gerçekleştirilmiştir. Al 7075 T651 kriyojenikli iş parçası üzerinde Zr kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarıyla kuru işleme şartlarında toplamda 122 adet delik delme işlemi sonrası SEM görüntüleri incelenmiştir. Zr kaplamalı ve kaplamasız HSS matkap uçlarına ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir. Zr kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarda oluşan aşınma mekanizmalarında BUE oluşumu ön plana çıkmaktadır. Her iki kesici takım için yapılan EDS analiz sonuçlarına bakıldığında, Al iş parçasına ait talaşların kaplamasız kesici takımın kesici kenarlarında birikmesi ve yapışması Zr kaplamalı kesici takıma göre daha fazla meydana geldiği tespit edilmiştir. Al alaşımları gibi sünek malzemelerin işlenmesinde BUE oluşumu beklenen bir durumdur ve iş parçasının sünek oluşu talaşın kesici takıma sıvanmasını artırmaktadır.

Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'teki kaplamasız kesici takım aşınma görüntüleri ile Zr kaplamalı kesici takıma ait aşınma görüntüleri karşılaştırıldığında kaplamasız kesici takımın kenarlarında daha fazla kırılmalar meydana gelmiştir. Yüksek ilerleme ve kesme hızlarında Al 7075- T6 iş parçasının işlenmesi sonucu oluşan yüksek kesme sıcaklığı ve basınç nedeniyle talaşın kesici takımın kesme kenarlarına yapıştığında adhesif aşınma meydana gelir ve kesici takım daha fazla zorlanarak yapışan malzemenin kopmasıyla kenar kırılmasına neden olabilir (Dahnel vd., 2022). Zr kaplamalı kesici takımın kaplamasız kesici takıma göre BUE ve kesici kenarlardaki kırılmaların daha az olması Zr kaplamanın sağlamış olduğu sürtünme katsayısının düşük olmasına ve kaplamanın sağlamış olduğu keskinliğe atfedilmiştir. Genel olarak takım aşınmaları sonuçları ile kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları birbirini doğrulamaktadır. En yüksek kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri kaplamasız kesici takımla işleme sonucu elde edilmiştir. En düşük kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri ise Zr kaplamalı kesici takımla işleme sonucu oluşmuştur.



Şekil 5. 24. Kaplamasız HSS matkap ucu SEM görüntüsü



Şekil 5. 25. Zr kaplamalı HSS matkap ucu SEM görüntüsü

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış Alüminyum (Al7075-T651) alaşım iş parçalarının Zr kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar kullanılarak hem kuru hem de MMY ortamda delinmesi sonucu oluşan kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri, kesici takım aşınmaları ve talaş morfolojisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular maddeler halinde verilmiştir.

- Al 7075-T651 iş parçasının kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçaları üzerinde yapılan Vickers sertlik ölçümlerinde normal iş parçasına ait sertlik değeri 149,56 HV iken kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasında sertlik değeri 132,66 HV olarak bulunmuştur. Kriyojenik işlem sonrası sertlik değerinin %11,30 oranında azaldığı görülmüştür.
- Kuru ve MMY işleme şartlarında yapılan delik delme işlemlerinde kesme hızı ve ilerleme oranının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Yapılan delik delme türüne göre ilerleme kuvvetlerine ait büyüklük değerleri NUD>KUD>NCD>KCD şeklinde gerçekleşmiştir. En düşük ilerleme kuvvet değeri 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme oranında KCD işleme şartlarında tespit edilmiştir. En yüksek ilerleme kuvveti ise 90 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme oranında NUD işleme şartlarında elde edilmiştir.
- Alüminyum (Al7075-T651) alaşım malzemesinin delinmesinde ilerleme kuvvetleri üzerinde kesme hızı ve ilerleme oranının önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Kaplamasız kesici takımlarla elde edilen ilerleme kuvvetleri Zr kaplamalı kesici takımlara göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.
- MMY işleme şartlarında yapılan delik delme işlemlerinde ilerleme ve kesme hızının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Yapılan delik delme türüne göre ilerleme kuvvetlerine ait büyüklük değerleri NUM>KUM>NCM>KCM şeklinde gerçekleşmiştir. En düşük ilerleme kuvveti 30 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme oranında kriyojenik iş parçası üzerinde Zr kaplamalı kesici takım

(KCM) ile yapılan delik delme deneyleri olmuştur. En yüksek ilerleme kuvveti ise 90 m/dak kesme hızı ve 0,03 mm/dev ilerleme oranında normal iş parçası üzerinde kaplamasız kesici takım (NUM) ile yapılan deneylerde gerçekleşmiştir. MMY işleme şartlarında yapılan delik delme deneyleri kuru delmeye göre ilerleme kuvvetleri daha düşük değerlerde görülmüştür.

- Kuru işleme şartlarında yapılan delik delme işlemlerinde normal iş parçasındaki pürüzlülük değerleri kriyojenik iş parçasına göre azaldığı görülmektedir ($NUD < KUD$ – $NCD < KCD$). Bu sebebi, kriyojenik işlem sonrasında iş parçasında meydana gelen yumuşamanın (sertlik azalması), kesici takıma yapışan BUE oluşumunu artırarak yüzey kalitesinin bozulmasına yol açmasıdır.
- Kuru işleme şartlarında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri, normal iş parçası üzerinde Zr kaplamalı kesici takım (NCD) kullanılarak, 30 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızıyla gerçekleştirilen delik delme işleminde elde edilmiştir. Buna karşılık, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ise 90 m/dak kesme hızı ve aynı ilerleme hızında (0,12 mm/dev) yapılan delik delme işlemi sırasında meydana gelmiştir (KUD).
- MMY işleme şartlarında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri, normal iş parçası üzerinde Zr kaplamalı kesici takım (NCM) kullanılarak, 30 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızıyla gerçekleştirilen delik delme işleminde elde edilmiştir. Buna karşılık, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ise 90 m/dak kesme hızı ve aynı ilerleme hızında (0,12 mm/dev) yapılan delik delme işlemi sırasında meydana gelmiştir (KUM). MMY şartlarında elde edilen ilerleme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri kuru işleme şartlarına göre daha düşük çıkmıştır.
- Zr kaplamalı kesici takımlarla elde edilen deneysel sonuçlar kaplamasız kesici takımlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Kriyojenikli iş parçasının işlenmesi esnasında elde edilen ilerleme kuvvetleri kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasına göre daha düşük çıkarken yüzey pürüzlülüğü değerleri açısından ise bu durum tam tersi olmuştur.
- AL 7075 iş parçasından oluşan talaşların SEM görüntüleri incelendiğinde, talaşların testere dişi (tırtıklı) formda ve lamelli yapıda olduğu görülmüştür.
- Deneylerde kullanılan kesici takımlara ait EDS analizlerinde alaşım elementinin kesici takım talaş yüzeyine yapışmasında etkili olduğu görülmektedir. Zr kaplamalı HSS matkap ucuna ait kesici takımda Al yapışması 12,6 K düzeylerinde iken kaplamasız

kesici takımda Al yapışması 21.6 K seviyelerinde görülmektedir. Al yapışma oranı kaplamasız kesici takımda % 71,42 daha fazla oluşmuştur.

- Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasındaki mikro yapı kriyojeniksiz iş parçasına ait mikro yapıya göre tanelerde bir küçülme tespit edilmiştir. Kriyojeniksiz iş parçasındaki mikro yapı içerisinde yer alan taneler ince ve uzun şeklinde görülmüştür.
- Delik delme deneyleri sonucunda kesici takım uçlarından alınan parçalarının SEM görüntülerinde kaplamasız HSS matkap ucunun kesici kenarında, BUE oluştuğu, kesici uçta radyal ağız aşınması ve bazı kesici kenarlarda kırılmalar gözlemlenmiştir. Zr kaplamalı HSS matkabın kaplamasız matkaba göre daha az aşındığı tespit edilmiştir.

6.2 Öneriler

- Kriyojenik işlemin, talaş kaldırma sürecinde meydana gelen sıcaklık ve titreşim üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenebilir.
- AL 7075 iş parçasının delik delme işlemlerinde farklı kesici takımlar ve soğutma yöntemleri kullanılarak incelenebilir.
- Kriyojenik işlemin kesici takımlara uygulanması sonucu elde edilen deneysel verilerin istatistiksel analizleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abas, M., Sayd, L., Akhtar, R., Khalid, Q. S., Khan, A. M., & Pruncu, C. I., (2020). "Optimization of machining parameters of aluminum alloy 6026-T9 under MQL-assisted turning process". *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10916-10940.
- Abu-Mahfouz, I., (2003). Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 707–720
- Akben, U., , (2009). Minimum miktarda yağlama (MMY) ile kesmenin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akıncıoğlu, S., Gökkaya, H., Uygur, İ., (2015). A review of cryogenic treatment on cutting tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 1609–1627.
- Akkurt, M. (1998). Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, Birsan Yayınevi, Ankara, Türkiye 117-181.
- Alpas, A.T., Bhowmick, S. (2008). "Minimum quantity lubrication drilling of aluminium– silicon alloys in waterusing diamond-like carbon coated drills", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*
- Altuntaş G. (2024). Al 7075 Alaşımına Uygulanan Kriyojenik İşlemin Yapısal Özelliklere Ve Çökelti Kinetiğine Etkisinin İncelenmesi Gazi Üniv. Doktora tezi.
- Argıncıklıgil A. (2019). Çeliklerde Vickers Sertlik Değerlerine Uygulanan Yük Etkisinin İncelenmesi Sakarya Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi.
- Arslan, H., Onmaz, F., & Orhan, S. (2024). 7075 Alüminyum Malzemenin Çift Milli Freze ile İşlenmesi Sırasında En Uygun Kesici Parametrelerinin Belirlenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(1), 117-126.
- Attanasio, A., Gelfi, M., Giardin, C., Remino, C., (2006). Minimal quantity lubrication in turning: effect on tool wear, *Wear*, Vol.260 (3), No.333–338.
- Aydın, E., & Nalbant, M. (2020). The effect of drill point angles on drillability in CFRP/Al-7075 stacking drilling. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2).

- Bagci, E., & Özcelik, B. (2005). Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method during dry drilling of Al 7075-T651. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Bajaj, P., (2008). Mechanical behaviour of aluminium based metal matrix composites reinforced with sic and alumina, Master of Engineering in Production & Industrial Engineering, The University of Thapar, Patiala-147004, India.
- Bakkal, M.; Shih, A.J.; McSpadden, B.S.; Scattergood, R.O. (2005). “Thrust force, torque, and tool wear in drilling the bulk metallic glass” *International Journal of Machine Tools&Manufacture* 45 863-872.
- Bedi S.S., Behera G.C., Datta S., (2020). Effects of Cutting Speed on MQL Machining Performance of AISI 304 Stainless Steel Using Uncoated Carbide Insert, Application Potential of Coconut Oil and Rice Bran Oil as Cutting Fluids, 45, 8877–8893.
- Bektas, M. (2004) “Fe-Mn Alaşımlarının Mikrosertlik Ölçümleri,” Süleyman Demirel Univ, Isparta.
- Bican, O., & Pul, M. (2021). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Alaşım Cinsinin Kesici Takım Davranışı, Talaş Biçimi Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 9-17.
- Bolat, Ç., Ergene, B., Karakılınç, U., & Gökşenli, A. (2022). Investigating on the machinability assessment of precision machining pumice reinforced AA7075 syntactic foam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(5), 2380-2394.
- Braga, D.U., Diniz, A.E., Miranda, G.W.A., (2002). Coppini, N.L., Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 122, Issue 1, Pages 127-138.
- Cagan, S. C., Venkatesh, B., & Buldum, B. B., (2020). “Investigation of surface roughness and chip morphology of aluminum alloy in dry and minimum quantity lubrication machining”. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1122-1126. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.547>.
- Candane, D., Alagumurthi, N., & Palaniradja, K. (2013). Effect of cryogenic treatment on microstructure and wear characteristics of AISI M35 HSS. *International journal of materials science and applications*, 2(2), 56-65.
- Chatha, S. S., Pal, A., & Singh, T., (2016). “Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication”. *Journal of Cleaner Production*, 137, 537-545.
- Çakır A. (2009). Al 7075 ve Al 6013 Alüminyum Malzemelerin Delme Operasyonları Esnasındaki Kesme Parametrelerinin İncelenmesi Y. Lisans Tezi Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enst.

- Çakır, A. (2015). AA 7075 ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi Doktora tezi. Gazi Üniversitesi.
- Çaydaş U., Çelik M. (2017). AA 7075-T6 Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Sıcaklığı Ve İlerleme Kuvvetine Etkilerinin Araştırılması Journal of Polytechnic,; 20 (2) : 419-425 Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
- Çiçek A, Ekici E, Uygur İ, Akincioğlu Ç ve Kıvak T (2012). “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde derin kriyojenik işlemin takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması,” International Journal of Technologic Sciences, c. 4, s. 1, ss. 1-9, Elazığ.
- Dahnel, A. N., Fauzi, M. H., Raof, N. A., Mokhtar, S., Khairussaleh, N. K. M. (2022). Tool wear and burr formation during drilling of aluminum Alloy 7075 in dry and with cutting fluid. Material Today Proceedings, 59, 808-813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.110>.
- Dahnel, A. N., Naiman, M. N. I., Farid, M. A. M. M., Rahman, A. F. A., & Mydin, N. M. M. (2022). Drilling of 7075 aluminum alloys. In Aluminium Alloys-Design and Development of Innovative Alloys, Manufacturing Processes and Applications. IntechOpen.
- Davim, J. P., (2012). “MQL: A Review on Micro-Lubrication Systems in Machining Processes”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57, 17-25.
- Davis, J. R. (1993). “Aluminum and Aluminum Alloys”, ASM International, pp. 351-416.
- Davis, J. R. (1993). Aluminum and aluminum alloys. New York: ASM international, 85-92.
- Degarmo, E. P., Black, J. T., & Kohser, R. A., (2011). “Materials and Processes in Manufacturing”. John Wiley Sons
- Demir, E., ve Toktaş, İ., (2014). AISI D2 çeliğine uygulanan farklı bekletme sürelerindeki derin kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi, ISITES 2014 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science , Karabük, 1-12.
- Demir, Z., Adiyaman, O., Yakut, R. (2017). A7075-T651 Alaşımının sürtünmeli delinmesinde ön-delik çap ve derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne ve kovanın geometrik boyutlarına etkisinin araştırılması. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7(2), 228-240.
- Demirel, M. Y. ve Karaağaç, İ. (2019). “7075-T6 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Tavlama İşleminin Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması”, Journal of Polytechnic, 0900(2), ss. 283–289. doi: 10.2339/politeknik.534322.

- Dhar, N.R., Ahmed, N.T., Islam, S., (2007). An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 748-753.
- Dhar, N.R., Kamruzzaman, M., Ahmed, M., (2006). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.172, No.299–304.
- Erden, M. A., Uzun, F. G., Akgün, M., & Gökçe, H., (2023). “Influence of Ti and Nb addition on the microstructure, mechanical, and machinability properties of 316L stainless steel fabricated by powder metallurgy”. *Materials Testing*, 65(8), 1237-1253.
- Ertunç, H. M. ve Sevim, İ., (2001). Kesici takımların aşınmasını gözlemleme üzerine yapılan çalışmalar, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 55 – 62.
- Evans, K., (2020). “Impact of Feed Rate on Drilling Quality”. *Journal of Mechanical Engineering*, 38(2), 189-202.
- Farid, A., Sharif, S., Namazi, H., (2009). Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity when drilling and hole making in Inconel 718. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1), 564-569.
- Furness, R., Shih, A., Stephenson, D., & Tai, B. (2017). Minimum quantity lubrication for sustainable machining. *Encyclopedia of sustainable technologies*, 477-485.
- Giasin, K. (2017). *Machining Fibre Metal Laminates and Al2024-T3 aluminium alloy*. University of Sheffield.
- Gogte, C. L., Likhite, A., Peshwe, D., Bhokarikar, A., & Shetty, R. (2014). Effect of cryogenic processing on surface roughness of age hardenable AA6061 alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(6), 710-714.
- Gök M. (2023). Hafif metal alaşımlara (Al-Si-Cu-Ni-Mg) farklı oranlarda zirkonyum (Zr) ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Munzur Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tunceli, 1-114.
- Güleryüz K. ve Kaçar R., (2011). "Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11).
- Günay, M., (2003). "Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 68-72.
- Gürbüz, H., Baday, Ş., & Gönülaçar, Y. E. (2017). Minimum miktarda yağlamanın frezeleme işlemleri üzerine etkisinin araştırılması: Derleme. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 59-78.

- Hagiwara, M., Chen, S., Jawahir, I.S., (2009). Contour finish turning operations with coated grooved tools: Optimization of Machining Performance, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 332-342.
- Hans Kurt Toenshoff and Berend Denkena. (2013). *Basics of cutting and abrasive processes*. Springer.
- Hatch, J. E. (1984). "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", American Society for Metals.
- Hocheng, H., (2012). "Machining technology for composite materials: Principles and practice". Woodhead Pub., Cambridge, UK; Philadelphia, PA.
- Hüseyinoğlu, M., Tosun, N., (2009). 7075 Alüminyum alaşımlarının frezelenmesinde minimum soğutma sıvısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)
- Jha, A. R. (2011). *Cryogenic technology and applications*. New York: Elsevier, 78-82.
- Kalsi, N. S., Sehgal, R., & Sharma, V. S. (2014). Effect of tempering after cryogenic treatment of tungsten carbide–cobalt bounded inserts. *Bulletin of Materials Science*, 37(2), 327-335.
- Kannan, C., Varun Chaitanya, C. H., Padala, D., Reddy, L., Ramanujam, R., & Balan, A. S. S., (2020). "Machinability studies on aluminium matrix nanocomposite under the influence of MQL", *Materials Today: Proceedings*, 22, 1507-1516. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.068>.
- Kaplan, Y., (2010). Delik delmede farklı parametrelerin kesme kuvveti, moment, titreşim, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve çapak oluşumuna etkileri, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-108.
- Karayel, D., (2008). "Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3125-3137.
- Kayalı, E. S. C. Ensarı, F. Dikeç, (1996). "Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri," İstanbul.
- Khan, M. M. A., Dhar, N. R., & Mithu, M. A. H. (2009). "Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on cutting temperature, chip, and dimensional accuracy in turning AISI 1040 steel." *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15–16), 5573–5583.
- Khan, MMA, Dhar NR., (2016). Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI–1060 steel, *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 7, 1790–9.

- Khanna, N., Agrawal, C., Gupta, M. K., Song, Q., (2020). Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy, *Tribology International*, 143.
- Kocabıçak, A. C. (2019). Kaplamalı ve kaplamasız HSS matkap uçlarının deney tasarımı yöntemiyle performansının optimizasyonu Master's thesis, Marmara Üniversitesi.
- Kuan-Ming Li, Shih-Yen Chou, (2010). Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.210, No.2163–2170.
- Kumar, S., et al., (2013). “Cost-Benefit Analysis of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining”. *Procedia CIRP*, 8, 62-67.
- Kutlu, L. (2008). “AL2024-T4 Alüminyumun Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplanmış Matkaplarla Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi ve Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu ”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., İstanbul 63-65.
- Lee, C., (2020). “Optimizing Cutting Speed in Drilling Operations”. *Advanced Manufacturing Journal*, 41(5), 257-276.
- Lulay, K. E., Khan, K., & Chaaya, D. (2002). The effect of cryogenic treatments on 7075 aluminum alloy. *Journal of materials engineering and performance*, 11(5), 479-480.
- Luo, A. A., & Sachdev, A. K., (2014). “Magnesium and Aluminum Alloys”. *JOM*, 66(2), 245- 254.
- Mavi, A., Kaplan, Y., & Aksoz, S. (2021). Effects of aging and deep cryogenic treatment on wear behavior of Al7075 Alloy. *Journal of Tribology*, 143(12), 121702.
- Mondolfo, L. F., (1976). “Aluminum Alloys”, *Structure and Properties*.
- Murray, J. L., (1984). “The Aluminum-Silicon System”. *International Metals Reviews*, 29(1), 125-132.
- Nouari, M., List, G., Girot, F., Géhin, D. (2005). Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12-13), 1436-1442. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.026>.
- Ogawa, M, Inose, M., Arai, M., Saga T., (1994). Micro drilling of 5056 wrought aluminum alloy, *Journal of Japan Institute of Light Metals (Japan)*, 44(9):486-491.
- Öndin, O., Kıvak, T., Sarıkaya, M., & Yıldırım, Ç. V., (2020). “Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel”. *Tribology International*, 148, 106323.

- Özger G. (2024). Kriyojenik İşlem Görmüş Matkaplar İle Aa 7075 Alüminyum Alaşımının MQL Destekli Delinmesinde Kesme Performansının Deneysel Ve İstatiksel Araştırılması Yüksek Lisans Karabük Üniversitesi.
- Pirtini M., Lazoglu I., (2005). Forces and hole quality in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1271-1281.
- Podgornik, B., Leskovšek, V., & Vižintin, J. (2009). Influence of deep-cryogenic treatment on tribological properties of P/M high-speed steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(7-8), 734-738.
- Rahman, M., et al. (2009). “Application of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining”. *Journal of Cleaner Production*, 17(6), 877-887.
- Rahman, M., Kumar, A.S., Salam, M. U., (2002). Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.42, No.539–547.
- Sahin, Y. (2000). Talas Kaldırma Prensipleri II , Star ofset-Selale ofset, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara.
- Saini, A., Dhiman, S., Sharma, R., Setia, S., (2014). Experimental estimation and optimization of process parameters under minimum quantity lubrication and dry turning of AISI-4340 with different carbide inserts, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (6), 2307-2318.
- Sandvik Coromant (2008). Kesici Takım El Klavuzu Automotive aluminium solutions. İsveç .
- Santos, A. D., et al., (2013). “Effect of MQL on Machining Performance of Aluminium Alloys”. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 482-491.
- Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A., & Ezugwu, E. O. (2016). Machining of aluminum alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 3067-3080.
- Schweitzer, P. A., (2003). “Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties”, (Vol. 19). CRC Press.
- Sekmen, M., Günay, M., & Şeker, U. (2015). Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi. *Politeknik dergisi*, 18(3), 141-148.
- Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G. M., Mandal, U. K., & Mondal, S. P., (2021). “Eco-friendly cutting fluids in minimum quantity lubrication assisted machining: A review on the perception of sustainable manufacturing”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 249-280.

- Senthilkumar, D., & Rajendran, I. (2011). Influence of shallow and deep cryogenic treatment on tribological behavior of En 19 steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(9), 53-59.
- Sharma, A. K., Tiwari, A. K. ve Dixit, A. R., (2016). Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review, *Journal of cleaner production*, 127, 1-18.
- Sharman, A. R. C., Amarasinghe, A., Ridgway, K., (2008). Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1-3), 424-432.
- Silva, L. R., et al., (2012). "Tool Wear and Surface Finish in MQL Machining". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 52(5), 48-56.
- Sonar, T., Lomte, S., and Gogte, C. (2018). Cryogenic treatment of metal—a review. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 25219-25228.
- Sreejith, P.S., (2008). Machining of 6061 aluminium alloy with MMY, dry and flooded lubricant conditions, *Materials Letters*, Vol.62, No.276–278.
- Srikant, R. R., et al., (2011). "Environmental Impact and Cost Analysis of MQL Machining". *Environmental Science & Technology*, 45(13), 5532-5538.
- Starke Jr, E. A. and Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2-3), 131-172.
- Şahin, Y., (2001). Talaş Kaldırma Prensipleri I, Nobel Yayın Dağıtım, sf. 1-5, 77-82, 146-171, 190-233, 249-287, 300-312, 335-420, 469 Ankara.
- Teke, E. (2024). Alüminyum 5083-H111 Malzemenin Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları İle Optimizasyonu Sakarya Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Teodoriu, C., & Bello, O., (2021). "An Outlook of Drilling Technologies and Innovations": Present Status and Future Trends. *Energies*, 14, 4499.
- Totten, G. E., MacKenzie, D. S., (2003). "Handbook of Aluminum: Volume 1: Physical Metallurgy and Processes". CRC Press.
- Tönshoff, H. K., Spintig, W., König, W., & Neises, A., (1994). "Machining of Holes: Developments in Drilling Technology". *CIRP Annals*, 43(2).
- Trent, E.M., Wright, P.K., (2000). *Metal Cutting*, sf. 27-30, 44, 64-165, 3-48 Butterworth-Heinemann Ltd, 4rd ed.
- Uçak, N. ve Çiçek, A., (2018). The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills, *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 662-673.

- URL-1 : <https://www.aircraftaluminium.com/a/aluminium-7075-t651-vs-7075-t6.html>
Erişim Tarihi : 05/03/2025
- URL-2 : https://www.spacematdb.com/spacemat/manudatasheets/alcoa_alloy_7075.pdf
Erişim Tarihi : 05/03/2025
- URL-3 : <https://www.aerospace-aluminum.com/blog/7075-t6-vs-7075-t651> Erişim Tarihi : 05/03/2025
- URL-4 : <https://www.makinaegitimi.com/rayba-ve-raybalama-nasil-yapilir/> Erişim Tarihi : 05/03/2025
- URL-5 : <http://www.frekansmakina.com/mqlnedir.php> Erişim Tarihi : 16.01.2025
- Walker, T. A (2015). Guide to Machining with Minimum Quantity Lubrication. Unist.
- Wei, L., Wang, D., Li, H., Xie, D., Ye, F., Song, R. and Wu, S. (2018). Effects of cryogenic treatment on the microstructure and residual stress of 7075 aluminum alloy. *Metals*, 8(4), 273.
- Wilkins, C. (1999). Cryogenic processing; the big chill. *EDM Today*, 36-44.
- Yakut H., (2009). Al 7075 Alüminyumun Matkaplarla Delinmesinde Kesme Parametreleri İle Sıcaklık Arasındaki İlişkinin Deneysel İncelenmesi Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Yanartaş, S. (2023). Nano-Gümüş ve h-BN Katkılı Yağların MQL Ve Sürekli Akış Yöntemleri Kullanılarak Tribolojik Performans Odaklı İncelenmesi Selçuk Üniv. Fen Bilimleri Enst Yüksek Lisans Tezi.
- Yaşar, N. (2019). Thrust force modelling and surface roughness optimization in drilling of AA-7075: FEM and GRA. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(10), 4771-4781. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0918-5>.
- Yıldırım, Ç., Kıvak, T. ve Erzincanlı, F., (2015). Minimum Miktarda Yağlama Tekniğinin Delme ve Taşlama Operasyonlarındaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme. 6, 6. ulusal talaşlı imalat sempozyumu, 5-7.
- Yıldız, Y., & Nalbant, M., (2008). “A review of cryogenic cooling in machining processes”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(9), 947-964.
- Yiğit, R., (2004). HTCVD Yöntemiyle Kaplanmış Kesici Takımlarda Takım Ömrünün Araştırılması, Doktora Tezi, SAÜ.Tek. Eğt. Fak.
- Yücel, A., Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., şirin, ř., Kıvak, T., Gupta, M. K., Tomaz, Í. V. (2021). Influence of MoS2 based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1688-1704. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.007>.

- Zeqırı, F. (2018). İnconel 625 Tornalama İşleminde Kesme Kuvvetleri, Kesici Takım Aşınması Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkiyen Parametrelerin Deneysel Araştırılması Ve Matematiksel Modellenmesi Niğde Ömer Halisdemir Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora
- Zhang, P., Liu, Z., Liu, J., Yu, J., Mai, Q., Yue, X. (2023). Effect of aging plus cryogenic treatment on the machinability of 7075 aluminum alloy. *Vacuum*, 208, 111692.
- Zhu, Z., He B., Chen, J. (2020). Evaluation of tool temperature distribution in MQL drilling of aluminum 2024-T351. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.029>.
- Zolotarevsky, N. Y., Belov, N. A., & Glazoff, M. V., (2007). “Casting Aluminum Alloys”. Elsevier.

