



**KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ MATKAPLAR İLE  
AA 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MQL  
DESTEKLİ DELİNMESİNDE KESME  
PERFORMANSININ DENEYSEL VE İSTATİKSEL  
ARAŞTIRILMASI**

**Gökhan ÖZGER**

**2024  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanları  
Prof. Dr. Halil DEMİR  
Doç. Dr. Mahir AKGÜN**

**KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ MATKAPLAR İLE AA 7075 ALÜMİNYUM  
ALAŞIMININ MQL DESTEKLİ DELİNMESİNDE KESME  
PERFORMANSININ DENEYSEL VE İSTATİKSEL ARAŞTIRILMASI**

**Gökhan ÖZGER**

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

**Tez Danışmanları  
Prof. Dr.Halil DEMİR  
Doç. Dr.Mahir AKGÜN**

**KARABÜK  
Haziran 2024**

Gökhan ÖZGER tarafından hazırlanan “KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ MATKAPLAR İLE AA 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MQL DESTEKLİ DELİNMESİNDE KESME PERFORMANSININ DENEYSEL VE İSTATİKSEL ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

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

Doç. Dr. Mahir AKGÜN .....  
Tez 2. Danışmanı, Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 26/06/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Barış ÖZLÜ (ASÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR(KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Serdar GÜLDİBİ (KBÜ)	.....

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

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Gökhan ÖZGER

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

# **KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ MATKAPLAR İLE AA 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MQL DESTEKLİ DELİNMESİNDE KESME PERFORMANSININ DENEYSEL VE İSTATİKSEL ARAŞTIRILMASI**

**Gökhan ÖZGER**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Halil DEMİR**

**Haziran 2024, 83 sayfa**

Bu çalışmada, kriyojenik işlem uygulanan matkaplar ile AA 7075 alaşımının kuru, hava ve MQL destekli işleme şartlarında delinmesinde işleme performansı deneysel ve istatistiksel olarak araştırılmıştır. AA 7075 alaşımının işlenebilirlik performans özelliği yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması, çaptan ve dairesellikten sapma unsurları üzerinden değerlendirilmiştir. Delme deneyleri Taguchi L18 dizinine göre oluşturulmuştur. Delme parametreleri olarak kesici takım, işleme şartı, kesme hızı ve ilerleme miktarı seçilmiştir. Delme deneyleri sonrası elde edilen verinin istatistiksel analizinde sırasıyla S/N gürültü, varyans (ANOVA) ve regresyon kullanılmıştır. Sonuç olarak, Kriyojenik işlemin tungsten karbür kesici takımın mikrosertliğini arttırdığı, işlenebilirlik performans özellikleri üzerinde olumlu etki gösterdiği görülmüştür. Kuru işleme şartına göre yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, çaptan ve dairesellikten sapma değerlerinin hava destekli işleme şartında sırasıyla yaklaşık olarak %99,81 %27, %38

%40 daha düşük olduğu ve MQL destekli işleme şartında da sırasıyla yaklaşık olarak %33,62 %30 %42 %50 daha düşük olduğu belirlenmiştir. SEM incelemesi, kesici takımlar için baskın aşınma modunun yığıntı talaş (BUE) olduğu ve ihmal edilebilir düzeyde takım ufalanmasının (chipping) meydana geldiğini göstermektedir.

**Anahtar Sözcükler :** AA7075 alaşımı, Kriyojenik İşlem, Optimizasyon, Minimum Miktarla Yağlama MQL, Yüzey Pürüzlülüğü, Delik Kalitesi.

**Bilim Kodu** : 91438

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **EXPERIMENTAL AND STATISTICAL INVESTIGATION OF CUTTING PERFORMANCE IN MQL ASSISTED DRILLING OF AA 7075 ALUMINUM ALLOY WITH CRYOGENIC TREATED DRILLS**

**Gökhan ÖZGER**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Halil DEMİR**

**June 2024, 83 pages**

In this study, the machining performance of AA 7075 alloy under dry, air and MQL assisted machining conditions with cryogenically treated drills was investigated experimentally and statistically. The machinability performance of AA 7075 alloy was evaluated in terms of surface roughness, cutting temperature, tool wear, deviation from diameter and circularity. The drilling experiments were set up according to the Taguchi L18 index. Cutting tool, machining condition, cutting speed and feed rate were selected as drilling parameters. S/N noise, variance (ANOVA) and regression were used for statistical analysis of the data obtained after drilling experiments, respectively. As a result, it was observed that cryogenic treatment increases the microhardness of tungsten carbide cutting tool and has a positive effect on machinability performance characteristics. It was determined that surface roughness, cutting temperature,

deviation from diameter and circularity values were approximately 99.81%, 27%, 38%, 40% lower in air assisted machining condition and approximately 33.62%, 30%, 42%, 50% lower in MQL assisted machining condition, respectively, compared to dry machining condition. SEM examination shows that the dominant wear mode for the cutting tools is built-up chipping (BUE) and negligible tool chipping occurs.

**Key Word** : AA7075 alloy, Cryogenic Treatment, Optimization, Minimum Quantity Lubrication MQL, Surface Roughness, Hole Quality.

**Science Code** : 91438



## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca zaman ve mekân fark etmeksizin her anında değerli zamanımı ve yardımlarımı esirgemeyen, bilgi ve birikimleri ile, ilmin ve bilimin engin denizlerinde yüzmemi sağlayan kıymetli danıőman hocalarım Prof. Dr. Halil DEMİR'e ve Doç. Dr. Mahir AKGÜN'e saygı ve őükranlarımı sunarım.

Bugünlere gelmemi sağlayan sevgili Annem, babam, kardeőlerim ve çalıőmalarım süresince gösterdiği sabır ve anlayıő için Eőim Handan'a tüm kalbimle őükranlarımı sunarım. Çocuklarım Alya Hafsa ve Asım Hamza'ya sevgilerimle...

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	4
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. HİBRİT SOĞUTMA YÖNTEMLERİ İLE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	4
2.2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ ÖZETİ.....	11
BÖLÜM 3.....	12
KURAMSAL TEMELLER.....	12
3.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLAR.....	12
3.1.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	13
3.1.2. Alüminyum Alaşımlarının Avantajları ve Dezavantajları.....	15
3.1.3. Avantajlar.....	15
3.1.4. Dezavantajlar.....	17
3.2. TALAŞLI İMALATTA DELME İŞLEMİ.....	17
3.2.1. Delme İşlemi ve Talaş Oluşumu.....	17
3.2.2. Delme İşleminde Temel Parametreler.....	22
3.2.3. Kesici Takım Aşınması.....	25
3.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	29

3.2.5. Çaptan Sapma (Ölçüden Sapma).....	31
3.3. KRİYOJENİK SOĞUTMA .....	33
3.4. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MQL) .....	35
3.4.1. MQL'nin Avantajları.....	35
3.4.2. MQL Sistemlerinin Bileşenleri.....	36
3.4.3. MQL ve Geleneksel Yağlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	37
BÖLÜM 4 .....	38
MATERYAL VE YÖNTEM .....	38
4.1. DENEY MALZEMESİ .....	38
4.2. TAKIM TEZGAHI.....	38
4.3. DENEYLERDE KULLANILAN KESME PARAMETRELERİ.....	39
4.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ.....	40
4.5. KESME SICAKLIĞI ÖLÇÜMÜ .....	40
4.6. ÇAPTAN VE DAİRESELLİKTEN SAPMA ÖLÇÜMLERİ.....	40
4.7. KRİYOJENİK İŞLEMİN UYGULANMASI .....	41
4.8. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	42
4.9. MİKROYAPI İNCELEMELERİ .....	42
4.10. SOĞUTMA YÖNTEMİ.....	43
4.11. DENEY TASARIMI .....	44
BÖLÜM 5 .....	46
DENEYSSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	46
5.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	46
5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47
5.2.1. S/N Oranlarının Analizi.....	47
5.2.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	49
5.2.3. Varyans Analizi (ANOVA).....	52
5.1.4. Regresyon Analizi .....	52
5.3. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	54
5.3.1. S/N Oranlarının Analizi.....	54
5.3.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	56

**Sayfa**

5.3.3. Varyans Analizi (ANOVA).....	59
5.3.4. Regresyon Analizi .....	59
5.4. DELİK KALİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	62
5.5. TAKIM AŞINMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	66
BÖLÜM 6 .....	69
SONUÇLAR .....	69
KAYNAKLAR .....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	83

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Boeing777 uçağında kullanılan materyallerin ağırlığa göre dağılımı.....	15
Şekil 3.2. Talaşlı imalat işlem sayılarına göre delmenin diğer talaş kaldırma işlemlerine göre oranı.....	18
Şekil 3.3. Delik delme işlemlerinde geçen sürenin diğer talaş kaldırma işlemlerinde geçen süre ile karşılaştırması.....	19
Şekil 3.4. Torna tezgahında sabit delme işlemine örnek.....	19
Şekil 3.5. Delik delme çeşitleri.....	20
Şekil 3.6. Kesici takımın dönmesi (n), ilerlemesi (Vf).....	20
Şekil 3.7. Delik delme işleminde boy/çap ilişkisi a) Derin delik b) Kısa delik.....	21
Şekil 3.8. Delik delme işleminde takımın dönmesi ve takımın ilerlemesi.....	23
Şekil 3.9. Delme işlemlerinde, talaş genişliği, kesici kenar başına ilerleme.....	24
Şekil 3.10. Delik delme işleminde toplam delik derinliği.....	25
Şekil 3.11. Takım sapmaları.....	31
Şekil 3.12. Dairesellik ölçümlerinde kullanılan LSC metodu.....	32
Şekil 3.13. Kriyojenik işleme stratejileri.....	35
Şekil 3.14. Minimum miktarda yağlama uygulaması.....	36
Şekil 4.1. Delme deneyi düzeneği.....	39
Şekil 4.2. Tungsten karbür matkap ucunun ölçüleri.....	40
Şekil 4.3. CMM cihazı ve ölçüm düzeneği.....	41
Şekil 4.4. Kriyojenik soğutma sistemi.....	42
Şekil 4.5. MQL soğutma sisteminin şematik görüntüsü.....	44
Şekil 5.1. Tungsten karbür takımların mikroyapıları: a) işlemsiz, b) kriyojenik işlem uygulanmış.....	46
Şekil 5.2. Ra için S/N oranlarına göre kesme parametrelerinin dağılımı.....	48
Şekil 5.3 İşleme koşuluna göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.....	50
Şekil 5.4. Ra için tahmini ve test sonuçlarının karşılaştırılması.....	53
Şekil 5.5. T için S/N oranlarına göre kesme parametrelerinin dağılımı.....	56
Şekil 5.6. İşleme koşuluna göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.....	58
Şekil 5.7. T için tahmini ve test sonuçlarının karşılaştırılması.....	60
Şekil 5.8. İşleme koşuluna göre çaptan sapma değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.....	63

Şekil 5.9. İşleme koşuluna göre dairesellikten sapma değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.....	65
Şekil 5.10. Kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri: a) İşlemsiz b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.....	67

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3. 1 Alüminyum alaşım serisi tanımlamaları.....	14
Çizelge 3.2. Kesici takım aşınması olası nedenleri ve çözümleri.....	26
Çizelge 3.2. (Devam ediyor).....	27
Çizelge 3.2. (Devam ediyor).....	28
Çizelge 4.1. AA 7075 alaşımının % kimyasal bileşimi.....	38
Çizelge 4.2. Deneyleerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri.....	39
Çizelge 4.3. Deneyleerde kullanılan kesme sıvısının özellikleri.....	43
Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ve S/N oranları.....	47
Çizelge 5.2. Ra için S/N analiz sonucu.....	48
Çizelge 5.3. Ra için varyans analizi sonuçları.....	52
Çizelge 5.4. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için tahmin denklemleri.....	53
Çizelge 5.5. Ra için güven aralığı hesaplama parametreleri.....	54
Çizelge 5.6. Ra için doğrulama testi sonuçları.....	54
Çizelge 5.7. Kesme sıcaklığı değerleri ve S/N oranları.....	55
Çizelge 5.8. T için S/N analiz sonucu.....	56
Çizelge 5.9. Kesme sıcaklığı için Anova sonuçları.....	59
Çizelge 5.10. Kesme sıcaklığı (T) için tahmin denklemleri.....	60
Çizelge 5.11. T için güven aralığı hesaplama parametreleri .....	61
Çizelge 5.12. T için doğrulama testi sonuçları.....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- Ra : ortalama yüzey pürüzlülüğü  
T : kesme sıcaklığı  
V : kesme hızı  
f : ilerleme miktarı  
a : talaş derinliği  
Al : alüminyum  
Cr : krom  
Ni : nikel  
Mn : mangan  
Si : silisyum  
Co : kobalt  
Ti : titanyum  
CI : güven aralığı  
 $\alpha$  : anlamlılık düzeyi  
*fe* : hata serbestlik derecesi  
 $n_{eff}$  : etkili yineleme sayısı  
*Ve* : hata varyansı



## KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
TS	: Türk Standardı
PVD	: Physical Vapour Deposition (Fiziksel buhar çökeltme)
CVD	: Chemical Vapour Deposition (Kimyasal buhar çökeltme)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama elektron mikroskobu)
ANOVA	: Kesici takım
WC	: Tungsten Karbür
BUE	: Built Up Edge (Yığıntı Talaş)
CM	: Conventional Milling (Geleneksel Frezeleme)
UVAM	: Ultrasonic Vibration Assisted Milling (Ultrasonik Titreşim Destekli Frezeleme)
UM	: Ultrasonic Machining (Ulstra Sonik İşleme)
YBBO	: Yıllık Bazda Büyüme Oranına

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet, düşük ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci ve mükemmel ısı iletkenliği özelliklerinden dolayı son yıllarda gelişen teknoloji ile otomobil, havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ağır işleme şartlarında talaşlı imalat teknikleri ile işlenmesinde kesici takıma ekstra aşırı yükler binebilmektedir. İşleme esnasında çıkan talaşlar, kesici takıma yapışarak kaynaklanabilmekte ve özellikle aşınma mekanizmalarının etkinliğini artırarak kesici takım ömrünü düşürebilmektedir. AA7075 Alüminyum grubunda yer alan malzemelerin talaşlı imalat teknikleri ile şekillendirilmesinde işleme verimliliğinin artırılması son derece önemlidir. Metal işleme tekniklerinde işleme verimliliğini ve takım ömrünü artırmak için kesme sıvıları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Talaşlı imalat ile üretim endüstrisinde işleme prosesi boyunca iş parçası- kesici takım arasındaki sürtünmeyi, sıcaklığı, oluşan kuvvetleri, oluşan talaşları kesme bölgesinden hızla uzaklaştırmak ve yüzey topoğrafyasını istenilen değerlerde yönetmek için kesme sıvılarının kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu kesme sıvılarının ekolojik etkileri olarak, çevre sağlığına, atmosfere ve operatör sağlığına, finansal olarak ise işletme giderlerine ekstra ciddi bir yük oluşturduğu bilinmektedir. Bu sebeple imalat sanayisi kesme sıvılarının finansal ve ekolojik etkilerini en aza indirecek yeni teknikler ve araştırmalara yönelmişlerdir.

Küresel metal işleme sıvıları pazar büyüklüğünün 2019' da 11,23 milyar dolar olduğu tahmin ediliyor ve tahmin dönemi boyunca gelire dayalı %4,4' lük bir Yıllık Bazda Büyüme Oranına (YBBO) tanık olması bekleniyor. İşleme için kullanılan soğutma sıvıları ve yağlayıcıların üretim maliyetlerinin %16 ila %20'sini oluşturduğu belirtilmektedir. ISO 14000'deki standartların genel amacı, sosyoekonomik ön

koşullar aracılığıyla çevresel istikrarını korumaktır. Bununla birlikte, endüstrilerin beş temel ilkeye, yani su kirliliği, toprak kirliliği, atık yönetimi, zararlı hava emisyonları ve doğal kaynaklar ve ham maddelerin korunmasına bağlı olması gerekiyor. Kullanılan bu kesme sıvılarının bertarafı oldukça zordur. Düzgün geri dönüştürülmezse toprak kirlenmesine neden olur, tarımı olumsuz etkiler. Kesme sıvısında bakteri üremesini azaltmak için kesme sıvılarında kullanılan bazı kimyasal katkıları, çevreyi ve çalışanların sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir [1-5].

Talaşlı imalat tekniklerinde kullanılan kesme sıvılarının soğutma, yağlama, talaş kesme bölgesinden uzaklaştırma, sürtünme kaynaklı oluşan ısıyı kontrol altına alma, kesme işlemini kolaylaştırma, yüzey kalitesini artırma ve talaşın iş parçasına yapışmasını önleme gibi kritik görevleri vardır [6-8]. Ancak, petrol bazlı kesme sıvıları, yüksek bertaraf maliyeti, toksik özellikleri ve biyolojik olarak parçalanamama gibi nedenlerle insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Uzun süre hava yoluyla maruz kalındığında, bu sıvılar cilt hastalıkları (dermatit, egzama, cilt kanseri vb.), solunum yolu hastalıkları (gırtlak kanseri, astım vb.) ve deri yoluyla alındığında karaciğerde toksisite gibi birçok sağlık sorununa neden olabilir [8-9].

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesme ve soğutma sıvılarının olumsuz etkileri, araştırmacıları alternatif yöntemler arayışına itmektedir. Son yıllarda, sürdürülebilir imalat kavramının önem kazanmasıyla birlikte, metal işleme sıvılarının kullanımını azaltan veya tamamen ortadan kaldıran ekolojik soğutma ve yağlama yöntemleri üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu ekolojik yöntemler arasında kuru işlem, minimum miktarda yağlama (MMY), nano partikül katkılı minimum miktarda yağlama (Nano MMY), hibrid minimum miktarda yağlama (Hibrid Nano MMY), hava ile soğutma, yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutma bulunmaktadır.

Kuru işleme, üretim maliyetleri ve çevre duyarlılığı açısından etkili bir yöntem olarak bilinmekle birlikte, özellikle ağır işleme koşullarında işleme verimliliği açısından yetersiz kaldığı için pek tercih edilmemektedir [9]. Kesme sıvısı kullanımını azaltmak ve kuru kesme yönteminin olumsuz etkilerini gidermek amacıyla yarı kuru işleme olarak da bilinen minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi kullanılmaktadır. MMY yöntemi, basınçlı hava yardımıyla çok az miktarda 10 ~ 100 mL/saat, kesme

sıvısının sis buharı şeklinde kesme bölgesine uygulanması şeklinde tanımlanır. Bu sis buharı içerisindeki yağ zerrecikleri, kesici takım ile iş parçası arasındaki ara yüzeyde ince bir yağlayıcı film tabakası oluşturarak etkili bir soğutma ve yağlama sağlar [10-11]. MMY yöntemi, çok az miktarda kesme yağı kullanması nedeniyle insan sağlığı ve çevre açısından ıslak kesme yöntemine göre daha fazla tercih edilmektedir. Ancak ağır işleme koşullarında verimliliği artırmak ve kesme yağının tribolojik etkilerini iyileştirmek amacıyla kesme yağına nano boyutlarda genellikle 1 ~ 100 nm, katı partiküller eklenmektedir.

Sonuç olarak, soğutma sıvısı tüketimini azaltırken aynı zamanda üretkenliği artıran verimli bir soğutma sistemi talep edilmektedir. Bu bağlamda, Minimum Miktarda Yağlama (MMY), belirtilen hedeflere ulaşmak için ayrıntılı olarak değerlendirilebilecek bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [12].

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 2.1. HİBRİT SOĞUTMA YÖNTEMLERİ İLE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Najiha ve arkadaşları AA6061 alüminyum alaşımını su bazlı TiO<sub>2</sub> nanoakışkan ve minimum miktarda yağlama (MQL) koşullarında parmak frezelemede kesme parametrelerinin aşınma mekanizmaları üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Üç farklı kesme hızı (5200, 5400 ve 5600 dev/dak) ve kullanılan iki farklı MQL akış hızları (0.65 ml/dk ve 1.0 ml/dk) ile, kullanılan TiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları sulu çözeltilerde %0.5, 2.5 ve 4.5'lik farklı hacim oranları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonucunda, iş parçasının kesici takıma yapışmasının en önemli sorun olduğunu gözlemlemişlerdir. Deneilerinde mikro aşınma, mikro yıpranma ve yapışmanın başlıca aşınma mekanizmaları olduğunu vurgulamışlardır. Artan ilerleme hızında ve kesme derinliğinde daha yüksek yapışma ve kenar yontma gözlemlendiğini belirtmişler. Daha yüksek MQL akış hızı ile daha az yapışma ve kenar bütünlüğü ile sonuçlandığını deneylerinden elde etmişlerdir [13].

Chatha ve arkadaşları Al6063 alaşımını bilgisayar destekli sayısal kontrollü (CNC) kullanarak, harici bir saf MQL sistemi uygulaması ile işleyerek gerçekleştirmişler. HSS 6 mm matkap ucu ile kesme hızı (30 m/dak) ve ilerleme hızı sabit (60 mm/dak) kullanarak kuru ve saf MQL uygulama tekniği ile HSS matkap takımlarını kullanarak alüminyum 6063 alaşımının delinmesinde kesme kuvvetleri (itme kuvveti ve tork), takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından farklı yağlama koşullarının (kuru ve MQL) performansını araştırmışlardır. Sırasıyla kuru ve saf MQL yağlama uygulamaları ile kesme hızında (30 m/dak) karşılaşılan sürtünme katsayıları kuru uygulamada  $\mu=0,0143$  değerle en yüksek sürtünme katsayısına sahip iken saf MQL

uygulanmasında  $\mu=0,0009$  sürtünme katsayısını azalttığını gözlemlemiş ve MQL'in kesme bölgesine daha fazla nüfuz ettiğini böylece delme sırasında ara yüzey yağlaması sunmasına bağlamışlardır.

Chatha ve arkadaşları aynı çalışmada kesme hızı (30 m/dak) ve ilerleme hızı (60 mm/dak) işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) üzerine kuru ve MQL destekli uygulama ile çalışmalar yapmışlardır. Yapılan bu çalışmalarda yüzey pürüzlülük değerinin (Ra) kuru işlemede MQL uygulamasına göre oldukça yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunu ise takım ucunda oluşan yüksek sıcaklığa ve gerilmelere neden olan yapışma nedeni ile bağdaştırmışlardır.

Chatha ve arkadaşları aynı çalışmada aynı değerlerde fakat konvansiyonel ve saf MQL soğutma yağlama uygulaması ile yapılan Al6063 alüminyum alaşımının işlenmesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin, su basma uygulamasının saf MQL uygulamasına göre daha yüksek sonuçlar doğurduğu görülmüştür. Aynı şekilde sürtünme katsayısı da saf MQL uygulamasına göre oldukça yüksek bir değerle ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir.

Chatha ve arkadaşları aynı çalışmada takım aşınması üzerine SEM mikro grafları kullanılarak ölçümler yapmışlardır. Delme testleri, kuru, su basma ve saf MQL gibi tüm koşullarda takım aşınmasının varyasyonunu inceleyerek yapmışlar. Tüm kesme ortamlarında işleme sırasında, takım ve yan aşınma üzerindeki yapışmış iş parçası malzemesinin miktarı, yağlayıcı ortamının türüne göre değişkenlik gösterdiğini vurgulamışlardır. Farklı soğutma sıvısı ortamlarına göre sırasıyla 30 m/dak ve 53,7 m/dak kesme hızında takım üzerindeki iş parçası malzemesinin yıpranmasını, çatlmasını ve yapışmasını su basma ve saf MQL'e kıyasla kuru işleme durumunda en yüksek yan aşınma ve yapışma gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Kesme hızındaki artışla (53,7 m/dak) birlikte yan aşınma arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, su basma yağlamasının yüksek soğutma kabiliyeti, yalnızca daha yüksek aşınmaya neden olmakla kalmayıp aynı zamanda farklı talaş teması ve talaş hareketine neden olan daha yüksek strese neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Saf MQL uygulamasının delme koşullarının takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığı ve kuru delme ve su basma uygulamasına kıyasla takım ömrünü uzattığını gözlemlemişlerdir. [14].

Zhu ve arkadaşları Al2024-T351 alüminyum alaşımını dört farklı kesme hızında (60,80, 100 ve 120 m/dak) ve sabit ilerleme hızında (0,2 0,3 0,5 mm/dev) delmişlerdir. Bu deneysel çalışmalarında Al2024-T351 Alüminyum alaşımının yüksek verimli delinmesi sırasında soğutma koşullarının ve kesme değişimlerinin takım sıcaklığına etkisini kuru, hava soğutmalı ve MQL uygulaması ile deneysel olarak analiz etmişlerdir. Al2024 alaşımın kuru, hava soğutma ve MQL uygulama koşulları için kesme hızında (100 m/dak) ve ilerleme hızında (0,3 mm/dev) matkap merkezi ile dış köşe arasındaki sıcaklık farkları, MQL için 28 °C, hava soğutma için 90 °C ve kuru işleme için 105 °C olarak ölçülmüş. Kuru ve hava soğutma ile karşılaştırıldığında, MQL uygulaması ile delmenin, kesme kenarı boyunca sıcaklık dengesi için fayda sağladığını belirtmişlerdir.

Zhu ve arkadaşları aynı çalışmada kuru ve MQL soğutma ortamlarında, farklı kesme hızlarına ve ilerleme hızlarına göre ortalama delme sıcaklıkları kesme hızının artmasıyla delme sıcaklığında küçük bir fark olduğunu gözlemlemişler. MQL soğutma için, kesme hızı 60 m/dk'dan 120 m/dk'ya yükseldiğinde, sıcaklığın sadece yaklaşık %11 (358 °C'den 398 °C'ye) arttığını belirtmişler. Ancak, ilerleme 0,2 mm/dev'den 0,5 mm/dev'e arttırıldığında sıcaklık farkının %30'a kadar (357 °C'den 465 °C'e) kadar artabildiği görülmüş. Bu, ilerleme hızının sıcaklık üzerinde kesme hızından daha büyük bir etkisi olduğunu, nedenini ise ilerleme hızının delme işlemi sırasında talaş kalınlığına doğrudan karar vermesi ve ayrıca üretilen ısı miktarını etkileyebilmesi olabildiği sonucuna varmışlar. Farklı kesme parametreleri için MQL'deki ortalama sıcaklıkların kuru durumdakilerden daha düşük sonuçlar elde edildiğini savunmuşlardır. Çalışmanın devamında ısı birikimi nedeniyle kesme kenarı boyunca maksimum sıcaklığın matkap merkezi yakınında gözlemlendiğini analiz etmişler. MQL uygulamasının, kuru ve hava soğutma koşullarına kıyasla matkap merkezi ile dış köşe arasındaki sıcaklık farkını azaltabildiğini vurgulamışlar. Sıcaklık dağılımının ilerleme hızına kesme hızından daha duyarlı olduğunu belirtmişler. Artan ilerleme hızı, ortalama sıcaklıkta büyük bir artışa neden olabildiğini gözlemlemişler. MQL koşullarında talaşlanma sadece çevresel köşede gözlenirken, yapışma ve yığıntı talaş oluşumu (BUE), yağlama ve soğutma sıvısı olmaması nedeniyle kuru delme altında neredeyse tüm kesme kenarı boyunca uzandığını gözlemlemişler. MQL

sistemlerindeki basınçlı hava ve yağ damlacıklarının, takım aşınmasını ve ısıyı azaltmaya yardımcı olduğunu belirtmişlerdir [15].

Yücel ve arkadaşları, AA 2024 T3 Al alaşımının çeşitli soğutma ve yağlama stratejileri altında, kuru kesim, MQL ve MoS<sub>2</sub> nanopartikül NFMQL altında tornalanması sırasında yüzey pürüzlülüğü, yüzey topografyası, maksimum sıcaklık ve takım aşınma mekanizması gibi kritik işlenebilirlik göstergeleri üzerine odaklanmışlardır. Kuru işleme ile MQL uygulamasının Yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) ve kesme sıcaklığı üzerine etkilerini incelemişler. Ra değeri MQL uygulaması ile %8.41 iyileşme gösterirken, kesme sıcaklığının %10,21 oranında düşürmeye yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde karşılaşılan en temel problem olan BUE ve BUL üzerine yapılan çeşitli çalışmalar neticesinde. MQL sistemlerdeki basınçlı soğutma tekniği ile kesme alanından talaşların hızlı bir şekilde uzaklaştırıldığını ve talaşların yapışmasının azaldığını gözlemlemişlerdir [16].

GIASIN yine aynı çalışmada AA2024-T3 Al alaşımının kuru delme sırasında iş malzemesinin takıma yapışmasının en yüksek oranda olduğunu gözlemlemiştir. MQL ve kriyojenik soğutma sıvılarının kullanımı, kesici takımlarda alüminyum yapışmasını ve kenar oluşumunu önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir [17].

Sen ve arkadaşları, MQL teknolojisinin uygulanması, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve takım aşınması gibi işleme performanslarını en aza indirdiğini belirtmiştir. Bununla birlikte, hava basıncı, hava-yağ karışımı, nozul sayısı, nozul mesafesi ve nozul açısı gibi birkaç önemli MQL parametresi, işleme performansları üzerinde önemli bir etki yarattığını vurgulamışlardır. MQL uygulamasının performansı ayrıca takım malzemesi, takım kaplaması ve iş parçası malzemesi ile de değiştirildiğini belirtmektedir. Ek olarak, MQL sisteminin çalışma fluidine dayanarak, maksimum işleme verimliliğini elde etmek için sistematik bir işleme parametresi seçimi gerekli olduğunu gözlemlemişlerdir [18].

Boulahmi, AA2024-T4, AA6061-T6 ve AA7075-T651 alüminyum alaşımlarını tornalama tekniği ile üç farklı kesici takım uç yarı çapı (0,2, 0,4 ve 0,8 mm) ve üç farklı ilerleme hızında (0,05, 0,10 ve 0,15 mm/dev) yüzey kalitesi, artık gerilmeler ve



tek eksenli çekme testi davranışı üzerindeki kesme parametrelerinin ve yağlama modlarının etkisini belirlemek için kuru, ıslak ve MQL uygulaması ile işleyerek incelemiştir. Bu incelemenin sonucunda, MQL soğutma ve yağlama tekniği ile tornalamanın bireysel olarak araştırılan tüm yanıtlar için en iyi sonuçları sağladığını gözlemlemişler. Ayrıca, artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve en düşük ilerleme hızları için basma artık gerilmelerinin gözlemlendiğini gözlemlemişlerdir [19].

Javidikia ve arkadaşları AA6061-T6 alaşımını sırasıyla beş farklı kesme hızında (145, 350, 650, 950 ve 1155 m/dak), beş farklı ilerleme hızında (0,07,0,12, 0,19, 0,26 ve 0,31 mm/dev) ve beş farklı kesme derinliğinde (0,66, 1, 1,5, 2 ve 2,34 mm) kuru ıslak ve MQL soğutma yağlama uygulaması ile işleyerek yüzey bütünlüğü üzerindeki, yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilmeler üzerindeki etkisini araştırmışlar. İşleme testleri, merkezi kompozit tasarımına (CCD) dayalı bir deney tasarımı (DoE) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak her ortam için en etkili dönüş parametreleri belirlenmiş. Ortalama aritmetik yüzey pürüzlülüğü, vadiden yükseklik tepe noktası, eksenel yüzey artık gerilmesi ve çember yüzeyi artık gerilmesini etkili regresyon modellerini tahmin etmek için yanıt yüzeyi yöntemi (RSM) kullanılmış. Bu çalışmanın sonucunda, ilerleme hızı ve kesme hızının yüzey bütünlüğü üzerinde en etkili parametreler olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çevre dostu ve maliyet tasarrufu sağlayan bir tornalama ortamı için en etkili soğutma yağlama tekniği MQL modu kullanılarak daha iyi yüzey bütünlüğü ve daha yüksek talaş kaldırma hızının elde edildiğini belirtmişlerdir [20].

Islam ve arkadaşları AA6061 alüminyum alaşımını tornalama tekniği ile işlemişler. Bu çalışmada MQL uygulamasının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerindeki etkisi araştırılmış. Deneyler, sabit ilerleme hızı (0,15 mm/dev), farklı kesme derinliği (1 ve 1,5 mm), farklı kesme hızları (300, 420 700 m/dak) parametrelerinde kuru, ıslak ve MQL uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için yeni tasarlanmış, uygun maliyetli ve taşınabilir bir MQL kurulumu geliştirilmiştir. Yeni tasarlanan MQL dağıtım sistemi, ile Minimum miktarda yağlama (MQL) tekniği, daha düşük kesme sıcaklıkları, artan yağlama penetrasyonu ve daha iyi talaş temizleme nedeniyle daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması (yan aşınma) değerleri

sağladığı gözlemlenmiştir. MQL tekniği altında oluşturulan talaşlar, düşük kesme sıcaklığı ve geliştirilmiş talaş-takım etkileşimi ve azaltılmış yığıntı talaş (BUE) oluşumu nedeniyle ıslak ve kuru koşullara kıyasla daha düşük talaş kalınlığına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, MQL, temel yan aşınma ve çentik aşınmasının büyümesini azaltarak, ıslak ve kuru koşullara kıyasla daha düşük yardımcı yanak aşınması ve daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri ile sonuçlandırmıştır. Takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları, kesme ortamının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu ve MQL'nin gelişmiş takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değeri sağladığını ortaya koyduğunu vurgulamışlardır [21].

Kannan ve arkadaşları Al 7075 (Al 7075/BN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bazlı hibrit nanokompozit ve güçlendirilmemiş sıkımal döküm tekniği ile üretilmiş Al 7075 alüminyum matrisli nano kompozitleri kuru ve minimum miktarlı yağlama ortamlarında kesme hızı (150 ve 250 m/dak), ilerleme hızı (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/dev) ve kesme derinliği değiştirilerek işlenmiştir. Kesme kuvvetlerinin, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri gözlemlenmiş ve karşılaştırılmış. MQL ortamında işleme, işleme ve takım aşınması sırasında üretilen kuvvetlerin azaltılmasını kolaylaştırdığını nedenini ise yağlayıcının, ısıyı ve sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olduğu ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için talaş kırmaya yardımcı olan yüksek basınçlı sıvının kesme bölgesinden talaşları hızla uzaklaştırarak elde ettiğini bildirmişler. Hibrit kompozit için daha düşük ilerleme hızlarında (0.1mm/dev) ve kesme hızlarında (250m/dak) en az krater ve yan aşınma gözlemlenmiştir. MQL kullanılırken takım aşınmasında daha fazla azalmanın görüldüğü belirtilmiştir. Hibrit kompozitin işlenmesi sırasında minimum yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesi için tercih edilen koşulların yüksek kesme hızı ve MQL ortamı ile birlikte düşük ilerleme hızı olduğunu vurgulamışlardır [22].

Khunt ve arkadaşları Alüminyum-6063 alaşımını kuru, taşkın soğutma, hintyağı MQL ve Ayçiçek yağı MQL uygulaması altında işlenebilirliğini incelemek üzere delmişler. Delme işlemi sırasında bitkisel bazlı MQL'nin performansını değerlendirmek için deneysel araştırmalar yapılmış ve sonuçlar taşkın soğutma ve kuru delme ile karşılaştırılmış. Sonuçların karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlara göre, bitkisel bazlı MQL'nin etkinliği, gelişmiş soğutma ve yağlama etkisi nedeniyle delme sırasında

daha yüksek hızda itme kuvvetinde ve torkta azalma şeklinde gözlemlenmiş. En düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra), sürtünme katsayısındaki azalma ve talaşların takım yüzeyi üzerinde kolay kayması nedeniyle MQL destekli delme ile elde edilmiş. Bitkisel bazlı MQL, delme performansını artırarak taşkın soğutmaya kıyasla etkili bir alternatif olarak düşünülebileceği sonucunu vurgulamışlardır [23].

Çagan ve arkadaşları Al7075-T6 alüminyum alaşımını kuru ve minimum miktarda yağlama (MQL) ile işlemede yüzey pürüzlülüğü ve talaş morfolojisinin araştırılması için üç farklı kesme hızında (400, 450 ve 500 m/dak), sabit ilerleme hızı (0,1 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1 mm) işleme parametrelerinde tormalamışlardır. MQL ortamında tormalama işleminden sonra elde edilen Al7075-T6 iş parçasının yüzey kalitesinin kuru ortama göre daha iyi olduğu gözlemlenmiş. MQL ortamında tormalama işleminden sonra elde edilen talaşların kuru ortama göre daha uzun talaş geometrisine sahip olduğu gözlemlenmiş. Bu durumun, MQL tarafından üretilen ısının talaş tarafından daha kolay bir şekilde tahliye edildiğini vurgulamışlar. MQL ortamları için yüzey pürüzlülük değerleri kuru uygulamaya göre %15 daha iyi değerler elde edilmiş. MQL ile işleme, hem çevre dostu hem de daha iyi yüzey kalitesi sağlayan en iyi ve daha güvenilir soğutma-yağlama uygulaması olarak belirtmişlerdir [24].

Abas ve arkadaşları 6026-T9 alüminyum alaşımını sırasıyla kesme hızlarında (400, 500, 600 ve 700 m/dak), sırasıyla ilerleme hızında (0,3, 0,4, 0,5 ve 0,6 mm/dev) ve kesme derinliğinde (1, 1,5, 2 ve 2,5 mm) işleme parametrelerinin kuru ve bitkisel (zeytin yağı) MQL uygulaması altında işlenebilirliğinin optimizasyonu ve analizini tormalayarak incelemişler. Kuru koşullar altında elde edilen takım ömrü 2398 s'dir, ancak MQL ortamında 3215 s'dir. Maksimum talaş kaldırma oranını elde etmek için en uygun parametreler 700m/dk'da kesme hızı, 0.6mm/dev ilerleme hızı, 2.5mm kesme derinliği ve 15° pozitif talaş açısı olarak belirlendi. Kuru ortamda 278 cm<sup>3</sup>/sn, MQL ortamında ise 275 cm<sup>3</sup>/sn talaş kaldırma hızı elde edilmiş. Takım aşınması ilerleme eğrileri, işleme süresinin ilerlemesiyle kesici ucun ortalama yan yüzey aşınmasının arttığını gözlemlenmiş. Ancak MQL ortamında yan yüzey aşınmasının kuru ortama göre nispeten daha yavaş ilerlediği gözlemlenmiş. Bu gözlemler sonucunda MQL uygulamasının daha yüksek üretkenlik ve daha uzun takım ömrü ile

daha kaliteli parçalar üretmede kuru işlemeye kıyasla daha verimli olduğunu nitelikli sonuçlar elde ederek belirtmişlerdir [25].

Viswanathan ve arkadaşları, AZ91D magnezyum alaşımını kaplamasız tungsten karbür kesici takım ile kesme hızı (90 m/dak) ilerleme hızı (0,10 mm/dev) ve kesme derinliği (0,5 mm) koşullarında Taguchi tabanlı GRA' ya dayalı olarak tanımlanan optimize edilmiş proses parametreleri ile kuru ve MQL uygulama tekniği ile tornalamışlar. Bu kesme işlemi parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey kalitesi, takım yan aşınması ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. MQL'nin kuru kesmeye kıyasla daha iyi kesme koşulları sağladığını vurgulamışlardır [26].

## **2.2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ ÖZETİ**

Literatür araştırmaları incelendiğinde, alüminyum alaşımlarının işlenebilirliğinin tornalama ve frezeleme yöntemleri kullanılarak araştırıldığı ve yapılan çalışmalarda hibrit soğutma yöntemlerinin etkinliği ve optimizasyonu üzerine yoğunlaşıldığı gözlenmiştir. Ancak, farklı soğutma yöntemleri ile AA 7075 alaşımının delinmesi üzerine çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Tornalama ve frezeleme işlemlerindeki ölçülen performans karakteristiği, delme işlemine doğrudan uygulanamaz. Delik delme işleminin imalat endüstrisinde etkinliği göz önüne alındığında, havacılık sektörü için oldukça önemli bir alaşım olan AA 7075'in delinmesi üzerine çalışmaların yapılmasını önemli kılmaktadır. Bu çalışmada, uzay ve havacılık sanayinde yapısal parçaların üretiminde oldukça yaygın kullanılan AA 7075 alaşımının delinmesinde delik kalitesi üzerinde kuru, hava ve MQL işleme şartlarının etkilerinin araştırılması ve delme deneylerinde elde edilen verinin optimizasyonu ile endüstriyel uygulamalar için kesme parametrelerinin optimim seviyelerinin belirlenmesi ile işleme verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır.

## BÖLÜM 3

### KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLAR

Alüminyum, dünya genelinde bol miktarda bulunan metallere biridir ve düşük sıcaklıklarda yüksek dayanım/ağırlık oranı, mükemmel aşınma direnci ve iyi elektriksel iletkenlik gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Bu özellikler, alüminyumu birçok endüstriyel uygulama için ideal bir malzeme yapmaktadır. Alüminyum alaşımları, saf alüminyuma çeşitli elementlerin eklenmesiyle oluşturulur ve bu alaşımlar, belirli özelliklerin optimize edilmesi amacıyla geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Alüminyumun yoğunluğu yaklaşık  $2.7 \text{ g/cm}^3$  olup, bu değer çeliğin yoğunluğunun üçte biri kadardır. Yüksek dayanım/ağırlık oranı, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde önemli avantajlar sunar. Alüminyum, yüzeyinde oluşan ince oksit katmanları sayesinde korozyona karşı oldukça dirençlidir. Bu oksit tabakası, alüminyumun deniz suyu ve kimyasal ortamlar gibi zorlu koşullarda bile dayanıklı olmasını sağlar. Bakırdan sonra en iyi elektrik iletkenliğine sahip metallere biri olan alüminyum, yüksek termal iletkenliği sayesinde ısıyı etkili bir şekilde dağıtabilir. Çeşitli üretim süreçlerine kolayca uyum sağlayabilen alüminyum, haddelenebilir, dökülebilir, ekstrüzyon edilebilir ve kaynaklanabilir. Ayrıca, alüminyumun geri dönüştürülmesi enerji açısından çok verimlidir ve malzemenin özelliklerini etkilemez [27-30]. Bu özellikler, alüminyum alaşımlarını modern mühendislik ve endüstriyel uygulamalar için ideal bir malzeme yapar. Her bir özellik, alüminyum alaşımlarının belirli bir uygulama alanında neden tercih edildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

### 3.1.1. Alüminyum Alaşımalarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması, aşağıdaki gruplarda ve Çizelge 3.1' de gösterildiği gibi ana alaşım elementine dayanabilir. İlk rakam ana alaşım elementini ve alüminyum alaşım serisini gösterir. İkinci hane orijinal alaşımı veya 0 dışında ise alaşım modifikasyonunu gösterir (örneğin 1-9).

2xxx-8xxx Grupları için üçüncü ve dördüncü rakamların özel bir önemi yoktur, ancak gruptaki alaşımı tanımlamaya yarar [31]. Son iki rakamın alaşımın %99'un (minimum alüminyum yüzdesi) üzerindeki saflığı hakkında bilgi verdiği 1xxx grubu bir istisnadır. Örneğin, Al1050 alaşımı, bileşiminde en az %99,50 alüminyum içerdiğini gösterir [32]. Alüminyum alaşımlarının mukavemeti ve mekanik özellikleri ya oda sıcaklığında sertleştirilerek (soğuk işlem) elde edilebilir (ısıl işlem görmeyen alaşımlar). Temper H harfi ile gösterilir veya yaşlandırma ısıl işlemi ile (ısıl işlem uygulanabilir alaşımlar), temper T harfi ile gösterilir. Ayrıca, işlenmiş alaşımlar tavlandığında, temper tanımlamasına O harfi eklenirken, ürünün sertleşme miktarını kontrol etmek için herhangi bir girişimde bulunulmadan şekillendirildiğini belirtmek için temper tanımlamasına F harfi eklenir [32]. Ayrıca, işlenmiş alaşımlar tavlandığında, temper tanımına O harfi eklenirken, ürünün sertleşme miktarını kontrol etmek için herhangi bir girişimde bulunulmadan şekillendirildiğini belirtmek için temper tanımına F harfi eklenir [32]. Örneğin, bu araştırmada kullanılan Al7075 alüminyum alaşımı: ilk 2 rakam seri tanımını gösterir, 0 çoğunlukla saf alüminyum olduğunu ve çinkonun ana alaşım elementi olduğunu gösterir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, geniş bir kullanım alanına sahiptir. Havacılık ve uzay endüstrisi sektöründe, yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyi yorulma direnci ve kolay işlenebilirlik özellikleri nedeniyle uçak yapıları ve uzay araçlarında sıkça tercih edilir. Otomotiv endüstrisinde, alüminyumun araç ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini ve emisyonları düşürmesi önemli bir avantaj sağlar; motor blokları, bileşenler ve gövde panelleri genellikle alüminyumdan üretilir. Yapı ve inşaat sektöründe, hafifliği ve estetik özellikleri sayesinde alüminyum, pencere çerçeveleri, kapılar, cephe panelleri ve köprü yapılarında kullanılır. Ayrıca, yüksek elektriksel iletkenliği nedeniyle alüminyum, elektrik dağıtım hatları ve elektronik çözümlerde de yaygın

olarak kullanılır. Alüminyum folyo, içecek ve gıda ambalajlarında, mükemmel bariyer özellikleri ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle sıkça tercih edilir [34-38].

Çizelge 3.1. Alüminyum alaşım serisi tanımlamaları [33].

Seri Tanımları	Ana Alaşım Elementi	Notlar
1xxx	%99 veya daha fazla saf alüminyum içerir.	1000 serisi alüminyum, korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliği iyi olduğu için elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılır.
2xxx	Bakır içerikli alaşımlar	Bakır içerikli alaşımlar. Yüksek mukavemet ve iyi işlenebilirlik özellikleri ile bilinir. Örneğin, 2024 alaşımı, havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılır.
3xxx	Manganez	Isıl işlem görmez, tipik olarak eloksal ve kaynak uygulamaları için kullanılır
4xxx	Silisyum	Alüminyumun birleştirilmesi için kaynak telleri ve lehimleme için kullanılır, 4043 alüminyum, genellikle kaynak tellerinde kullanılmaktadır.
5xxx	Magnezyum	Yüksek korozyon direnci ve iyi kaynak yapılabirlik özellikleri sunar. Örneğin, 5083 alaşımı, denizcilik uygulamalarında kullanılır.
6xxx	Magnezyum ve silisyum	İyi mukavemet ve mükemmel işlenebilirlik özellikleri sunar. Örneğin, 6061 alaşımı, çok amaçlı mühendislik uygulamalarında kullanılır.
7xxx	Çinko	En yüksek mukavemet özelliklerine sahip alaşımlardır. Örneğin, 7075 alaşımı, yüksek mukavemet gerektiren havacılık ve spor ekipmanlarında kullanılır.
8xxx	Diğer Elementler	Diğer elementlerle yapılan özel alaşımlar. Örneğin, 8006 alaşımı, alüminyum folyoların üretiminde kullanılır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleriyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Şekil 3.1'de havacılık sektöründe alüminyumun kullanım oranı gösterilmektedir. Yoğunluğu, dayanıklılığı,

korozyon direnci ve iletkenliği gibi nitelikleri, alüminyum otomotiv, temizlik, inşaat ve yüksek kaliteli bakım süreçlerinde vazgeçilmez hale getirir. Teknolojinin ve malzeme biliminin ilerlemesiyle, alüminyum alaşımlarının özellikleri ve kullanım alanları sürekli olarak artmakta ve çeşitlenmektedir.



Şekil 3.1. Boeing 777 uçağında kullanılan materyallerin ağırlığa göre dağılımı [39].

### 3.1.2. Alüminyum Alaşımlarının Avantajları ve Dezavantajları

Alüminyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları, bu malzemelerin mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda nasıl kullanıldığını belirler. Aşağıda, alüminyum alaşımlarının başlıca avantajları ve dezavantajları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

#### 3.1.3. Avantajlar

**Hafiflik:** Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları sayesinde hafif malzemeler olarak öne çıkar. Alüminyumun yoğunluğu yaklaşık  $2.7 \text{ g/cm}^3$  iken, çelik gibi metallerin yoğunluğu yaklaşık  $7.85 \text{ g/cm}^3$ 'tür [40]. Bu hafiflik, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yakıt verimliliğini artırmak ve taşıma maliyetlerini düşürmek için büyük bir avantaj sağlar [27]. Ayrıca, alüminyumun hafif yapısı, yapıların daha kolay monte edilmesini ve taşınmasını mümkün kılar.

**Yüksek Mukavemet:** Alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranlarıyla dikkat çeker. Alaşımlandırma ve ısıl işlemlerle mukavemet özellikleri artırılabilir. Örneğin, 7075-T6 alüminyum alaşımı, üstün mukavemet ve dayanıklılık özellikleri ile



bilinir ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılır [28]. Bu yüksek mukavemet, alüminyum alaşımlarının yapısal uygulamalarda tercih edilmesine olanak tanır.

**Korozyon Direnci:** Alüminyum, yüzeyinde oluşan ince oksit tabakası sayesinde korozyona karşı oldukça dirençlidir. Bu doğal oksit tabakası, alüminyumu paslanmaz hale getirir ve bu özelliği nedeniyle denizcilik, inşaat ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [41]. Ayrıca, alüminyum alaşımlarına eklenen elementler de korozyon direncini artırabilir. Örneğin, magnezyum içeren alaşımlar, deniz suyuna karşı yüksek dayanıklılık sergiler [42].

**İyi İşlenebilirlik:** Alüminyum alaşımları, kolay şekillendirilebilme, işlenebilme ve kaynak yapılabilme özelliklerine sahiptir. İyi işlenebilirlik, alüminyum alaşımlarının üretim süreçlerinde geniş bir yelpazede kullanılmasına olanak tanır. Özellikle 6061-T6 alüminyum alaşımı, mükemmel işlenebilirlik ve kaynak yapılabilirlik özellikleri sayesinde popülerdir [43]. Ayrıca, alüminyumun döküm, dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi çeşitli işleme yöntemleri ile şekillendirilebilmesi büyük bir avantajdır [29].

**Yüksek Isı ve Elektrik İletkenliği:** Alüminyum, yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip bir metal olarak öne çıkar. Elektrik iletkenliği bakımından bakırdan sonra en yüksek değerlere sahip metallere biridir, bu nedenle elektrik iletim hatları ve ısı eşanjörlerinde yaygın olarak kullanılır [44]. Alüminyumun üstün termal iletkenliği, soğutma sistemleri ve ısı yönetimi uygulamalarında da büyük önem taşır [37].

**Geri Dönüştürülebilirlik:** Alüminyum, kapalı döngü geri dönüşüm süreçleri sayesinde tekrar kullanılabilir. Bu geri dönüşüm süreci, enerji tüketimini ve karbon ayak izini önemli ölçüde azaltır. Geri dönüştürülmüş alüminyum, birincil alüminyum üretimine kıyasla %95 daha az enerji gerektirir [45]. Bu özellik, alüminyumu çevresel açıdan sürdürülebilir bir malzeme haline getirir ve endüstriyel atıkların azaltılmasında önemli bir rol oynar.

### 3.1.4. Dezavantajlar

**Yüksek Maliyet:** Yüksek performanslı alaşımlar ve alaşım elementleri eklenmiş alüminyum, maliyet açısından pahalı olabilir. Yüksek saflıkta alüminyum ve özel alaşımların üretim ve işleme maliyetleri yüksektir [41]. Bu durum, bazı uygulamalarda alüminyum alaşımlarının ekonomik açıdan kullanılmasını zorlaştırabilir.

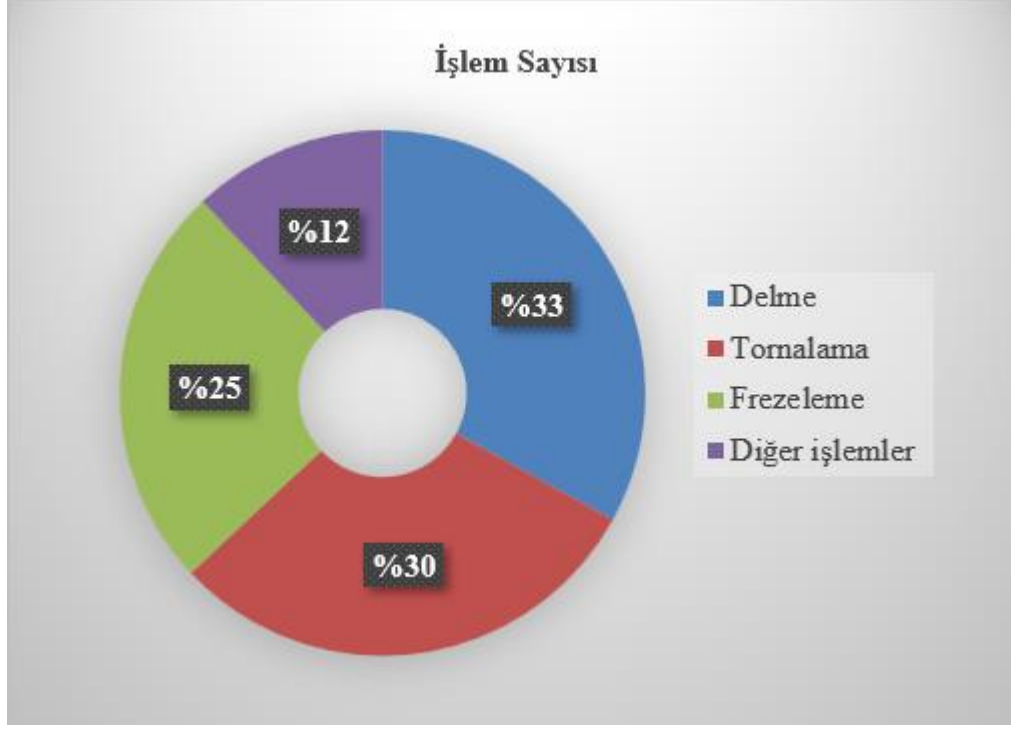
**Düşük Yüksek Sıcaklık Mukavemeti:** Alüminyum alaşımları, yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini kaybedebilir, bu da yüksek sıcaklıklarda çalışan uygulamalarda kullanımını kısıtlar. Örneğin, motor parçaları ve egzoz sistemleri gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan bileşenlerde alüminyumun kullanımı sınırlı olabilir [46]. Bu dezavantaj, bazı mühendislik uygulamalarında alternatif malzemelerin tercih edilmesine yol açabilir.

**Anodik Paslanma:** Alüminyum alaşımları, bazı ortamlarda, özellikle farklı metallere temas halinde olduğunda, galvanik korozyon riski taşır. Bu tür korozyon, alüminyumun başka bir metal ile elektrokimyasal reaksiyona girmesi sonucu meydana gelir. Özellikle denizcilik ve kimya endüstrilerinde bu sorun önemli olabilir [47]. Galvanik korozyonu önlemek için uygun koruyucu önlemler alınması gerekmektedir. Bu avantajlar ve dezavantajlar, alüminyum alaşımlarının mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda kullanımını belirleyen önemli faktörlerdir. Avantajları sayesinde birçok sektörde geniş bir kullanım alanı bulurken, dezavantajları nedeniyle bazı özel uygulamalarda sınırlamalar bulunmaktadır.

## 3.2. TALAŞLI İMALATTA DELME İŞLEMİ

### 3.2.1. Delme İşlemi ve Talaş Oluşumu

Delme işlemi, imalat endüstrisinde en kritik işlemlerden biri olarak kabul edilir. Bir imalat sürecinde delik delme, farklı talaş kaldırma tekniklerinin %33'ünü oluşturur ve bu da delme işleminin imalat endüstrisinde önemli bir yer tuttuğunu gösterir. Şekil 3.2. delme işleminin talaş kaldırma yöntemleri arasındaki önemini açıkça ortaya koymaktadır.

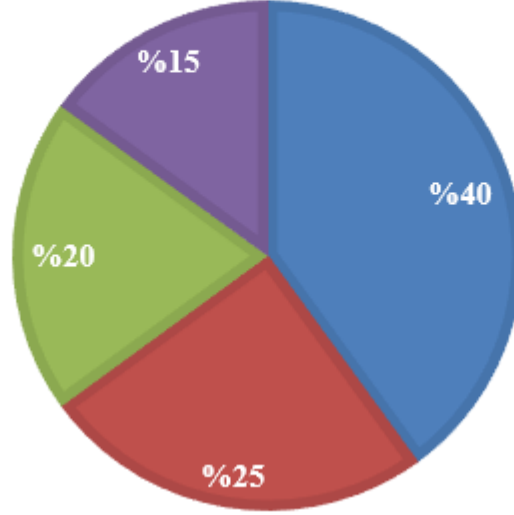


Şekil 3.2. Talaşlı imalat İşlem Sayılarına Göre Delmenin Diğer Talaş Kaldırma İşlemlerine Göre Oranı [48].

Frezeleme ve tornalama işlemleri, delik delme işlemleri ile karşılaştırıldığında, bu işlemlerin yörünge, hız, ivme ve dinamik yapılarının benzer olduğu, ayrıca talaş akışı ve kesme sıcaklığının dağılımının da aynı olduğu görülür. Ancak, delik delme işlemi kapalı bir alanda gerçekleştiği için, talaş oluşumu doğrudan gözlemlenemez ve bu durum bazı olumsuz sonuçlara yol açabilir. İş parçası ile kesici takım arasındaki sürtünme ve kesici takımdan yeterli sıcaklık uzaklaştırılamaması, başlıca sorunlar arasındadır. Bu nedenlerle, çeşitli takım geometrileri ve takım malzemeleri geliştirilmiştir. Talaş kaldırma süresinin %25'i delik delme işlemi olarak tezgâhta harcanmaktadır [48]. Talaş kaldırma süreleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

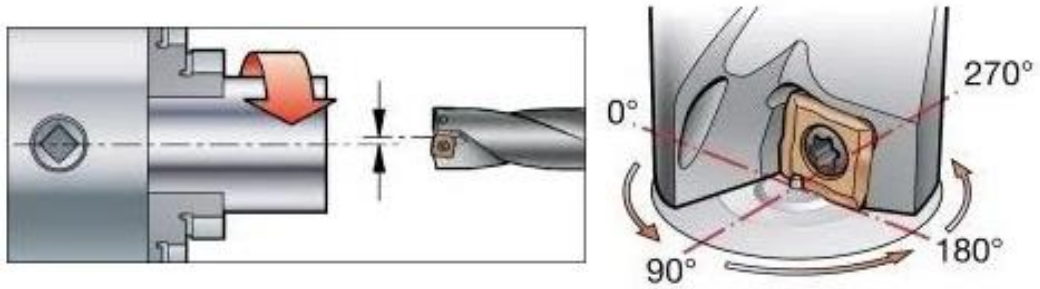
### Talaş Kaldırma Süresi

■ Tornalama ■ Delme ■ Frezeleme ■ Diğer işlemler



Şekil 3.3. Delik delme işlemlerinde geçen sürenin diğer talaş kaldırma işlemlerinde geçen süre ile karşılaştırması [48].

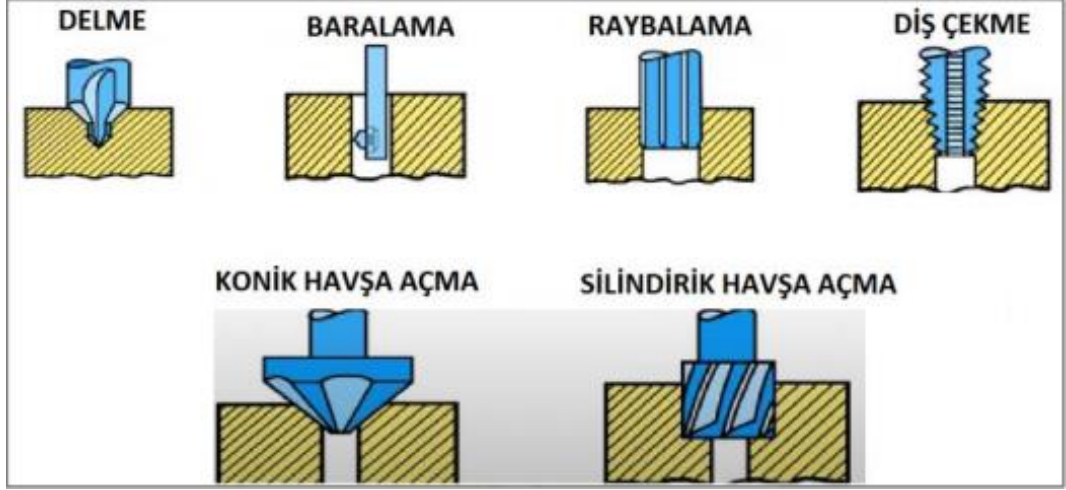
Delik delme işlemi, bir kesici takımın kendi eksenini etrafında dönerek ve iş parçasına aksel yönde ilerleyerek talaş kaldırmasıyla silindirik boşluklar oluşturma sürecidir. Bu yöntem, çeşitli endüstrilerde ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Delme işlemleri genellikle matkap ucu olarak adlandırılan kesici takımlar kullanılarak gerçekleştirilir ve çeşitli delme makineleri ile yapılabilir [49]. Örnek olarak, Şekil 3.4'te bir torna tezgahında sabit delme işlemi gösterilmektedir.



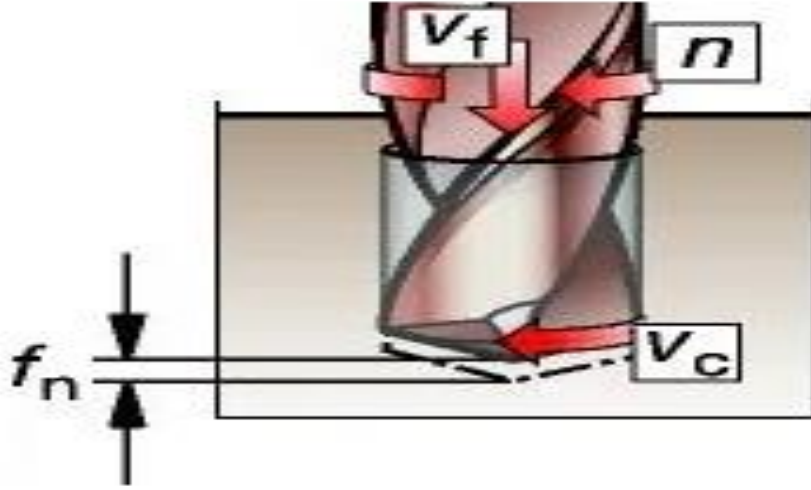
Şekil 3.4. Torna tezgahında sabit delme işlemine örnek [50].

Delme işlemi, sadece kısa veya derin delik delme işlemleri için değil, aynı zamanda raybalama, broşlama ve havşa yuvası açma gibi çeşitli son işlemler için de kullanılır.

Şekil 3.5'te farklı delme işlemleri gösterilmektedir. Bu işlemlerin ortak özelliği, ana dönme hareketinin doğrusal ilerleme hareketiyle birlikte gerçekleştirilmesidir [52].



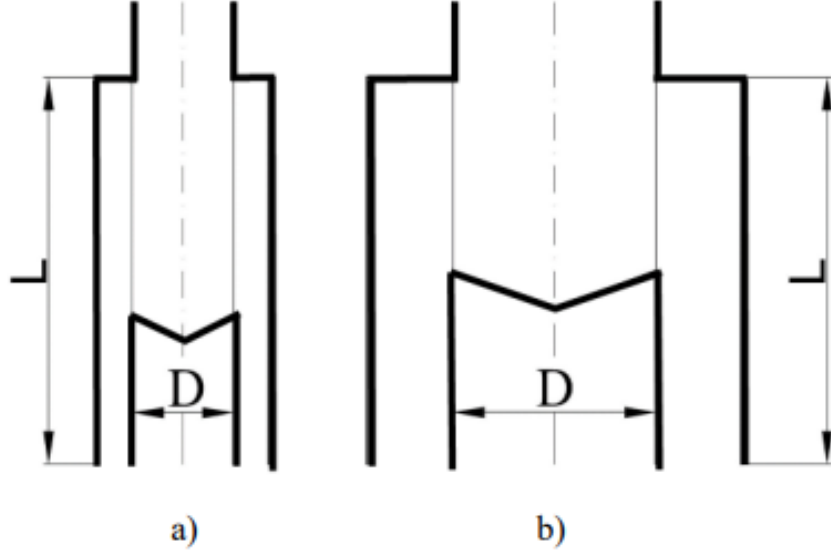
Şekil 3.5. Delik delme çeşitleri [51].



Şekil 3.6. Kesici takımın dönmesi (n), ilerlemesi (Vf) [53].

Delik delme işlemleri, torna tezgahı ve matkap tezgahı gibi makinelerde gerçekleştirilebilir. Matkap tezgahında yapılan delme işlemlerinde, iş parçası sabit kalırken, kesme işlemi matkap ucu ile gerçekleştirilir. Matkap tezgahı, matkap ucunun hem kendi eksenini etrafında dönmesini hem de eksenini boyunca ilerlemesini sağlayarak kesme işlemini başlatır [54]. Bu sayede, delik delme işlemi verimli ve hassas bir şekilde gerçekleştirilir.

Delik delme işlemlerinde, delik uzunluğunun delik çapının 10 katı veya daha fazla olduğu durumlarda bu delikler uzun delikler olarak adlandırılır. Delik uzunluğu/çap oranı 4 ile 10 arasında olan delikler normal delikler, 3 veya daha düşük olan delikler ise kısa delikler olarak sınıflandırılır. Bu delikler aşağıda ki şekil 3.7' de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Delik delme işleminde boy/çap ilişkisi a) Derin delik b) Kısa delik [55].

Delik delme işleminde, kesme bölgesindeki talaşın uzaklaştırılması ve kesme sıvısının etkili bir şekilde uygulanamaması, diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre zorluklar yaratır. Matkap ile delme işlemi sırasında, matkap ve iş parçası arasındaki yüksek sürtünme ve talaş açısının kesici takımın ağzı boyunca değişmesi nedeniyle, kesici uç bölgesinde değişken koşullar ortaya çıkar. Bu sebeple, matkap ile talaş kaldırma işlemi, diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre daha karmaşık ve değişken koşullar içerir. Bu farklı koşulları en aza indirmek amacıyla çeşitli kesici takım malzemeleri ve farklı takım geometrileri geliştirilmiştir [56].

İstenilen yüzey kalitesine sahip delikler açmak için işlenecek malzemenin türüne uygun matkap ucu seçilmelidir. İş parçasının malzemesine göre kesme bölgesindeki talaşın verimli bir şekilde uzaklaştırılması için doğru takım geometrisi, delme hızı ve ilerleme hızı gibi parametrelerin doğru ayarlanması gereklidir. Uygun olmayan kesme parametreleri, kalın ve kısa talaşların oluşmasına ve yüksek itme kuvvetlerinin

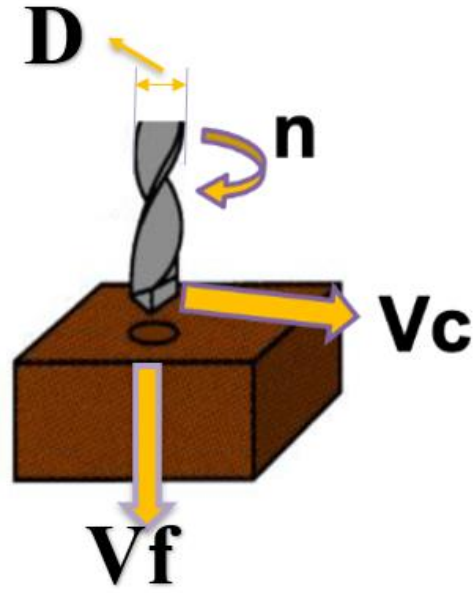
artmasına yol açabilir. Bu durum, kesici takımın delik ekseninden sapmasına ve titreşimlerin artmasına neden olur. Düşük kesme hızlarında ve düşük ilerleme hızlarında yumuşak ve kapalı talaşlar oluşurken, yüksek kesme hızlarında ve yüksek ilerleme hızlarında sert ve açık formda talaşlar meydana gelir. Bu nedenle, delik delme işlemi sırasında talaşların kesme bölgesinden etkili bir şekilde uzaklaştırılması, delik yüzey kalitesinin korunması ve talaş sıkışmalarının önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Kesme bölgesindeki talaşların spiral veya virgül şeklinde olması ve kesici takımın helis kanallarından sorunsuz bir şekilde çıkarılması, delik delme işleminde arzu edilen talaş kaldırma yöntemi olarak kabul edilir [57].

### 3.2.2. Delme İşleminde Temel Parametreler

Kesme hızı ( $V_c$ ), talaş kaldırma işlemlerinde kesici takımın metre cinsinden bir dakikada aldığı yola kesme hızı olarak ifade edilir ve aşağıdaki formül ile hesaplamaları yapılır.

$$V_c = (D \times \pi \times n) / 1000 \text{ m/dak} \quad (3.1)$$

Delme işlemlerinde, ana hareket iş parçası veya kesici takım tarafından yapılan dönme hareketidir. Bu hareketi tanımlayan ana mil hızı ( $n$ ), dakikada yapılan devir sayısı olarak ifade edilir. Delme işlemi için kesme hızı ( $V_c$ ), çevresel hız kullanılarak belirlenir ve dakikadaki devir sayısı biliniyorsa kolayca hesaplanabilir. Kesici takımın çapı ( $D$ ) üzerinden, takım kendi eksenini etrafında bir dönüş gerçekleştirdiğinde çevresi  $\pi \times D$  olan bir daire çizer (Şekil 3.8). Çapın mm cinsinden verilmesi durumunda, kesme hızının m/dak cinsinden ifade edilebilmesi için sonuç 1000'e bölünür.



Şekil 3.8. Delik delme işleminde takımın dönmesi ve takımın ilerlemesi [58].

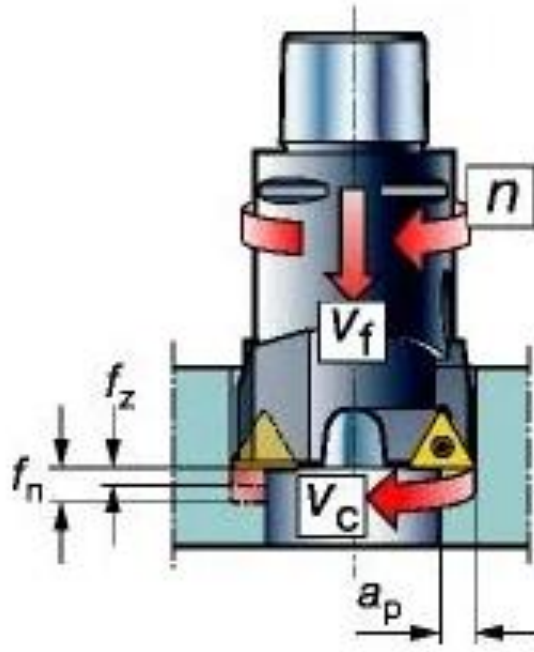
İlerleme hızı ( $V_f$ ), (mm/dak) biriminde, matkabın belirli bir süre zarfında iş parçasına uyguladığı hareket mesafesini ifade eder. Bu, aynı zamanda iş parçasının kesici takıma göre ya da kesici takımın iş parçasına göre gerçekleştirdiği harekettir [59-60]. Tablann veya tezgahın hareket hızı olarak da tanımlanabilen bu değer, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$V_f = f \times n \text{ mm/dak} \quad (3.2)$$

Devir başına ilerleme ( $f$ , mm/dev), iş parçasının veya kesici takımın bir devirde kat ettiği mesafeyi ifade eden bir parametredir ve ilerleme hızının belirlenmesinde kullanılır. Talaş genişliği ( $a_p$ ), delme işlemi sırasında oluşan radyal talaş kalınlığı olarak tanımlanır ve kesici takımın iş parçasıyla temas ettiği alanı belirtir. Bu genişlik, tornalama işlemlerinde olduğu gibi, yarıçap birimi ile ölçülür. Şekil 3.9'da talaş genişliğinin gösterimi yer almaktadır.

$$a_p = (D - d) / 2 \text{ mm} \quad (3.3)$$





Şekil 3.9. Delme işlemlerinde, talaş genişliği, kesici kenar başına ilerleme [53].

Talaş kesit alanı (A), takım üzerinde birden fazla kesici kenar bulunduğundan (z kesici kenar sayısı) her bir kesici kenarın ilerleme değeri ( $f_z$  - mm/z) ile tanımlanır. Bu alan, bir kesici kenarın çıkardığı malzeme miktarını ifade eder ve radyal talaş derinliği ile kesici kenar başına ilerlemenin çarpılması sonucu elde edilir (Şekil 3.9). Talaş kesit alanı, aşağıdaki formül ile hesaplanır:

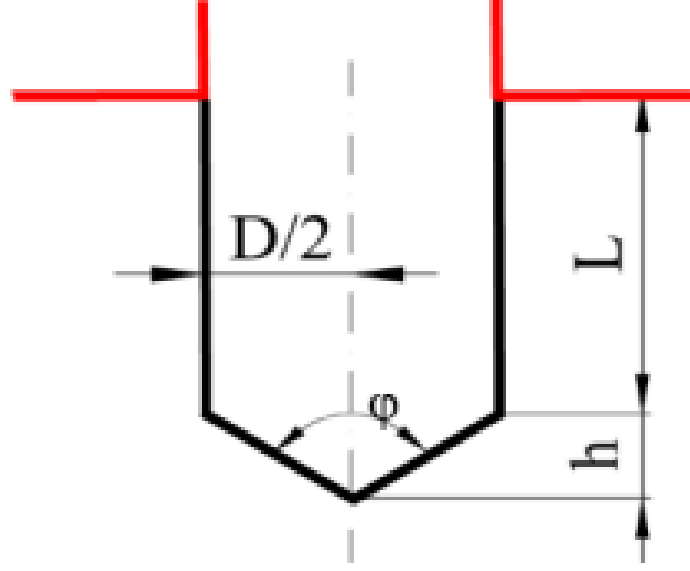
$$f_z = f/z \text{ mm/kenar} \quad (3.4)$$

$$A = a_p \times f_z \text{ mm}^2 \quad (3.5)$$

Talaş hacmi (V), talaş debisi ( $V$ , mm<sup>3</sup>/dak) olarak da bilinir ve belirli bir süre içinde çıkarılan talaş miktarını ifade eder. Bu hacim, talaş kesit alanının kesme hızı ile çarpılmasıyla bulunur. Kesme hızı metre/dakika (m/dak) cinsinden ifade edildiğinde, talaş debisini milimetre küp/dakika (mm<sup>3</sup>/dak) olarak hesaplamak için sonuç 1000 ile çarpılır. Talaş hacmi şu formülle hesaplanır:

$$V = A \times V_c \times 1000 \text{ mm}^3/\text{dak} \quad (3.6)$$

Efektif işleme zamanı (T), ilerleme uzunluğunun (L + h, mm) ilerleme hızına bölünmesiyle (T, dak) hesaplanır. Delme işlemi sırasında matkabın kat ettiği mesafe, delik derinliği ile kesici takım ucu yüksekliğinin toplamına eşittir (Şekil 3.10) [55].



Şekil 3.10. Delik delme işleminde toplam delik derinliği [55].

Toplam delik derinliği ve efektif işleme zamanı aşağıdaki formüller ile hesaplanır.

$$h = D / 2 \times \cot (\varphi / 2) \text{ mm} \quad (3.7)$$

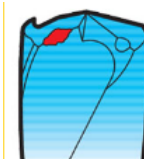


$$T = (L + h) / V_f \text{ dak} \quad (3.8)$$

### 3.2.3. Kesici Takım Aşınması

Kesici takım aşınması, talaşlı imalat süreçlerinde önemli bir faktördür ve işlenen parçanın kalitesini ve operasyonun genel verimliliğini doğrudan etkiler[61]. Kesici takım aşınma mekanizmalarının, türlerinin ve bu aşınmayı etkileyen faktörlerin anlaşılması, işleme koşullarının optimize edilmesi ve takım ömrünün uzatılması için gereklidir [62-63]. Kesici takım aşınmasının olası nedenleri ve çözümleri, Çizelge 3.2'de gösterilmiştir [64].

İş parçası malzemesindeki sert parçacıkların, kesici takımını çizerek ve aşındırarak neden olduğu aşınma türüne abrasif aşınma denir. Bu aşınma, sert malzemelerin veya aşındırıcı kalıntılar içeren malzemelerin işlenmesi sırasında yaygındır [65]. İşleme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar, iş parçası malzemesinin kesici takıma yapışmasına yol açabilir ve bu durum adhesif aşınma olarak adlandırılır. Kesici takım hareket ederken bu yapışmış parçalar, takım yüzeyinden malzemeleri kopararak aşınmaya neden olur [66]. Yüksek sıcaklıklarda, takım ile iş parçası arasında kimyasal elementlerin difüzyonu meydana gelebilir; bu, takım malzemesinin kaybına ve sertliğinin azalmasına yol açar, bu tür aşınma difüzyon aşınması olarak bilinir [67]. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar takım malzemesinin oksitlenmesine neden olabilir. Oluşan oksitler genellikle daha yumuşak olup, kesme işlemi sırasında kolayca aşınabilir [68]. Tekrarlanan ısıtma ve soğutma döngüleri termal yorgunluğa neden olarak takım malzemesinde çatlaklar oluşturabilir. Bu çatlaklar ilerleyerek takım parçalarının kopmasına sebep olabilir [69].

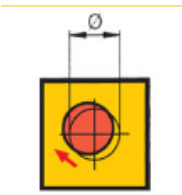
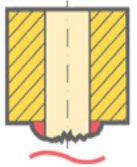
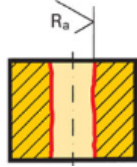
Çizelge 3.2. Kesici takım aşınması olası nedenleri ve çözümleri [64].

Aşınma Türü	Olası Nedenler	Çözümler
 <p>Talaş yığılması</p>	<p>Kesme hızının aşırı düşük ve kenar sıcaklığı</p> <p>Kesme sıvısı yetersiz yağ yüzdesi</p> <p>Kaplamasız takım</p>	<p>Kesme hızı artırılmalı</p> <p>Kesme kenarları daha keskin olmalı</p> <p>Kaplamalı kesici takım kullanılmalı</p> <p>Kesme sıvısında yeterli yağ oranı olmalı</p>
 <p>Kesme kenarının köşesinde ufalanma</p>	<p>Rijit olmayan koşullar, iş parçasını iyice sabitleme.</p> <p>İlerleme hızı yüksek</p> <p>Kesintili kesim</p> <p>Merkezden sapma</p>	<p>İş parçasını sabitleme</p> <p>İlerlemeyi düşürün.</p>
 <p>Kesme kenarında geniş aşınma ve yıpranma</p>	<p>İlerleme hızı çok düşük</p> <p>Kesme hızı çok yüksek</p> <p>Boşluk açısı çok küçük</p> <p>Kesme sıvısı yetersiz</p> <p>Kesici takım çok yumuşak</p>	<p>İlerleme hızını artırın</p> <p>Kesme hızını azaltın</p> <p>Kesici takım daha sert olmalı, kesme sıvısı yeterli olmalı</p>

Çizelge 3.2. (Devam ediyor)

 <p>Kesme kenarında ufalanma</p>	<p>Rijit olmayan koşullar ve iş parçasının güçlü bir şekilde bağlanmaması Kesintili kesim Maksimum aşınma ve yıpranma değerleri aşıldı Yanlış takım seçimi</p>	<p>İş parçasını gerekli şekilde sıkıştırılması. İlerlemeyi düşürün. Takım değiştirme aralıklarını azaltın. Uygun kesici takım seçimi daha yumuşak.</p>
 <p>Kesici takım gövdesi üzerinde aşınma</p>	<p>Rijit olmayan koşullar ve iş parçasının güçlü bir şekilde bağlanmaması Aşındırıcı malzemeler Kesintili kesim</p>	<p>Kesme sıvısı yağ oranı artırılmalı veya gerekirse saf yağ kullanılmalı İlerleme azaltılmalı İş parçası gerekli sıklıkta sıkıştırılmalı</p>
 <p>Uc kesme bölgesinde yoğun aşınma ve yıpranma</p>	<p>Kesme hızı çok düşük Çok yüksek ilerleme Kesme ağzı aşırı honlanması</p>	<p>Kesme hızını artırın İlerlemeyi azaltın Kesme ağzı honlamayı azaltın</p>
 <p>Web incelmesi ve kesme kesişiminde ufalanma</p>	<p>Boşluk açısı çok küçük Kesme ağzının aşırı honlanması Yanlış kesici takım seçimi</p>	<p>Boşluk açısı artırılmalı Kesme ağzı honlaması azaltılmalı Uygun kesici takım seçimi</p>
 <p><b>Dairesel alanda aşınma</b></p>	<p>Rijit olmayan koşullar ve iş parçasının güçlü bir şekilde bağlanmaması Arka koniklik çok küçük Yanlış soğutma sıvısı (yağ), çözünebilir yağ çok ince</p>	<p>İş parçasını gerekli şekilde sıkıştırılması Arka konikliği artır Kesme sıvısında yeterli yağ oranı olmalı</p>

Çizelge 3.2. (Devam ediyor)

 <p><b>Yanlış hizalama, eksen kayması</b></p>	<p>Rijit olmayan koşullar, iş parçasının yeteri kadar bağlama</p> <p>Eş merkezlikten sapma çok büyük</p>	<p>İş parçasının güçlü şekilde sıkıştırılması</p> <p>Mümkünse eş merkezliliği kontrol edin ve düzeltin</p> <p>Puntalama için freze çakısı (çift yivli) kullanın</p>
 <p><b>Atılımda ağır çapaklanma</b></p>	<p>Çok yüksek besleme</p> <p>Maksimum aşınma ve yıpranma değerleri aşıldı</p> <p>Kesme dudagının aşırı honlanması</p>	<p>İlerlemeyi azalt</p> <p>Takım değiştirme aralıklarını azaltın</p> <p>Kesme ağzı honlamasını azaltın</p>
 <p><b>Yetersiz yüzey Kalitesi</b></p>	<p>Rijit olmayan koşullar, iş parçasını yeterli sıkılıkta bağlamama</p> <p>Eş merkezlikten sapma çok büyük</p> <p>Yetersiz soğutma sıvısı</p>	<p>İş parçasının gerekli şekilde sıkıştırılması</p> <p>Mümkünse eş merkezliliği kontrol edin ve düzeltin</p> <p>Soğutma sıvısını artırın (hacim basıncı)</p>

### 3.2.3.1. Kesici Takım Aşınma Türleri

**Yan Aşınma:** Aşındırıcı ve yapışma aşınma mekanizmaları sonucu, takımın yan yüzeyinde aşınma meydana gelir. Bu, kesme kenarına paralel uzanan bir aşınma bandı ile karakterizedir [70].

**Krater Aşınması:** Kesici takımın talaş yüzeyinde, aşındırıcı, yapışma ve difüzyon aşınmalarının birleşimi sonucu aşınma meydana gelir. Bu aşınma, bir çukur veya krater oluşturarak kesme kenarının zayıflamasına neden olabilir [71].

**Oluk Aşınması:** Kesme derinliği hattında meydana gelen bu aşınma, mekanik ve termal gerilmelerin birleşik etkisiyle oluşur [72].

**Çentiklenme:** Kesme kenarından küçük parçaların kopması sonucu oluşan bu aşınma türüne çentiklenme denir ve genellikle mekanik şok veya termal gerilmeler nedeniyle

meydana gelir. Çentiklenme, kesme verimliliğinin hızla azalmasına ve takımın başarısız olmasına neden olabilir [73].

### 3.2.3.2. Kesici Takım Aşınmasını Etkileyen Faktörler

**Kesme Hızı:** Yüksek kesme hızları, kesme bölgesindeki sıcaklığı artırarak difüzyon ve oksidasyon gibi aşınma mekanizmalarını hızlandırır [74].

**İlerleme Hızı:** Yüksek ilerleme hızları, malzeme çıkarma oranını artırarak takım üzerinde daha büyük mekanik gerilmeler oluşturur ve aşınma oranlarını yükseltir [75].

**İş Parçası Malzemesi:** Daha sert ve aşındırıcı malzemeler, daha yüksek takım aşınmasına yol açar. Yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler, sıcaklık dağılımını değiştirerek aşınma mekanizmalarını etkileyebilir [76].

**Takım Malzemesi:** Takım malzemesinin seçimi aşınma direncini önemli ölçüde etkiler. Yaygın takım malzemeleri arasında yüksek hız çeliği (HSS), karbür, seramik ve kübik bor nitrür (CBN) bulunur ve her biri farklı aşınma mekanizmalarına karşı farklı direnç sunar [77].

**Kesme Ortamı:** Soğutucular ve yağlayıcıların kullanımı, sıcaklıkları ve aşınma oranlarını düşürmede etkili olabilir. Minimum Miktarda Yağlama (MQL) ve kriyojenik soğutma gibi yöntemler, takım aşınmasını etkin bir şekilde yönetmek için giderek daha yaygın olarak kullanılmaktadır [78].

### 3.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, delik delme işlemlerinde elde edilen yüzeyin mikro düzeydeki düzensizliklerinin bir göstergesidir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, iş parçasının yüzeyinde istenmeyen dalgalanmalar ve çıkıntılar anlamına gelir, bu da delik kalitesini ve parçanın genel performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Yüzey pürüzlülüğü, çeşitli faktörlerden etkilenir ve bu faktörlerin dikkatlice kontrol edilmesi gereklidir.

Kesme hızı ve ilerleme hızı, yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyen en önemli parametreler arasındadır.

Yüksek kesme hızları genellikle daha pürüzsüz yüzeyler sağlar, çünkü bu hızlar daha keskin kesimler ve daha az titreşim ile sonuçlanır. Ancak, aşırı yüksek hızlar takım aşınmasını hızlandırarak yüzey pürüzlülüğünü artırabilir. Düşük ilerleme hızları, takımın malzeme ile daha fazla temas süresi olmasını sağlayarak daha düzgün bir yüzey elde edilmesine yardımcı olur. Ancak, çok düşük ilerleme hızları verimliliği düşürebilir ve işlem süresini uzatabilir [79-80].

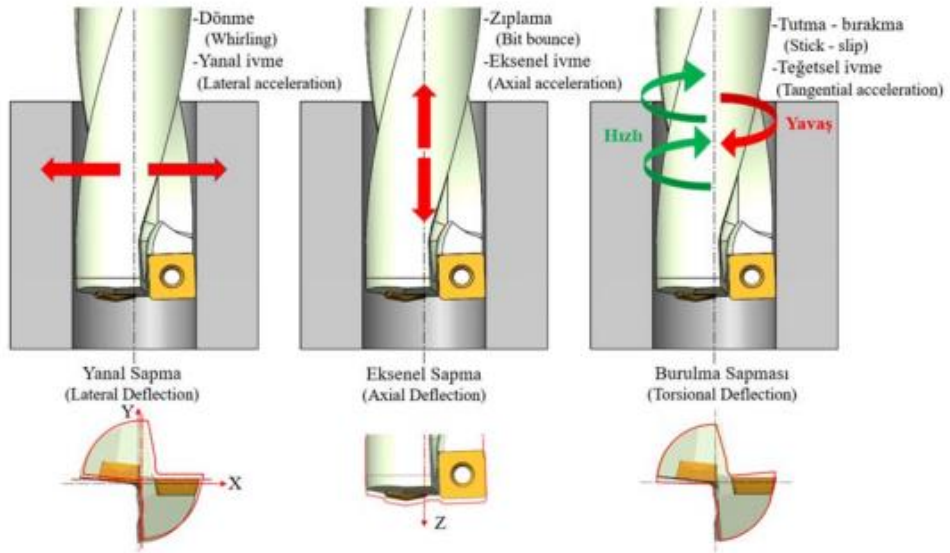
Yüzey pürüzlülüğü, delik delme işlemleri sırasında yüzeyde oluşan pürüzlerin bir göstergesidir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, düşük kaliteli deliklerin bir işaretidir ve bu hataların önlenmesi için uygun kesme hızları ve kesme sıvıları kullanılmalıdır. Takım malzemesi ve geometrisi de yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkiler. Karbür veya elmas uçlar gibi sert takım malzemeleri, daha az aşınma ve daha keskin kesici kenarlar sağlar, bu da daha düşük yüzey pürüzlülüğüne yol açar. Uygun takım geometrisi, kesme işlemi sırasında daha az titreşim ve daha düzgün kesim sağlar. Keskin kesme kenarları ve doğru kesme açısı, yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azaltır [81-82].

İş parçasının malzeme özellikleri de yüzey pürüzlülüğünü etkiler. Sert malzemeler daha fazla kesme kuvveti gerektirir, bu da yüzey pürüzlülüğünü artırabilir. Ancak uygun takım ve kesme sıvıları ile bu olumsuz etki minimize edilebilir. Yumuşak malzemeler genellikle daha düşük kesme kuvvetleri gerektirir ve daha pürüzsüz yüzeyler sağlar. Ancak, yumuşak malzemelerin işlenmesi sırasında takımın dolması veya malzemenin yüzeyde deformasyona uğraması gibi sorunlar da ortaya çıkabilir [83-84].

Delik delme işlemi sırasında oluşan titreşimler, yüzey pürüzlülüğünü artıran başlıca faktörlerden biridir. Titreşimlerin azaltılması, yüzey pürüzlülüğünü iyileştirebilir. Bu, uygun kesme parametrelerinin seçimi ve stabil makine kurulumları ile sağlanabilir [85]. Stabil bir makine kurulumu, delik delme sırasında meydana gelen titreşimleri ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünü azaltır. Bu, takım tutucuların ve makine parçalarının doğru şekilde monte edilmesi ile başarılabılır.

### 3.2.5. Çaptan Sapma (Ölçüden Sapma)

Delik çapı sapmaları, delik delme işlemlerinde sıkça karşılaşılan ve delik kalitesini belirleyen önemli bir sorundur. Bu sapmalar, istenilen nominal çap ile elde edilen gerçek çap arasındaki farklılıkları ifade eder. Delik çapı sapmaları, ürün kalitesini, montaj süreçlerini ve nihai ürün performansını olumsuz etkileyebilir. Delme işlemi sırasında dönme, yanal ve burulma-eksenel olmak üzere üç tip titreşim modundan bahsedilmektedir [86]. Şekil 3.13'te bu sapmalar gösterilmiştir. Bu üç titreşim modu, takımın yanal, ekstenel ve burulma hareketleriyle sapmalara neden olmaktadır. Yanal sapmalar, boyut ve şekil toleranslarının bozulmasına yol açmaktadır [87].



Şekil 3.11. Takım sapmaları [88].

Delik delme işlemi sırasında kullanılan matkap uçları, sürekli kesme kuvvetlerine maruz kalarak aşınır. Bu aşınma, matkap ucunun keskinliğini kaybetmesine ve delik çapının genişlemesine neden olabilir [82]. Ayrıca, aşınmış bir matkap, delik düzgünlüğünü de olumsuz etkileyebilir. CNC makineleri veya manuel matkap makinelerindeki mekanik bileşenlerin toleransları, delik çapında sapmalara yol açabilir [89]. Özellikle, makine bileşenlerindeki oynama, eksen kaymaları veya yanlış hizalamalar, delik çapının nominal değerden sapmasına neden olur. İş parçasının malzeme özellikleri de delik delme işlemleri sırasında delik çapında sapmalara yol

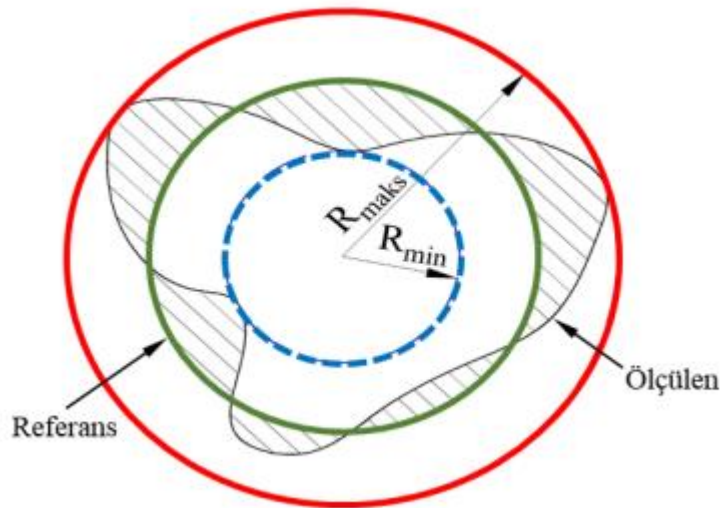


açabilir. Örneğin, yumuşak malzemeler matkabın sapmasına ve delik çapının artmasına neden olabilirken, sert malzemeler takımın aşırı ısınmasına ve dolayısıyla çap sapmalarına yol açabilir. Delik delme işlemi sırasında oluşan ısınma, iş parçasının ve matkabın genişlemesine neden olabilir. Yetersiz soğutma sıvısı kullanımı, termal genişlemeyi artırarak delik çapında sapmalara yol açabilir [89].

### 3.2.6. Dairesellikten Sapma (Ovalite)

Delik delme işlemleri sırasında deliklerin ideal dairesel formdan sapmasını ifade eden bir durumdur. Dairesellikten sapma, deliklerin ideal yuvarlak şekillerinden farklılaşması anlamına gelir ve bu da montaj problemlerine, parça işlevselliğinde azalmaya ve genel ürün kalitesinin düşmesine yol açabilir. Ovalite, özellikle hassas montaj ve yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda ciddi bir sorun teşkil eder. Dairesellikten sapma, delme işlemi sırasında oluşan deliğin ideal dairesel formundan ne kadar uzaklaştığını gösterir.

Bu sapma, takımın titreşimi, iş parçasının malzemesi, delme hızları ve kesme sıvısının kullanımı gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir [90]. Ovalite, belirli bir merkez noktadan ölçülen en büyük ( $r_{max}$ ) ve en küçük ( $r_{min}$ ) yarıçap farkı ile belirlenir ve Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Dairesellik ölçümlerinde kullanılan LSC metodu [91].

Delik merkezi, en küçük merkez daire (LSC) ve minimum radyal sapma (MRS) gibi yöntemlerle belirlenir. LSC yönteminde merkez nokta, radyal koordinatlarının kareleri toplamı en küçük olan nokta olarak tanımlanır [92].

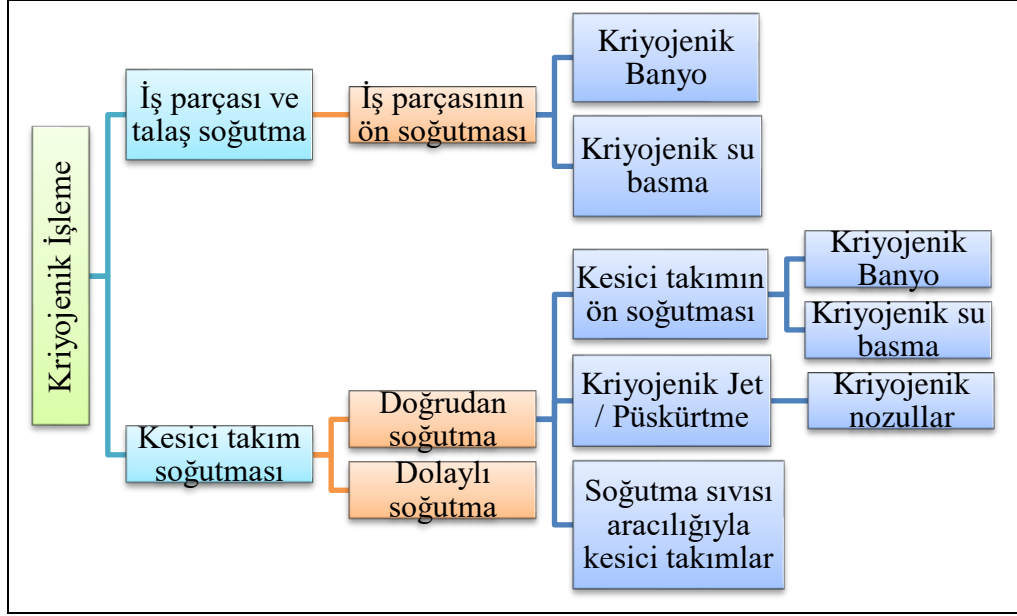
Takım aşınması, yanlış takım seçimi, makine toleransları, takım titreşimi ve kesme kuvvetleri gibi faktörler, dairesellikten sapmaya neden olan başlıca etkenlerdir. Bu dinamiklerin kontrol altına alınması, yüksek kaliteli delikler elde etmek için gereklidir.

### **3.3. KRIYOJENİK SOĞUTMA**

Kriyojenik işleme, işleme malzemelerinin çok düşük sıcaklıklardaki davranışını ve kriyojenik maddelerin işleme sürecinde kullanımını inceleyen bir bilim dalıdır. Kriyojenikler, takım ile iş parçası ve takım-talaş arayüzü arasındaki sürekli sürtünme nedeniyle oluşan yüksek sıcaklıkları önemli ölçüde azaltabildikleri için işleme sürecinde bir soğutma maddesi olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Kriyojenik işlemenin geleneksel yöntemlere göre avantajları arasında daha temiz, daha güvenli, çevre dostu (çevresel tehlikeleri yoktur), maliyet tasarrufu, talaş kaldırma oranının artması (daha yüksek kesme hızları), daha iyi yüzey kalitesi, takım ömrünün artması, sürtünmenin ve güç tüketiminin azalması, verimliliğin artması yer almaktadır [94].

Sıvı azot, talaşlı imalat uygulamalarında en yaygın kullanılan kriyojenik soğutucudur [93]. LN2 yanıcı olmayan, çevre dostu bir gazdır, toksik değildir ve kullanıldıktan sonra herhangi bir etki bırakmaz. Ayrıca -196°C derecelik düşük sıcaklığı, işleme süreciyle ilişkili kesme sıcaklıklarını büyük ölçüde azaltır. Uygulamaların çoğunda sıvı nitrojen gaz halinde kullanılır, ancak daha kolay ve daha ucuz bir teslimat ve tedarik yöntemi sağladığı için genellikle sıvı fazında büyük tanklarda depolanır. Ti-6AL-4V tornalamada CO2 ve LN2 kriyojenik soğutucuları arasında yapılan bir karşılaştırmada, CO2'nin yüzey pürüzlülüğünü, yan aşınmayı ve kesme kuvvetlerini azaltmada daha etkili olduğunu gösterirken, LN2'nin işleme süreciyle ilişkili yüksek sıcaklıkları azaltmada CO2'den daha etkili olduğu bulunmuştur [95].

Kriyojenik işlem, farklı işleme uygulamalarında ve metaller ve kompozitler dahil olmak üzere birçok malzeme türünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle imalat, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, performanslarını artırmak ve daha uzun hizmet ömrü sağlamak için bazı parçalarda sertlik ve mukavemet gibi yüksek malzeme özelliklerinin istendiği veya termal ve elektrik iletkenliğinin artırılmak istendiği durumlarda kullanılmaktadır. Örneğin, dişliler ve krank milleri gibi motor parçalarının mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak, kesme işlemleri için daha iyi kesici takım tokluğu ve aşınma direncine sahip olmak için kriyojenik işlem genellikle üç aşamada gerçekleştirilir: yavaş soğutma aşaması, ıslatma aşaması ve temperleme ısınma aşaması [96]. Bu aşamalar, istenen malzeme özelliklerine, zamana ve maliyete bağlı olarak değiştirilebilir ve işlem, parçanın bir süre sıvı nitrojen banyosuna daldırılmasını içerir. Düşük sıcaklıklara maruz kaldığında malzeme özellikleri değişir ve bu da mikro yapısında değişikliklere yol açar. Örneğin, demirli metaller kriyojenik olarak işlendiğinde, daha iyi termal özellikler ve daha düşük yüzey sürtünmesi elde edilir, bu da işlendikten sonra daha iyi yüzey kalitesi sağlar. Ancak, yüksek maliyetler süreçle ilişkilidir ve zamanla ilişkili maliyetleri azaltmak için numuneyi mümkün olduğunca hızlı bir şekilde işlem sıcaklığına soğutarak önlenebilir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıklardan kaynaklanan termal şok riski vardır ve bu, işlenmiş malzemeye zarar verebilir. Bu nedenle, işlenmiş numuneye zarar vermemek için sıcaklık kontrolü önemli olup, bu yöntem tercih edilir. Kesici takımların kriyojenik işlem sürecinin adımlarının ayrıntılı bir incelemesi ve çeşitli kesici takım türleri üzerindeki faydaları Gill ve diğerleri tarafından özetlenmiştir [97]. Talaşlı imalat operasyonlarında uygulanan kriyojenik soğutma yöntemleri, Yıldız ve Nalbant'a göre Şekil 3.15'te gösterildiği gibi sınıflandırılabilir [93, 96].



Şekil 3.13. Kriyojenik işleme stratejileri.

### 3.4. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MQL)

Minimum Miktarla Yağlama (MQL), modern imalat süreçlerinde kesme sıvılarının ve soğutma yöntemlerinin kullanımını optimize etmeye yönelik yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu teknik, kesme işlemleri sırasında kullanılan yağ miktarını minimum seviyede tutarak çevresel etkileri azaltmayı ve işlem verimliliğini artırmayı amaçlar. Aşağıda, MQL'nin tanımı, avantajları, uygulamaları, bileşenleri ve geleneksel yağlama yöntemleriyle karşılaştırılması ele alınmıştır.

Minimum Miktarla Yağlama (MQL), kesme sıvısının çok düşük miktarlarda, genellikle birkaç mililitre/saat oranında, kesme bölgesine uygulandığı bir yağlama tekniğidir. Bu yöntem, özellikle talaşlı imalat işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. MQL sistemleri, basınçlı hava ile yağı ince bir film şeklinde kesme bölgesine püskürtür. Bu hem yağlama hem de soğutma etkisi yaratarak işleme verimliliğini artırır [98].

#### 3.4.1. MQL'nin Avantajları

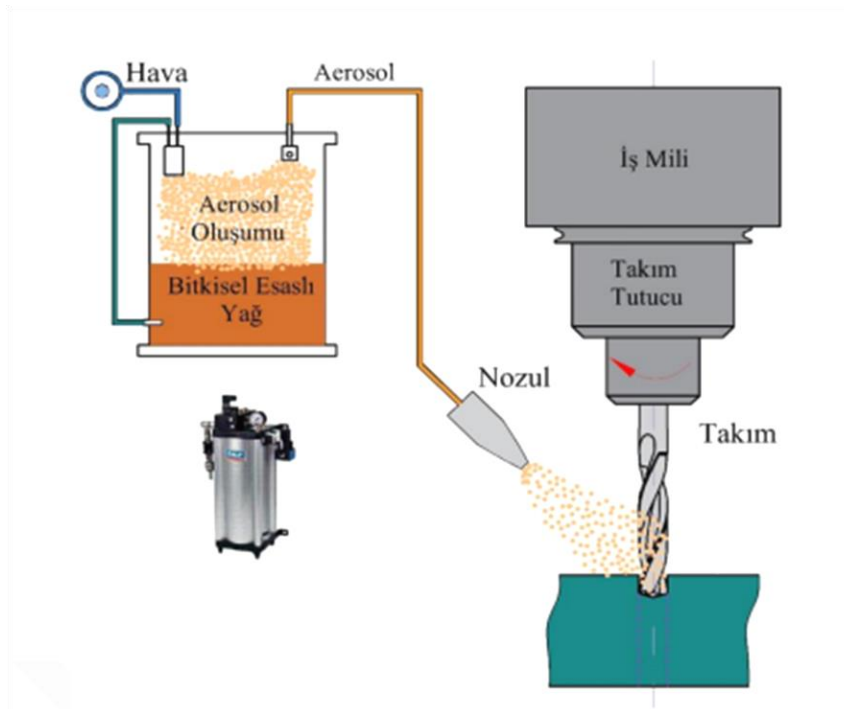
Minimum Miktarla Yağlama (MQL), kesme sıvısı kullanımını büyük ölçüde azalttığı için çevresel atıkları ve işleme sırasında oluşan tehlikeli atıkları minimize eder.

Geleneksel kesme sıvılarının aksine, MQL daha az atık üretir, bu da atık yönetimi maliyetlerini düşürür [99]. Daha az yağ kullanılması, maliyetlerin düşmesini sağlarken, MQL ile işlenen parçaların temizlik maliyetleri de azalır. Ayrıca, MQL uygulamaları enerji tasarrufu sağlayarak işletme maliyetlerini düşürür [100].

MQL, kesme bölgesinde yeterli yağlama ve soğutma sağlayarak takım ömrünü uzatır ve yüzey kalitesini iyileştirir. Bu da üretim verimliliğini artırır ve işleme süresini kısaltır [101]. MQL, özellikle yüksek hızda talaş kaldırma işlemleri, sert malzemelerin işlenmesi ve mikro işleme gibi çeşitli uygulamalarda etkin olarak kullanılmaktadır. Örneğin, alüminyum ve alaşımlarının işlenmesinde MQL'nin, takımların ömrünü uzattığı ve yüzey kalitesini artırdığı gözlemlenmiştir [102]. Bu uygulamalar, otomotiv, havacılık ve elektronik gibi birçok endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 3.4.2. MQL Sistemlerinin Bileşenleri

Minimum Miktarda Yağlama (MMY) uygulamalarında, kesme sıvısı basınçlı hava ile birlikte özel hortumlar aracılığıyla taşınarak bir nozul yardımıyla kesme bölgesine iletilir (Şekil 3.15). Bir MQL sistemi genellikle şu bileşenlerden oluşur:



Şekil 3.14. Minimum miktarda yağlama uygulaması [103].

Yağ dozajlama ünitesi, yağın miktarını ve püskürtme oranını kontrol eden hassas bir sistemdir ve yağın kesme bölgesine doğru miktarda uygulanmasını sağlar. Basınçlı hava kaynağı, yağın ince bir sis şeklinde püskürtülmesini sağlayarak kesme bölgesine homojen bir dağılım ve etkili bir yağlama sunar. Püskürtme nozulları, yağın kesme bölgesine doğru şekilde yönlendirilmesini sağlar ve bu nozullar, kesme işleminin türüne ve işlenen malzemenin özelliklerine göre farklı şekillerde tasarlanabilir [104].

### **3.4.3. MQL ve Geleneksel Yağlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması**

Geleneksel yağlama yöntemleri, büyük miktarlarda kesme sıvısı kullanarak soğutma ve yağlama sağlar, ancak bu yöntemler yüksek maliyetler, çevresel sorunlar ve iş güvenliği riskleri doğurur. MQL ise bu dezavantajları minimize ederek daha sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm sunar [105]. Geleneksel yöntemlerde kesme sıvısının büyük bir kısmı atık olarak değerlendirilirken, MQL ile bu atık miktarı önemli ölçüde azalır. Minimum miktarda yağlama (MQL), modern imalat süreçlerinde önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Çevresel ve ekonomik avantajları, yüksek işleme performansı ve geniş uygulama alanları ile MQL, geleceğin imalat teknolojilerinde önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Bu teknik, endüstriyel üretimde sürdürülebilirliği ve verimliliği artırma potansiyeline sahiptir.

## BÖLÜM 4

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 4.1. DENEY MALZEMESİ

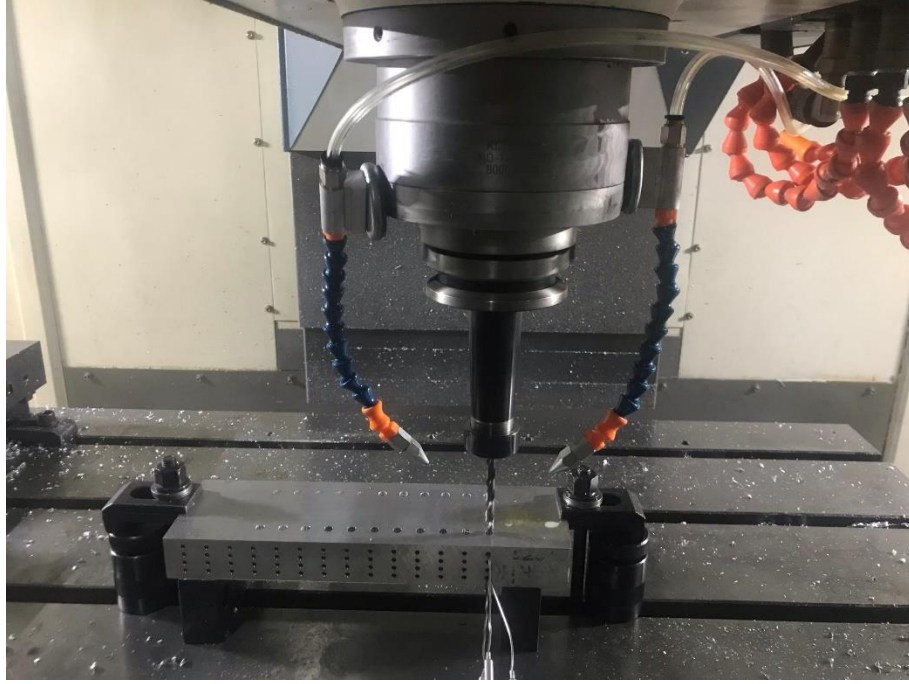
Bu çalışmada AA 7075-T6 alaşımı deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deney malzemesi Seykoç Alüminyum firmasından 100x50x50 mm ölçülerinde temin edilmiştir. AA 7075-T6 alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AA 7075 alaşımının % kimyasal bileşimi.

Fe	Cu	Mn	Mg	Si	Cr	Zn	Ti	Al	Diğerleri
0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	<0,4	0,18-0,28	5,1-6,1	<0,2	Kalan	0,15

#### 4.2. TAKIM TEZGAHI

Delme deneyleri, Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda yer alan Hanssa YH 1600-A CNC Dik işleme tezgahında gerçekleştirilmiştir. Takım tezgâhı, 18,5 kW iş mili motor gücüne sahiptir. Şekil 4.1’de delme deneyi düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.1. Delme deneyi düzeneği.

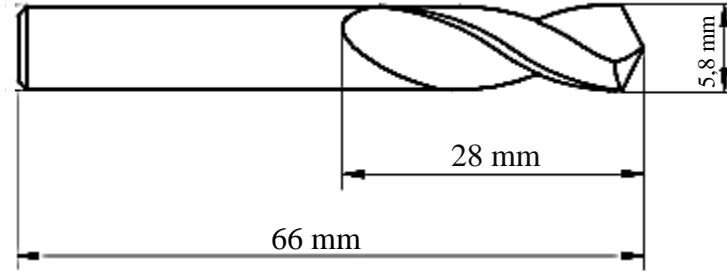
### 4.3. DENEYLERDE KULLANILAN KESME PARAMETRELERİ

Deneylerde kullanılan tungsten karbür matkap uçları 5,8 mm çapında DIN 6537 Standardında Guhring kesici takım firmasında tedarik edilmiştir. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde üretici takım firmasının önerileri ve literatürde alüminyum alaşımlarının delinmesi üzerine yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.2’de ve tungsten karbür matkap ucunun boyutları Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Kesme Parametreleri	I	II	III
Ct	Kesici Takım	Ham	Kriyojenik	
Ort	İşleme Şartı	Kuru	Hava	MQL
Vc	Kesme hızı (m/dak)	40	60	80
f	İlerleme miktarı (mm/diş)	0,04	0,06	0,08





Şekil 4.2. Tungsten karbür matkap ucunun ölçüleri

#### 4.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

Her bir delme deneyi sonrası deliklerin yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesinde Mahr Perthometer M1 cihazı kullanılmıştır. Ölçümler öncesi master aracılığıyla yüzey pürüzlülüğü cihazının kalibrasyonu sağlanmıştır. Pürüzlülük ölçümlerinde örnekleme uzunluğu ( $\lambda$ ) 0,8 mm ve ölçme uzunluğu (L) 5,6 mm seçilmiştir. Delinen deliklerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri delik eksenine paralel şekilde dört ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri hesaplanmıştır.

#### 4.5. KESME SICAKLIĞI ÖLÇÜMÜ

Delik delme deneylerinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın ölçülmesinde K tipi ısı-çift (Termokupl) kullanılmıştır. Isıl-çiftler delik eksenine dik şekilde aralarında 10 mm mesafe olacak şekilde 3 mm çapında ve 20 mm derinliğinde açılan deliklere yerleştirilmiştir. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklık verisi Pico marka veri kaydedici ve PicoLog 8 kanallı veri kayıt yazılımı ile elde edilmiştir.

#### 4.6. ÇAPTAN VE DAİRESELLİKTEN SAPMA ÖLÇÜMLERİ

Delik kalitesinin göstergesi olarak yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra çaptan ve dairesellikten sapma gibi unsurlarda dikkate alınmıştır. Çaptan ve dairesellikten sapma ölçümleri DEA marka CMM koordinat ölçüm cihazında, iş parçası yüzeyi referans kabul edilerek yüzden 4, 17 ve 30 mm derinliklerde alınan on ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Şekil 4.3'te Çaptan ve Dairesellikten sapma ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.3. CMM cihazı ve ölçüm düzeneği

#### 4.7. KRİYOJENİK İŞLEMİN UYGULANMASI

Şekil 4.4'te kriyojenik işlemin uygulandığı soğutma sistemi görülmektedir. Bu sistemde izole bir kutu (kriyo kutusu), sirkülasyon fanlı bir motor, bir sıcaklık kontrolörü (PLC kontrollü) ve programlayıcıya bağlı kutunun içindeki kriyojenik sıcaklığı ölçmek için bir termokupl, bir sıvı nitrojen tankı ve gaz girişi kontrollü için bir solenoid valf'den oluşmaktadır. Matkaplara kriyojenik işlem  $-196^{\circ}\text{C}$ 'ye  $2^{\circ}\text{C}/\text{dak}$  soğutma hızı ile kademeli olarak derin olarak uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem kesici takımlara 24 saat süreyle uygulanarak tamamlanmıştır. Kriyojenik işlemin ardından  $180^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat bekletmek suretiyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem parametrelerinin belirlenmesinde literatürde tungsten karbür takımlara kriyojenik işlem uygulanan çalışmalar dikkate alınmıştır.



Şekil 4.4. Kriyojenik soğutma sistemi.

#### **4.8. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ**

Mikro sertlik ölçümleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan TTS Matsuzawa HWMMT-X3 marka mikro sertlik ölçme cihazında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik değerleri, her bir numune üzerinden beşer ölçüm yapılarak ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

#### **4.9. MİKROYAPI İNCELEMELERİ**

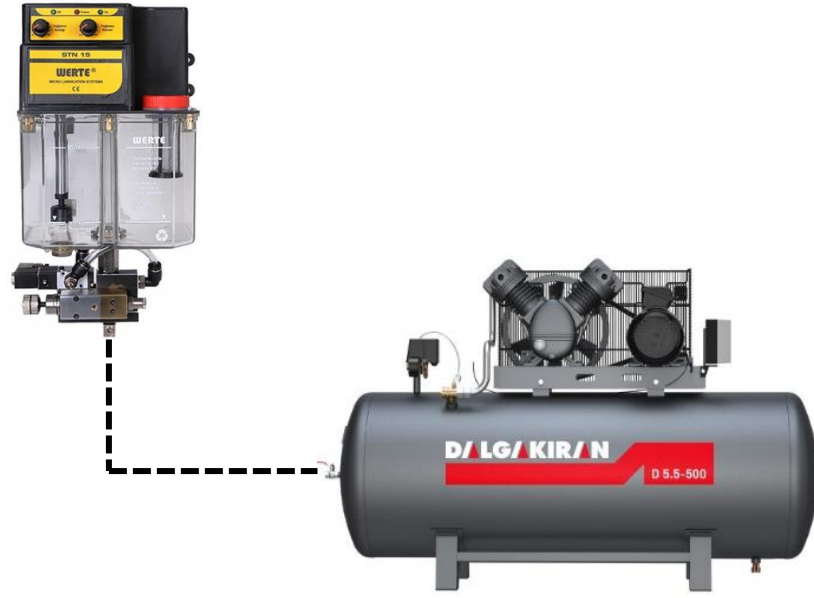
Ham kesici takıma göre kriyojenik işlemin kesici takımların mikroyapısında meydana getirdiği değişimleri belirlemek optik metal mikroskobu ve SEM mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikroyapı görüntüleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Metalografik inceleme işlemi, bakalite alınan numunelerin zımparalanma, parlatılma ve elmas süspansiyon işlemleri sonrası dağlanarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4.10. SOĞUTMA YÖNTEMİ

MQL soğutma yönteminde soğutucu akışkan bir nozul aracılığıyla basınç altında sis buharı şeklinde işleme alanına iletilmektedir. Deneylerde soğutucu akışkan olarak Çizelge 4.3'te özellikleri verilen bio-stabil yarı sentetik metal işleme sıvısı kullanılmıştır. Kesme sıvısının işleme alanına iletilmesinde Werte Mikro STN 15 model MQL (Minimum Miktarda Yağlama) sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.5'te MQL soğutma sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Delme deneyleri, MQL sistemi 8 bar püskürtme basıncında ve 0,028 ml/sn debide olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kesme sıvısının işleme alanına iletilmesinde 2 mm çapa sahip çift nozul matkaba 45° açı yapacak şekilde birbirine karşılıklı 30 mm mesafede konumlandırılarak kullanılmıştır. Hava soğutma şartı da CNC takım tezgahında tertibatlı olan soğutma ünitesi üzerinden 8 bar püskürtme basıncında sağlanmıştır.

Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan kesme sıvısının özellikleri.

Özellik	Birim	Test Metodu	Açıklama
pH		-	9,5
Yoğunluk	15 °C, kg/m <sup>3</sup>	ASTM D 4052	1,070
Görünüş	-	-	Berrak-kızıl
Koku	-	-	kahve
Akma noktası	°C, max	ASTM D 97	Tipik -22
Kırılma İndisi	n20/D	ASTM D 1218	1,4222
Emülsiyon	5% deminarilize su	-	Geçer
Emülsiyon Kararlılığı	24 saat	-	



Şekil 4.5. MQL soğutma sisteminin şematik görüntüsü.

#### 4.11. DENEY TASARIMI

Delik kalite üzerinde takım tezgâhı rijitliği, tutucu, kesici takım, iş parçası malzemesi, kesme parametresi ve işleme koşulu gibi etkili olan birçok proses parametresi vardır. Delik kalitesinin iyileştirilmesi için optimum işleme koşulunun ve kesme parametrelerinin seviyelerinin optimizasyonu önem arz etmektedir. Bu çalışmada ham ve kriyojenik işlem uygulanan matkaplar ile AA 7075 alaşımının delinmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerinde kuru hava ve MQL işleme şartları ve kesme parametrelerinin etkisini istatistiksel olarak irdelenerek nihai sonuca ulaşmak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda deney tasarımı Taguchi L18 ( $4^4 \times 2^1$ ) dizinine göre yapılmıştır. Delme deneylerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı sırasıyla  $S/N$  gürültü, varyans (ANOVA) ve regresyon analizlerine tabi tutulmuştur.  $S/N$  sinyal-gürültü oranı analizi; yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için Kuru, hava ve MQL işleme şartları ile delme parametrelerinin optimum seviyelerinin tanımlamak için kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için Eş. 4.1'deki "en küçük en iyi eşitliği" yaklaşımı, kullanılarak  $S/N$  oranları belirlenmiştir. Ardından Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerinde girdi parametrelerinin etki seviyelerini belirlemek için Anova analizi yapılmıştır. Doğrusal regresyon analizi kullanılarak yüzey

pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için tahmin denklemleri geliştirilmiştir. Modellenen bu tahmin denklemlerinin doğruluğunu test etmek için Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 kullanılarak güven aralığı (*CI*) değerleri hesaplanmış olup her bir çıktı parametresi için optimum ve rastgele delme parametresi kombinasyonunda hata yüzdeleri belirlenmiştir. Güven aralığı değeri ve hata yüzde oranlarına göre her bir çıktı için Optimizasyon işleminin doğruluğu kontrol edilmiştir.

$$n = \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.1)$$

$$n = \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

$$CI_{RaFc} = \sqrt{F_{\alpha,1,fe} V_e \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (4.3)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (4.4)$$

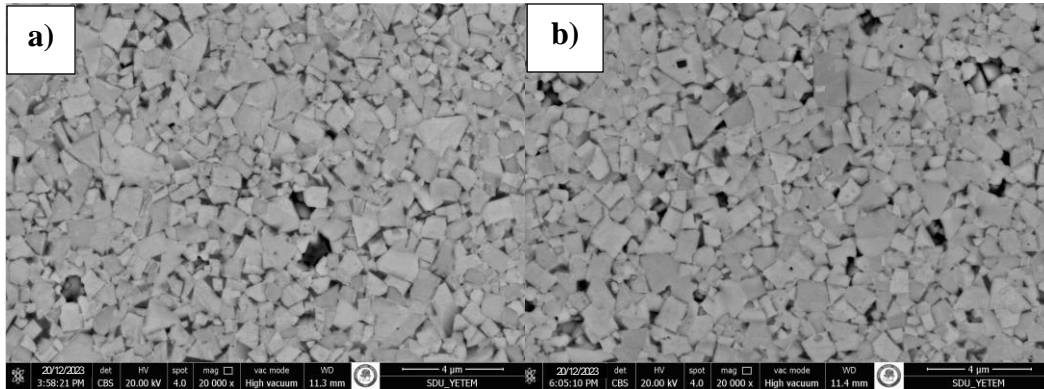
Eşitlik 4.3 ve 4.4'te yer alan  $F_{\alpha,1,fe}$  ifadesindeki  $F$  oranı %95 güven seviyesini,  $\alpha$  anlamlılık düzeyini,  $fe$  hata serbestlik derecesini ifade ederken,  $V_e$  hata varyansı,  $R$  doğrulama deneyleri için tekrar sayısı,  $n_{eff}$  etkili yineleme sayısı,  $T_{dof}$  toplam serbestlik derecesi ve  $N$  toplam deney sayısı anlamına gelmektedir [106].

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 5.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 5.1'de ham ve kriyojenik işlem uygulanan matkapların (SEM) görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerine bakıldığında  $\alpha$ -fazı, gri renkli alanlar olup yapının büyük bir kısmını oluştururken,  $\beta$  fazı,  $\alpha$ -fazı sınırlarını çevreleyen açık renkli beyaz bölgeler olup daha küçük miktardadır ve ayrıca, koyu gri noktalar  $\eta$ -fazı karbürlerini oluşturmaktadır. Ham takıma göre kriyojenik işlem uygulanan takımda  $\eta$ -fazı karbürlerini daha fazla olduğu ve  $\eta$  fazı karbürlerinin daha homojen bir dağılım içinde olduğu görülmektedir.  $\eta$ -fazı karbürlerinin miktarı ve dağılımına göre kesici takımların sertlik ve aşınma direncinde önemli bir artış olduğu görülmektedir. Mikrosertlik sonuçları da ham kesici takıma göre kriyojenik işlem uygulanmış takımların sertliğinin yaklaşık olarak %7,45 arttığını göstermektedir. Gill ve arkadaşları bu durumu ince eta ( $\eta$ ) karbür parçacıklarının kriyojenik işlem sırasında çökmesi ve kobalt bağlayıcının yer aldığı alana nüfus etmesi ile açıklamışlardır [107].



Şekil 5.1. Tungsten karbür takımların mikroyapıları: a) işlemsiz, b) kriyojenik işlem uygulanmış

## 5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.2.1. S/N Oranlarının Analizi

Kriyojenik işlem uygulanan ve uygulanmayan matkaplar ile farklı soğutma ortamlarında AA7075 alaşımının delinmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Delme şartlarının ideal seviyelerinin belirlenmesinde S/N analizinden yararlanılmıştır. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) ve her bir delme şartı için bu değerlere karşılık gelen S/N değerleri Çizelge 5.1’te yer almaktadır. S/N oranının hesaplanmasında Eşitlik 4.1 “en küçük en iyi” denklemi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalaması ve ortalama S/N oranı değerleri sırasıyla 0,804  $\mu\text{m}$  ve 2,638 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ve S/N oranları.

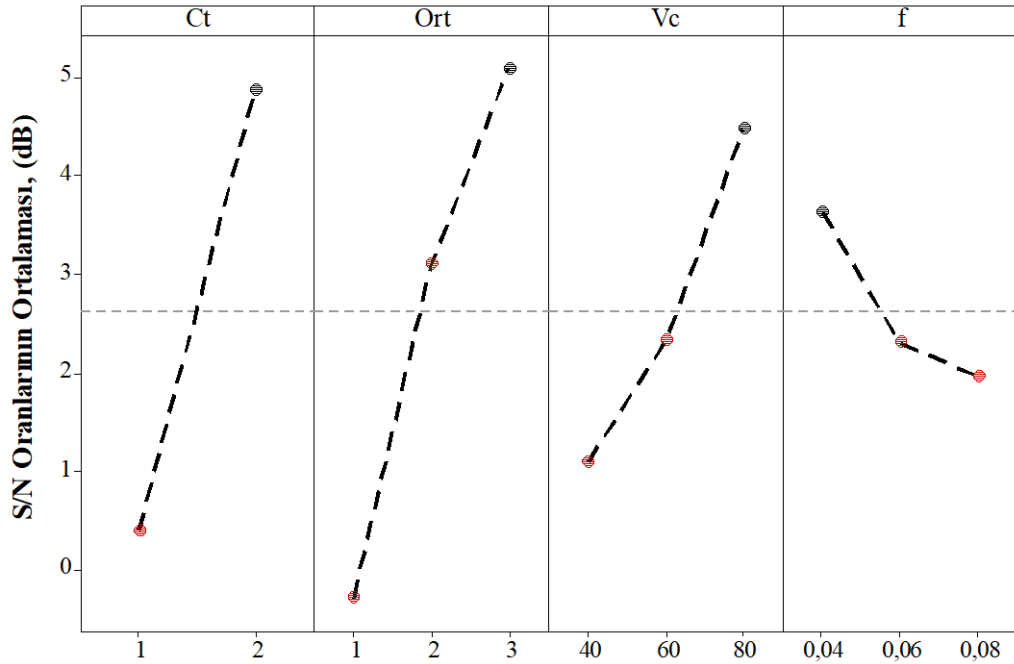
Test No	Kesme Parametreleri				Ra	S/N
	A (Ct)	B (Ort)	C (V)	D (f)		
1	İUT	Kuru	40	0,04	1,550	-3,8066
2	İUT	Kuru	60	0,06	1,325	-2,4443
3	İUT	Kuru	80	0,08	1,017	-0,1464
4	İUT	Hava Des. İşleme	40	0,04	1,041	-0,3490
5	İUT	Hava Des. İşleme	60	0,06	1,133	-1,0846
6	İUT	Hava Des. İşleme	80	0,08	0,874	1,1698
7	İUT	MQL Des. İşleme	40	0,06	0,798	1,9599
8	İUT	MQL Des. İşleme	60	0,08	0,691	3,2104
9	İUT	MQL Des. İşleme	80	0,04	0,556	5,0985
10	KİT	Kuru	40	0,08	1,055	-0,4650
11	KİT	Kuru	60	0,04	0,851	1,4014
12	KİT	Kuru	80	0,06	0,651	3,7284
13	KİT	Hava Des. İşleme	40	0,06	0,567	4,9283
14	KİT	Hava Des. İşleme	60	0,08	0,653	3,7017
15	KİT	Hava Des. İşleme	80	0,04	0,306	10,2856
16	KİT	MQL Des. İşleme	40	0,08	0,606	4,3505
17	KİT	MQL Des. İşleme	60	0,04	0,347	9,1934
18	KİT	MQL Des. İşleme	80	0,06	0,459	6,7637



Çizelge 5.2 deneysel ölçümler ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri için  $S/N$  oranlarının yanıt tablosunu, Şekil 5.2’de delme parametrelerinin seviye değerlerini grafik formda göstermektedir. Sonuç olarak, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin elde edildiği optimum delme parametresi kombinasyonu  $A_2B_3C_3D_1$  olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım, MQL destekli işleme, 80 m/min kesme hızı ve 0,04 mm/tooth ilerleme miktarı ideal delme parametreleri seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen delme deneyleri sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,294  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.2. Ra için S/N analiz sonucu.

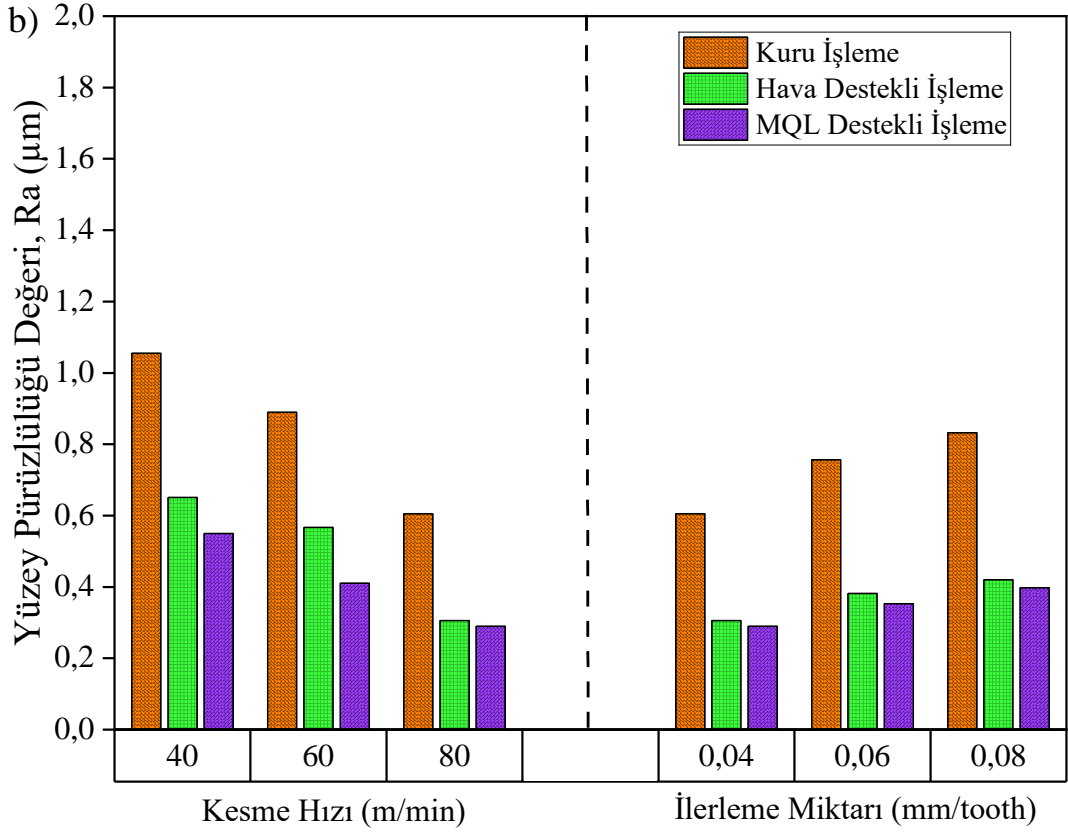
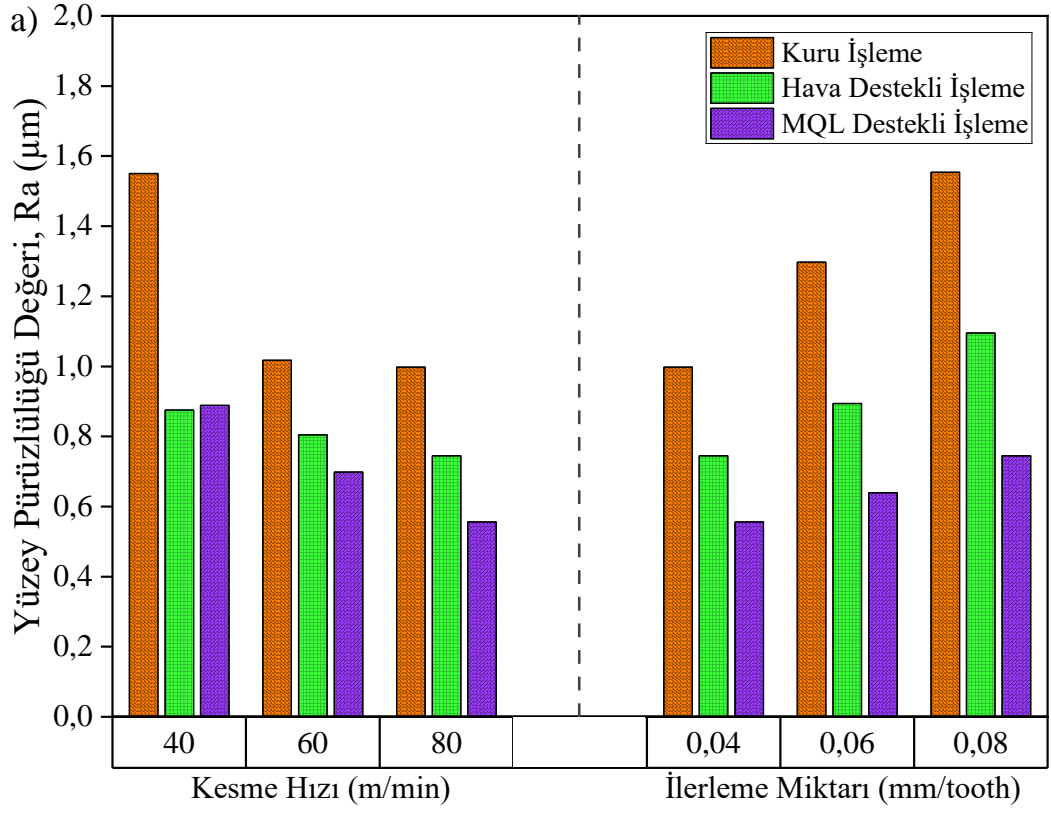
	Kesme Parametreleri			
	A	B	C	D
<b>Ra</b>				
1	0,4009	-0,2888	1,1030	<b>3,6372</b>
2	<b>4,8765</b>	3,1086	2,3297	2,3086
3		<b>5,0961</b>	<b>4,4833</b>	1,9702
Delta	4,4756	5,3849	3,3802	1,6670



Şekil 5.2. Ra için S/N oranlarına göre kesme parametrelerinin dağılımı.

### 5.2.2. Deneý Sonuçlarının Deęerlendirilmesi

Ham ve kriyojenik işlem uygulanan matkaplar ile AA7075 alaşımının delme deneýleri, kuru, hava ve MQL destekli işleme Őartlarında farklı kesme hızı ve ilerleme miktarlarında gerçekleştirilmiştir. Őekil 5.3 a) ham b) kriyojenik işlem uygulanan takımlar ile gerçekleştirilen delme deneýlerinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde soğutma ortamı ve kesme parametrelerinin etkilerini göstermektedir. Őekil 5.3 incelendiğinde, iki kesici takım için kesme hızındaki artışla yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığı ancak ilerleme miktarındaki artış ile arttığı gözlenmiştir. Kesme hızındaki değişim dikkate alındığında, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 40 m/min kesme hızında kuru, hava ve MQL destekli işleme Őartlarında ham kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneýlerde sırasıyla 1,550 0,875 ve 0,889 m olarak llmřtir. Aynı kesme Őartlarında kriyojenik işlem uygulanan kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneýlerde ise yüzey pürüzlülüğü değeri sırasıyla 1,055 0,651 ve 0,55 m olarak llmřtir. Ham kesici takım kullanılarak kuru, hava ve MQL destekli işleme Őartlarında kesme hızının %50 arttırılması ile gerçekleştirilen deneýlerde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %34,38 %8 ve %21,48 azaldığı, kesme hızının %100 arttırılmasıyla yapılan deneýlerde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %35,31 %14,35 ve %37,45 azaldığı grlmştir. Benzer Őekilde, kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlar ile kuru, hava ve MQL destekli işleme Őartlarında kesme hızının %50 arttırılması ile gerçekleştirilen deneýlerde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %15,53 %12,30 ve %25,45 azaldığı, kesme hızının %100 arttırılmasıyla yapılan deneýlerde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %42,55 %52,39 ve %47,37 azaldığı grlmştir. Benzer Őekilde, Chaanthini ve arkadaşları, AA 6063 alaşımının kuru ve kriyojenik n soğutma ortamında delinmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında, orta ve yüksek kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığını bildirmişlerdir [108]. Uddini ve arkadaşları da AA 6061 alaşımının delinmesinde delik kalitesini değerlendirdikleri çalışmalarında, iř mili hızındaki artış ile yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığını ve düzgün delik yüzeyi elde etmek için düşük ila orta iř mili hızı ve ilerleme hızının seçilmesini tavsiye etmişlerdir [109].



Şekil 5.3 İşleme koşuluna göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.

İşleme şartının yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde etkili bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Her iki kesici takım için MQL destekli işleme şartında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kuru ve hava destekli işleme şartlarında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinden daha düşüktür. Her bir kesici takım için gerçekleştirilen bütün ölçümlerin ortalamaları dikkate alındığında, ham kesici takım için kuru ve hava destekli işleme şartlarına göre MQL destekli işleme şartında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %81,58 ve %26,35 daha az olduğu, kriyojenik işlem uygulanan kesici takım için ise kuru ve hava destekli işleme şartlarına göre MQL destekli işleme şartında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sırasıyla %107,02 ve %14,38 daha az olduğu tespit edilmiştir. Kesme bölgesine soğutucu akışkanın iletilmesi ile yağlama fonksiyonunun artmasının bir sonucu olarak kesici takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmenin azalması yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde olumlu bir etkiye neden olmuştur [110]. Öndin ve arkadaşları, bu durumu MQL tekniğinde kullanılan uçucu yağlayıcıların takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak daha iyi bir film tabaka oluşturması (penetrasyonu) ile açıklamışlardır [111]. Benzer bir çalışmada, Abas ve arkadaşları MQL soğutma sistemi kullanarak AA6026-T9 alaşımını tormaladıkları çalışmalarında, yüzey kalitesinde %30 varan oranda iyileşme olduğunu bildirmişlerdir [112]. Chatha ve arkadaşları da nanoakışkan katkılı minimum miktarda yağlama etkisi altında AA 6063 alaşımının delinmesinde işleme performansını değerlendirdikleri çalışmalarında, kuru ve petrol bazlı kesme sıvısı ile işleme şartına göre MQL işleme şartında yüzey kalitesinin daha iyi olduğunu ve ayrıca, iş parçası-takım arayüzündeki daha etkili yağlama ve soğutma ile matkap takımına talaş kaynaklanmasının daha az olduğunu bildirmişlerdir [113].

Yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin etkinliği kıyaslandığında, ham kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre kriyojenik işlem uygulanan kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin %72,31 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kriyojenik işlem sonrası kesici takımda ince karbürlerin oluşmasıyla artan sertlik ve aşınma direnciyle ilişkilendirilmiştir [114-117].

### 5.2.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde işleme koşulu ve kesme parametrelerinin etkinliğini analiz etmek için Anova uygulanmıştır. Anova sonuçları Çizelge 5.3'te yer almaktadır. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü üzerinde (*Ct*) kesici takım, (*Ort*) soğutma şartı, (*Vc*) kesme hızı ve (*f*) ilerleme miktarı için etki oranları sırasıyla %35,62 %40,11 %13,89 ve %0,41 olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre %40,11 katkı oranı ile soğutma şartı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.3. Ra için varyans analizi sonuçları.

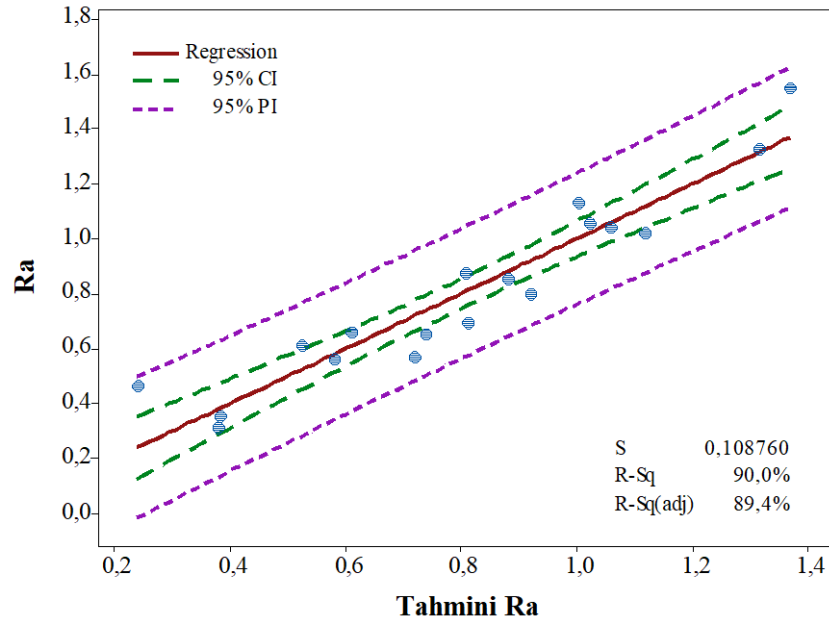
Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
<i>Ct</i>	1	0,67667	0,676672	35,75	0,000	35,62
<i>Ort</i>	2	0,76197	0,380983	20,13	0,000	40,11
<i>Vc</i>	2	0,26389	0,131944	6,97	0,013	13,89
<i>f</i>	2	0,00783	0,003914	0,21	0,817	0,41
Hata	10	0,18926	0,018926			9,96
Total	17	1,89961				100

### 5.1.4. Regresyon Analizi

Kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki ilişki regresyon analizi kullanılarak matematiksel olarak ifade edilmiştir. Tahmin denklemleri doğrusal regresyon modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (*Ra*) için doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri Çizelge 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.4 doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile deneysel sonuçları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (*Ra*) için doğrusal regresyon modeli ile geliştirilen tahmin denkleminin  $R^2$  değeri %89,49 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için tahmin denklemleri.

Kesici Takım	İşleme Şartı	Tahmin Denklemi
İşlemsiz Takım	Kuru İşleme	$Ra = 1,646 - 0,00731Vc + 1,02f$
İşlemsiz Takım	Hava Destekli İşleme	$Ra = 1,333 - 0,00731Vc + 1,02f$
İşlemsiz Takım	MQL Destekli İşleme	$Ra = 1,147 - 0,00731Vc + 1,02f$
Kriyojenik İşlem Uygulanan Takım	Kuru İşleme	$Ra = 1,258 - 0,00731Vc + 1,02f$
Kriyojenik İşlem Uygulanan Takım	Hava Destekli İşleme	$Ra = 0,946 - 0,00731Vc + 1,02f$
Kriyojenik İşlem Uygulanan Takım	MQL Destekli İşleme	$Ra = 0,760 - 0,00731Vc + 1,02f$



Şekil 5.4. Ra için tahmini ve test sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi deneysel değerlere oldukça yakın tahmin sonuçları elde edilmiştir. Optimizasyon işleminin başarısının görülmesi açısından optimize edilmiş koşulun doğrulanması gerekmektedir. Bir önceki bölümde doğrulama deneyinin nasıl uygulanacağı aşamaları ile açıklanmıştır ve bu değinilen aşamalar uygulanmıştır. Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak CI güven aralığı değeri belirlenmiştir. Bu hesaplamada Çizelge 5.5'te verilen parametreler kullanılarak yüzey pürüzlülüğü (Ra) için güven aralığı CI = 0,358 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.5. Ra için güven aralığı hesaplama parametreleri.

$.Fa_{,1,fe}$	$\alpha$	$fe$	$Ve$	$R$	$n_{eff}$	$T_{dof}$	$N$
4,9646	0,05	10	0,018926	1	2,25	7	18

$$Ra_{opt} = (A_1 - T_{Ra}) + (B_3 - T_{Ra}) + (C_3 - T_{Ra}) + (D_1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (5.5)$$

Sonrasında, optimum yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerinin tahmininde Eş. 5.5 kullanılmıştır. S/N analizine göre A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub> optimum seviyeleridir. T<sub>Ra</sub> (0,804 µm) deneysel olarak ölçülen tüm yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Hesaplamalar sonucunda Ra<sub>opt</sub> = 0,1938 µm olduğu tahmin edilmiştir.

$$[Ra_{opt} - CI] < Ra_{exp} < [Ra_{opt} + CI] = [0,1938 - 0,358] < 0,294 < [0,1938 + 0,358] = -0,164 < 0,294 < 0,551 \quad (5.6)$$

Eş. 5.6'da yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerinin (Ra<sub>exp</sub> = 0,394 µm) güven aralığı sınırı içinde olduğu belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için optimizasyon işleminin doğruluğu optimum seviyelerde ve rastgele seviyelerde test edilmiştir. Çizelge 5.6'da doğrulama test sonuçları verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin güven aralığında elde edilmesi ve hata yüzdelerin düşük olması, optimizasyon işleminin doğruluğunu yansıtmaktadır [118].

Çizelge 5.6. Ra için doğrulama testi sonuçları.

Seviye	Taguchi Metot			Doğrusal Tah. Denk.		
	Deneysel	Tahmini	Hata	Deneysel	Tahmini	Hata
A2B3C3D1	0,294	0,229	13,35	0,294	0,216	18,18
A1B1C3D1	0,996	1,119	12,34	0,996	1,102	10,54

### 5.3. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 5.3.1. S/N Oranlarının Analizi

Kriyojenik işlem uygulanan ve uygulanmayan matkaplar ile farklı soğutma ortamlarında AA7075 alaşımının delinmesinde ölçülen kesme sıcaklığı üzerinde

kesme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Kesme sıcaklığı değerleri (T) ve her bir delme şartı için bu değerlere karşılık gelen S/N değerleri Çizelge 5.7’de yer almaktadır. S/N oranının hesaplanmasında Eşitlik 4.1 “en küçük en iyi” denklemi kullanılmıştır. Kesme sıcaklığı değerlerinin aritmetik ortalaması ve ortalama S/N oranı değerleri sırasıyla 91,555 °C ve 38,800 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.7. Kesme sıcaklığı değerleri ve S/N oranları.

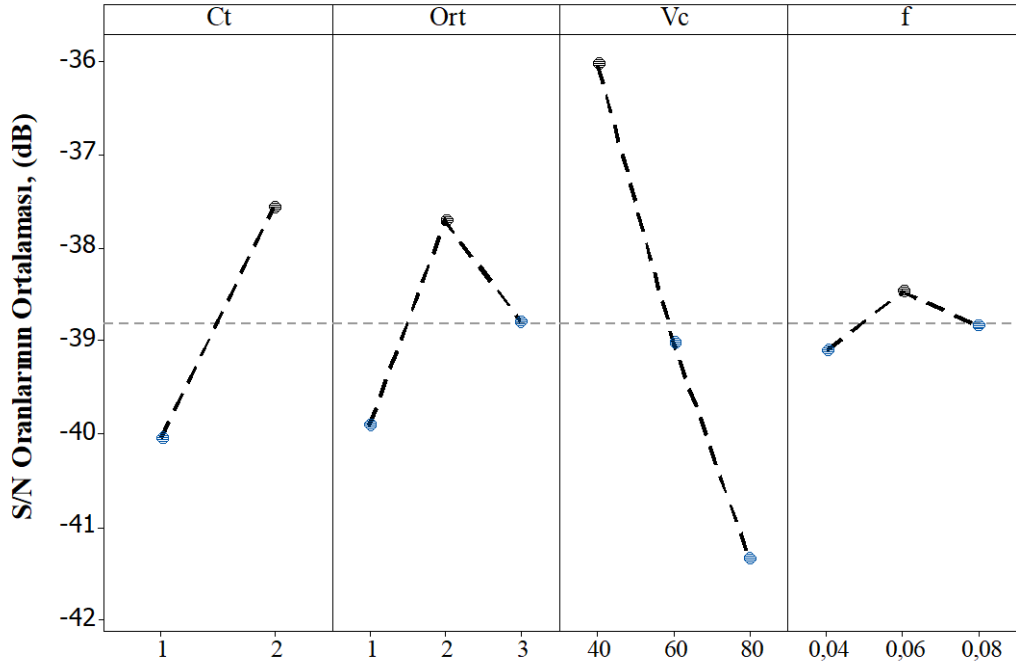
Test No	Delme Koşulu					
	A (Ct)	B (Ort)	C (Vc)	D (f)	T	S/N
1	İUT	Kuru	40	0,04	85	-38,588
2	İUT	Kuru	60	0,06	135	-42,606
3	İUT	Kuru	80	0,08	140	-42,922
4	İUT	Hava Des. İşleme	40	0,04	72	-37,146
5	İUT	Hava Des. İşleme	60	0,06	85	-38,588
6	İUT	Hava Des. İşleme	80	0,08	124	-41,868
7	İUT	MQL Des. İşleme	40	0,06	60	-35,563
8	İUT	MQL Des. İşleme	60	0,08	110	-40,827
9	İUT	MQL Des. İşleme	80	0,04	130	-42,278
10	KİT	Kuru	40	0,08	65	-36,258
11	KİT	Kuru	60	0,04	90	-39,084
12	KİT	Kuru	80	0,06	100	-40,000
13	KİT	Hava Des. İşleme	40	0,06	45	-33,064
14	KİT	Hava Des. İşleme	60	0,08	60	-35,563
15	KİT	Hava Des. İşleme	80	0,04	100	-40,000
16	KİT	MQL Des. İşleme	40	0,08	60	-35,563
17	KİT	MQL Des. İşleme	60	0,04	75	-37,501
18	KİT	MQL Des. İşleme	80	0,06	112	-40,984

Çizelge 5.8 ve Şekil 5.5’te sırasıyla Anova analiz sonuçları ve delme parametrelerinin dağılım grafiği verilmiştir. En düşük kesme sıcaklığı değerinin elde edildiği optimum delme parametresi kombinasyonu  $A_2B_2C_1D_2$  olarak belirlenmiştir. Bu kombinasyona göre, en düşük kesme sıcaklığı değeri için 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takım, MQL destekli işleme, 40 m/min kesme hızı ve 0,04 mm/tooth ilerleme miktarı ideal delme parametreleri seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu kombinasyonda yapılan delme deneyleri sonucunda ortalama kesme sıcaklığı değeri 45 °C olarak ölçülmüştür.



Çizelge 5.8. T için S/N analiz sonucu.

T	Kesme Parametreleri			
	A	B	C	D
1	-40,04	-39,91	<b>-36,03</b>	<b>-38,47</b>
2	<b>-37,56</b>	<b>-37,71</b>	-39,03	-39,10
3		-38,79	-41,34	-38,83
Delta	2,49	2,20	5,31	0,63



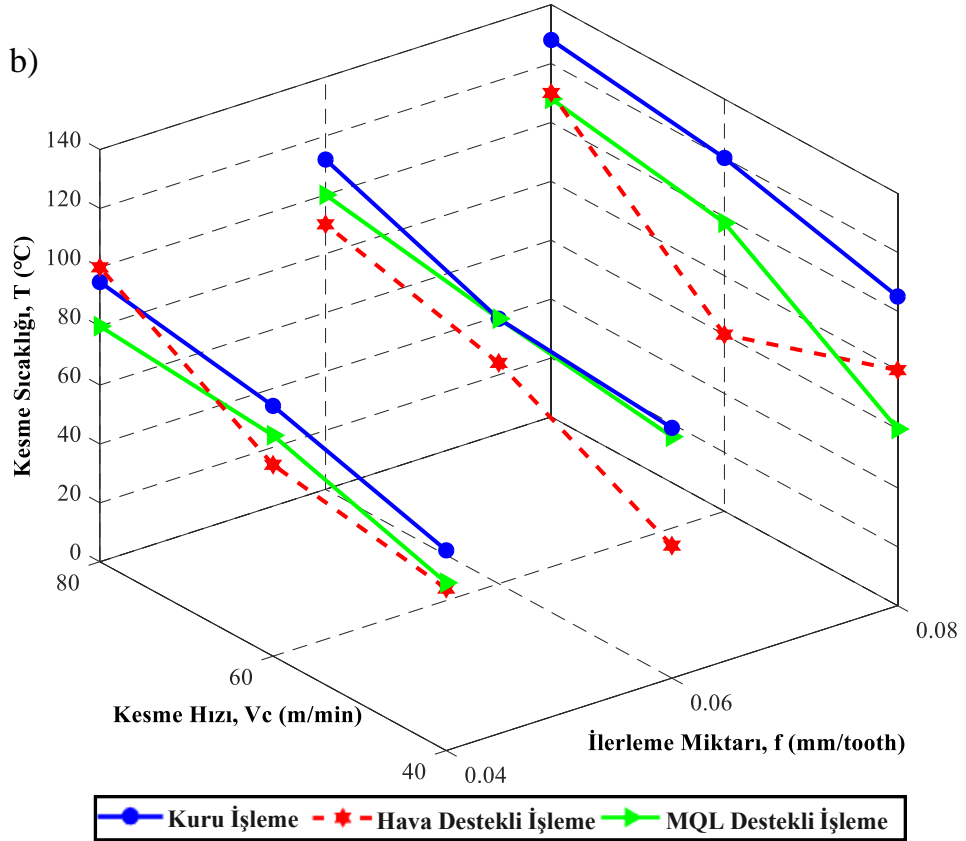
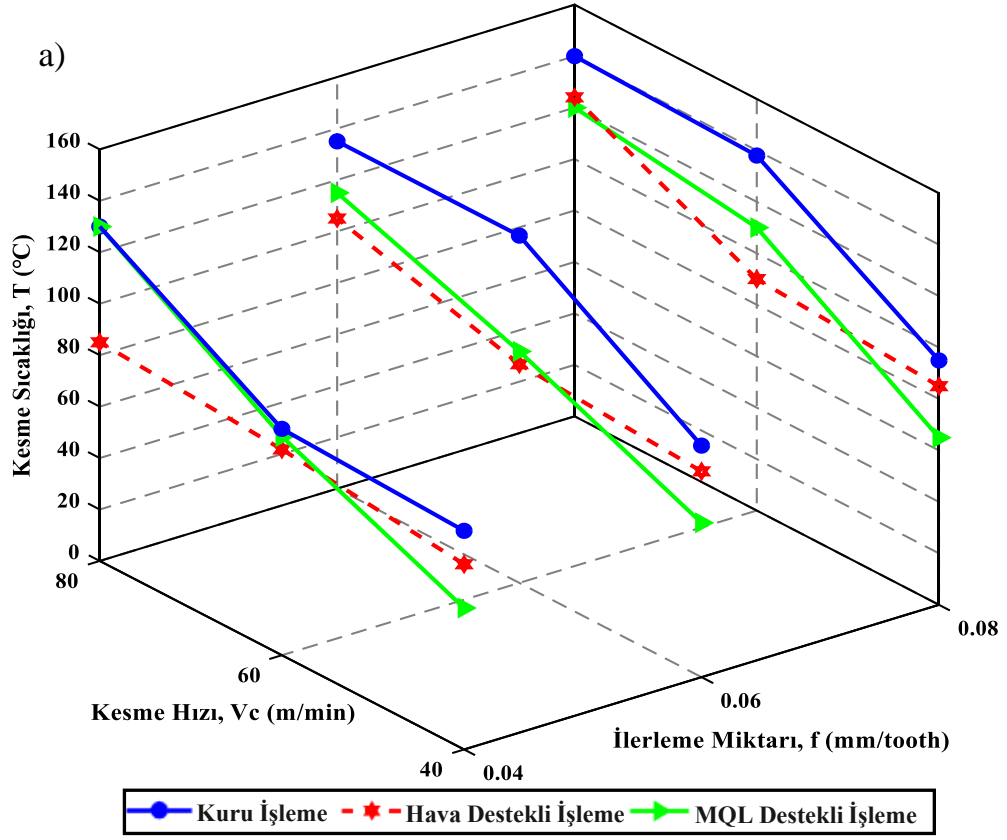
Şekil 5.5. T için S/N oranlarına göre kesme parametrelerinin dağılımı.

### 5.3.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.6 a) ham b) kriyojenik işlem uygulanan takımlar ile kuru, hava ve MQL destekli işleme şartlarında gerçekleştirilen delme deneylerinde ölçülen ortalama kesme sıcaklığı değerlerinin değişimini göstermektedir. AA 7075 alaşımının delinmesinde hava ve MQL destekli işleme şartlarında sıcaklık düşmüştür. En yüksek kesme sıcaklığı değeri 80 m/min kesme hızında kuru, hava ve MQL destekli işleme şartlarında ham kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde sırasıyla 140, 125 ve 120 °C olarak ölçülmüştür. Aynı kesme şartlarında kriyojenik işlem uygulanan kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise kesme sıcaklığı değeri

sırasıyla 130, 118 ve 115 °C olarak ölçülmüştür. Ham kesici takım kullanılarak kuru, hava ve MQL destekli işleme şartlarında kesme hızının %50 azaltılması ile gerçekleştirilen deneylerde, kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %21,42 %35,48 ve %15,38 azaldığı, kesme hızının %100 azaltılmasıyla yapılan deneylerde ise kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %39,38 %41,33 ve %53,34 azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde, kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlar ile kuru, hava ve MQL destekli işleme şartlarında kesme hızının %50 azaltılması ile gerçekleştirilen deneylerde, kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %10 %40 ve %33,35 azaldığı, kesme hızının %100 azaltılmasıyla yapılan deneylerde ise kesme sıcaklığı değerlerinin sırasıyla %35 %55 ve %46,42 azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde, Zeilmann ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımını kuru ve MQL soğutma ortamında delinmesinde sıcaklığı analiz ettikleri çalışmalarında, kuru işlemeye kıyasla MQL kullanıldığında sıcaklığın %20-25 azaldığını bildirmişlerdir [119]. Yıldırım, AISI 316 çeliğini MQL destekli frezelenmesinde püskürtme basıncı ve debinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini araştırdığı çalışmasında, püskürtme basıncının artması ile soğutma kabiliyetinin arttığını ve buna bağlı olarak kesme sıcaklığının düştüğünü bildirmiştir [120].

Kesme sıcaklığı için elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, ham kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ölçülen sıcaklık değerlerine göre kriyojenik işlem uygulanan kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ölçülen sıcaklık değerlerinin %72,31 daha düşük olduğu tespit edilmiştir



Şekil 5.6. İşleme koşuluna göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım

Kesme sıcaklığı değeri, kuru kesme şartına kıyasla hava ve MQL destekli işleme şartlarında %27 ve %30 daha düşük ölçülmüştür. En düşük kesme sıcaklığı değeri 40 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/diş ilerleme miktarında ve MQL destekli işleme şartında kriyojenik işlem uygulanan kesici takım kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde 38 °C olarak ölçülmüştür. Soğutucu akışkan kullanımının kesme performansı üzerindeki olumlu etkileri diğer araştırmacılar tarafında da bildirilmiştir [121-123].

### 5.3.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Kesme sıcaklığı değerleri üzerinde işleme koşulu ve kesme parametrelerinin etkinliğini analiz etmek için Anova uygulanmıştır. Anova sonuçları Çizelge 5.9'da verilmiştir. Sonuç olarak, kesme sıcaklığı üzerinde (*Ct*) kesici takım, (*Ort*) soğutma şartı, (*Vc*) kesme hızı ve (*f*) ilerleme miktarı için etki oranları sırasıyla %21,32 %9,73 %59,48 ve %0,3 olarak tespit edilmiştir. Kesme sıcaklığını etkileyen en önemli parametre %59,48 katkı oranı ile kesme hızı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.9. Kesme sıcaklığı için Anova sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
<i>Ct</i>	1	3042	3042	23,22	0,001	21,32
<i>Ort</i>	2	1388,1	694,06	5,30	0,027	9,73
<i>Vc</i>	2	8488,1	4244,06	32,39	0,000	59,48
<i>f</i>	2	<b>42,1</b>	<b>21,06</b>	<b>0,16</b>	<b>0,854</b>	<b>0,30</b>
Hata	10	1310,1	131,01			9,18
Total	17	14270,4				100

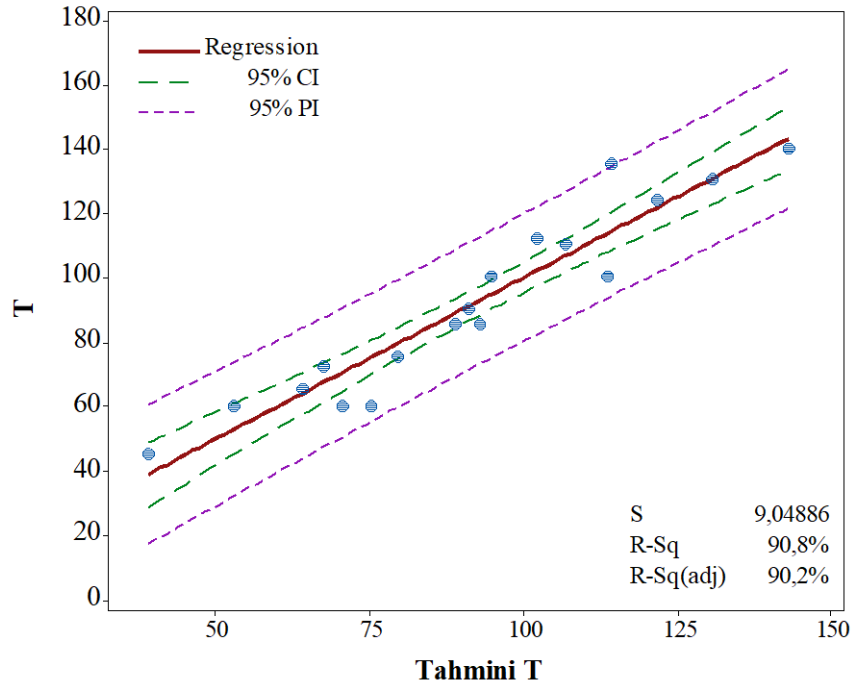
### 5.3.4. Regresyon Analizi

Kesme parametreleri ile kesme sıcaklığı değerleri arasındaki ilişki regresyon analizi kullanılarak matematiksel olarak ifade edilmiştir. Tahmin denklemleri doğrusal regresyon modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Kesme sıcaklığı değerleri (*T*) için doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri Çizelge 5.10'da verilmiştir. Şekil 5.7 doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile

deneysel sonuçları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kesme sıcaklığı değerleri (T) için doğrusal regresyon modeli ile geliştirilen tahmin denkleminin R<sup>2</sup> değeri %90,50 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.10. Kesme sıcaklığı (T) için tahmin denklemleri.

Kesici Takım	İşleme Şartı	Tahmin Denklemi
İşlemsiz Takım	Kuru İşleme	$T = 34 + 1,329Vc + 29f$
İşlemsiz Takım	Hava Destekli İşleme	$T = 12,5 + 1,329Vc + 29f$
İşlemsiz Takım	MQL Destekli İşleme	$T = 22,7 + 1,329Vc + 29f$
Kriyojenik İşlem Uygulanan Takım	Kuru İşleme	$T = 8 + 1,329Vc + 29f$
Kriyojenik İşlem Uygulanan Takım	Hava Destekli İşleme	$T = -13,5 + 1,329Vc + 29f$
Kriyojenik İşlem Uygulanan Takım	MQL Destekli İşleme	$T = -3,3 + 1,329Vc + 29f$



Şekil 5.7. T için tahmini ve test sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.7’te görüldüğü gibi deneysel değerlere oldukça yakın tahmin sonuçları elde edilmiştir. Optimizasyon işleminin başarısının görülmesi açısından optimize edilmiş

koşulun doğrulanması gerekmektedir. Bir önceki bölümde doğrulama deneyinin nasıl uygulanacağı aşamaları ile açıklanmıştır ve bu değinilen aşamalar uygulanmıştır. Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak CI güven aralığı değeri belirlenmiştir. Bu hesaplamada Çizelge 5.11’te yer alan seviyeler kullanılarak kesme sıcaklığı değerleri (T) için güven aralığı CI =30,651 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11. T için güven aralığı hesaplama parametreleri.

<b>F<math>\alpha,1,fe</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>fe</math></b>	<b><math>Ve</math></b>	<b>R</b>	<b><math>n_{eff}</math></b>	<b>T<math>_{dof}</math></b>	<b>N</b>
4,9646	0,05	10	131,01	1	2,25	7	18

$$T_{opt} = (A_2 - T_T) + (B_3 - T_T) + (C_1 - T_T) + (D_1 - T_T) + T_T \quad (5.5)$$

Sonrasında, optimum kesme sıcaklığı değerleri (T) değerinin tahmininde Eş. 5.5 kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre kesme sıcaklığı (T) değeri için (A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>) optimum seviyeleridir. T<sub>T</sub> (91,555 °C) deneysel olarak ölçülen tüm kesme sıcaklığı (T) değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Hesaplamalar sonucunda T<sub>opt</sub> = 51,565 °C olduğu tahmin edilmiştir.

$$[T_{opt} - CI] < T_{exp} < [T_{opt} + CI] = [51,565 - 30,651] < 45 < [51,565 + 30,651] = 20,914 < 45 < 82,216 \quad (5.6)$$

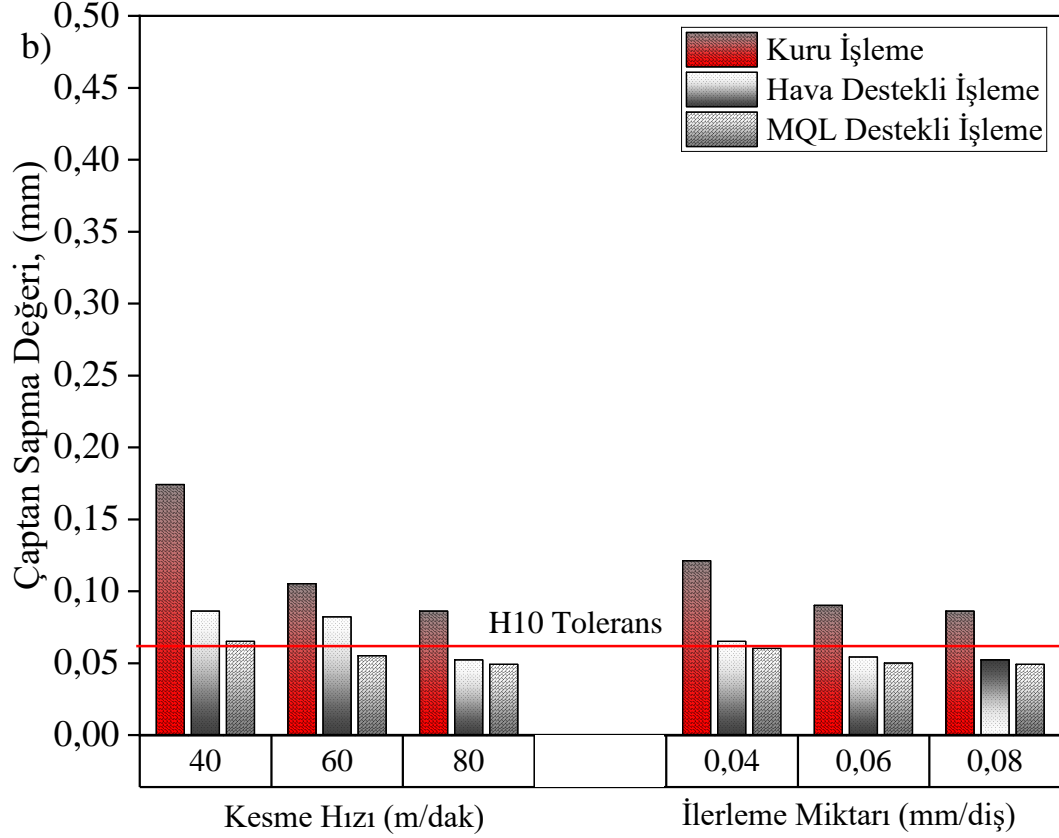
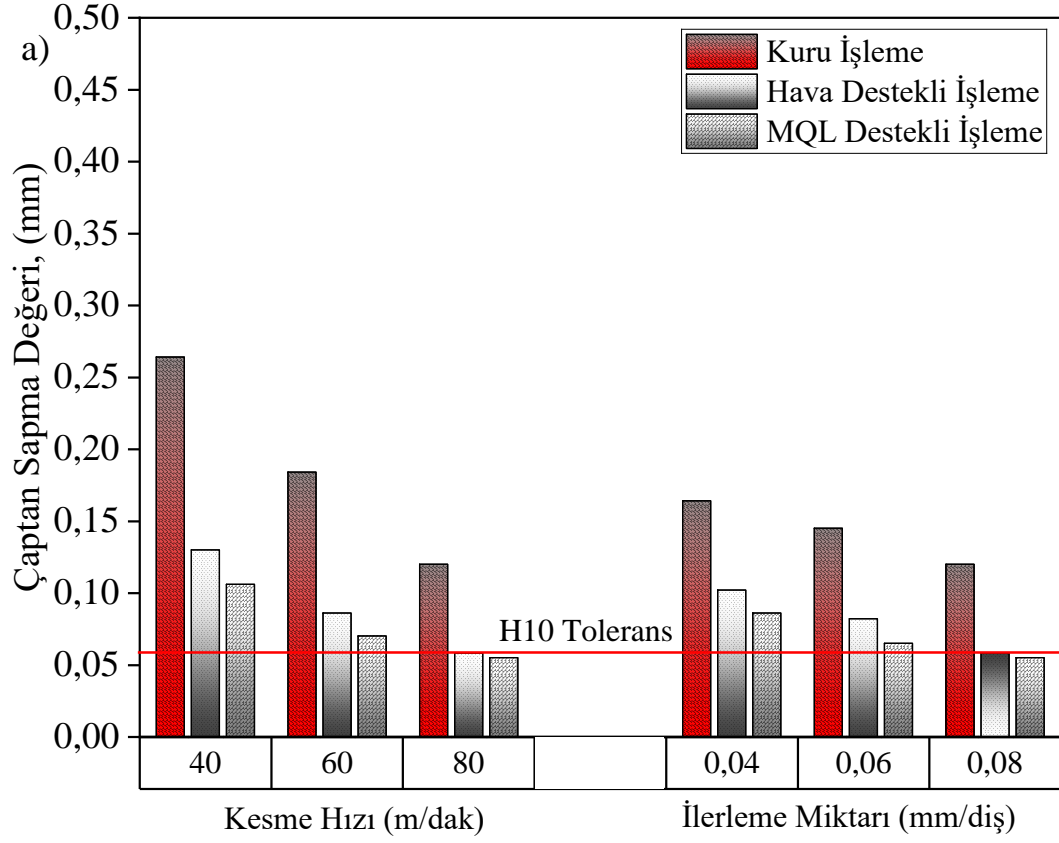
Eş. 5.6’da kesme sıcaklığı değerinin (T<sub>exp</sub>= 45 °C) güven aralığı sınırı içinde olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon işleminin doğruluğu, kesme sıcaklığı (T) için optimum seviyelerde ve rastgele seviyelerde test edilmiştir. Çizelge 5.12’te kesme sıcaklığı (T) için hata oranına göre doğrulama test sonuçları yer almaktadır. Kesme sıcaklığı (T) değerlerinin güven aralığında elde edilmesi ve hata yüzdelerin düşük olması, optimizasyon işleminin doğruluğunun göstergesidir [124].

Çizelge 5.12. T için doğrulama testi sonuçları.

Seviye	Taguchi Metot			Doğrusal Tah. Denk.		
	Deneysel	Tahmini	Hata	Deneysel	Tahmini	Hata
A2B2C1D1	45	38	18,42	45	40,82	12,5
A1B1C3D1	150	138	8,63	150	141,48	6,02

#### 5.4. DELİK KALİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 5.8 a) ham b) kriyojenik işlem uygulanan takımlar ile kuru, hava ve MQL destekli işleme şartlarında gerçekleştirilen delme deneylerinde ölçülen ortalama çaptan sapma değerlerinin değişimini göstermektedir. Delik çap değerleri kesici takım, işleme ortamı ve kesme parametrelerine göre 7,048–7,257 mm arasında değişim göstermiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde, kuru kesme şartına göre hava ve MQL destekli işleme şartlarında çaptan sapma değerlerinin azaldığı görülmektedir. Her bir kesici takım için gerçekleştirilen bütün ölçümlerin ortalamaları dikkate alındığında, ham kesici takım için kuru işleme şartına göre hava ve MQL destekli işleme şartlarında elde edilen çaptan sapma değerlerinin sırasıyla %28,57 ve %44 daha az olduğu, kriyojenik işlem uygulanan kesici takım için ise kuru işleme şartına göre hava ve MQL destekli işleme şartlarında elde edilen çaptan sapma değerlerinin sırasıyla %68,75 ve %125 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kesme bölgesine soğutucu akışkanın iletilmesi ile yağlama fonksiyonunun artmasının bir sonucu olarak kesici takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmenin azalması ile açıklanabilir. En küçük çaptan sapma değerleri MQL destekli işleme şartında elde edilmiştir. Benzer şekilde, Islam ve Boswell, 6061-6T alüminyum alaşımının delinmesinde delik kalitesi üzerinde soğutma yöntemlerinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, çap hatası üzerinde soğutma yönteminin etkili parametre olduğunu ve kriyojenik ve akışkanlı soğutmaya göre MQL destekli işleme yönteminde çaptan sapmanın daha az olduğunu bildirmişlerdir [125]. Benzer bir çalışmada, Braga ve Diniz, %7 silikonlu alüminyum-silikon alaşımının delinmesinde kesme performansı üzerinde kesici takım kaplaması ve MQL soğutma tekniğinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, Elmas kaplamalı matkaplar için MQL kullanıldığında çapta sapmanın azaldığını ve kaplamasız matkaplar için çapta sapmanın her iki soğutma (MQL ve çözünebilir kesme sıvısı) sistemi için de çok benzer olduğunu bildirmişlerdir [126].

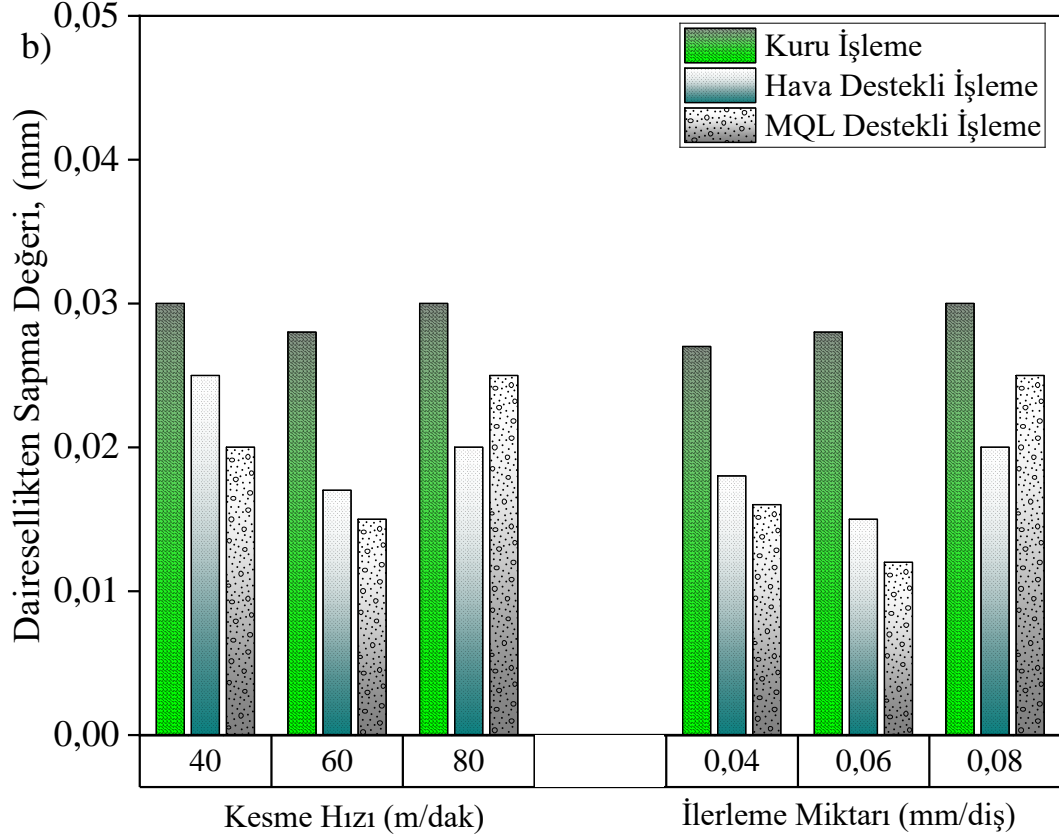
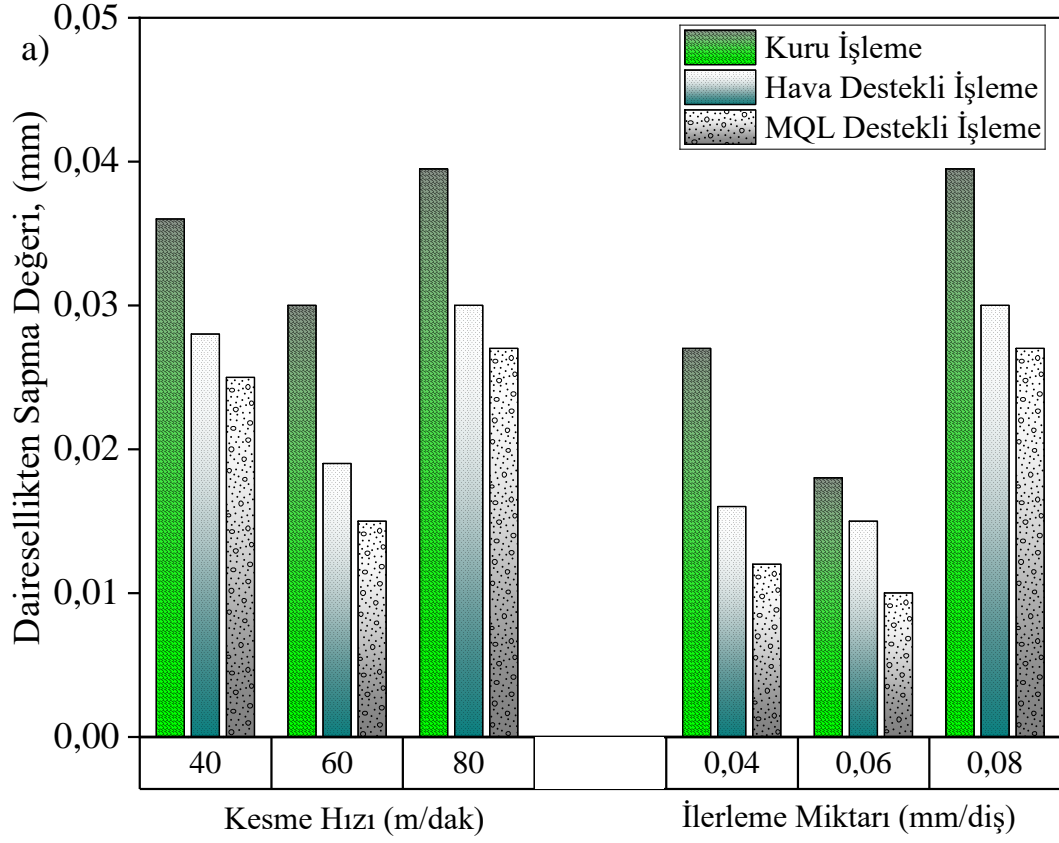


Şekil 5.8. İşleme koşuluna göre çaptan sapma değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım



Kesici takıma uygulanan kriyojenik işlemin delik çaplarının değişimi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bütün işleme şartlarında ham ve kriyojenik işlem uygulanan matkaplar gözden geçirildiğinde, ham matkaplar kullanılarak yapılan deneylerde ölçülen çaptan sapma değerlerine göre kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlar kullanılarak yapılan deneylerde ölçülen çaptan sapma değerlerinin yaklaşık olarak %50 daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durum kriyojenik işlem sonrası kesici takım aşınma direncindeki artışa bağlı olarak kesici ağızlardaki düşük aşınma ile açıklanabilir [127]. Diğer taraftan kesme hızındaki değişim ile çaptan sapma değerlerinin bir miktar azaldığı, ilerleme miktarındaki artış ile ise çaptan sapma değerlerinin arttığı görülmüştür.

Şekil 5.9'da işleme koşuluna ve kesme parametrelerine bağlı olarak dairesellikten sapma değerlerindeki dağılımı verilmiştir. Çaptan sapmada elde edilen sonuçlara benzer şekilde dairesellikten sapma değerlerinde de hava ve MQL destekli işleme şartları üstünlük sağlamıştır. Her bir kesici takım için gerçekleştirilen bütün ölçümlerin ortalamaları dikkate alındığında, kuru işleme şartına göre hava ve MQL destekli işleme şartlarında yaklaşık olarak %40 ve %50 dairesellikten sapma değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Dahası, kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlar kullanılarak yapılan deneylerde ölçülen dairesellikten sapma değerlerinin yaklaşık olarak %48 daha az olduğu belirlenmiştir. Çaptan sapmada olduğu gibi kesme hızındaki değişim ile dairesellikten sapma değerlerinin bir miktar azaldığı, ilerleme miktarındaki artış ile ise dairesellikten sapma değerlerinin arttığı görülmüştür.

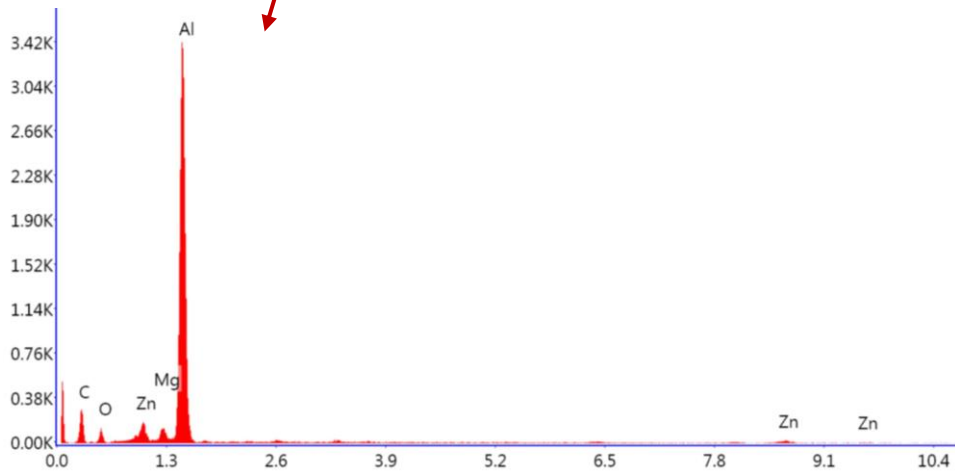
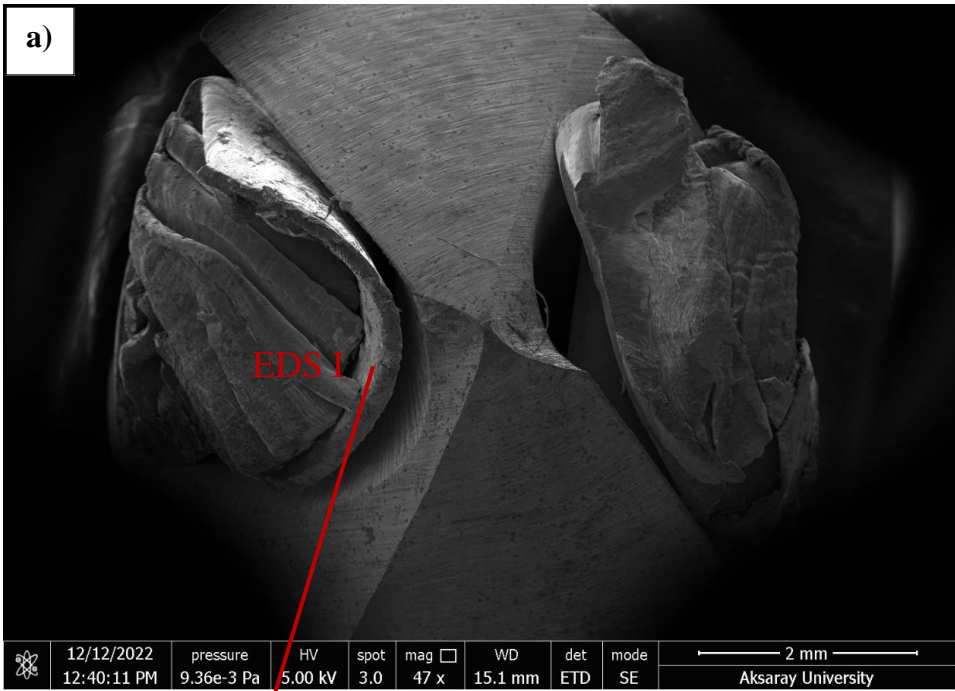


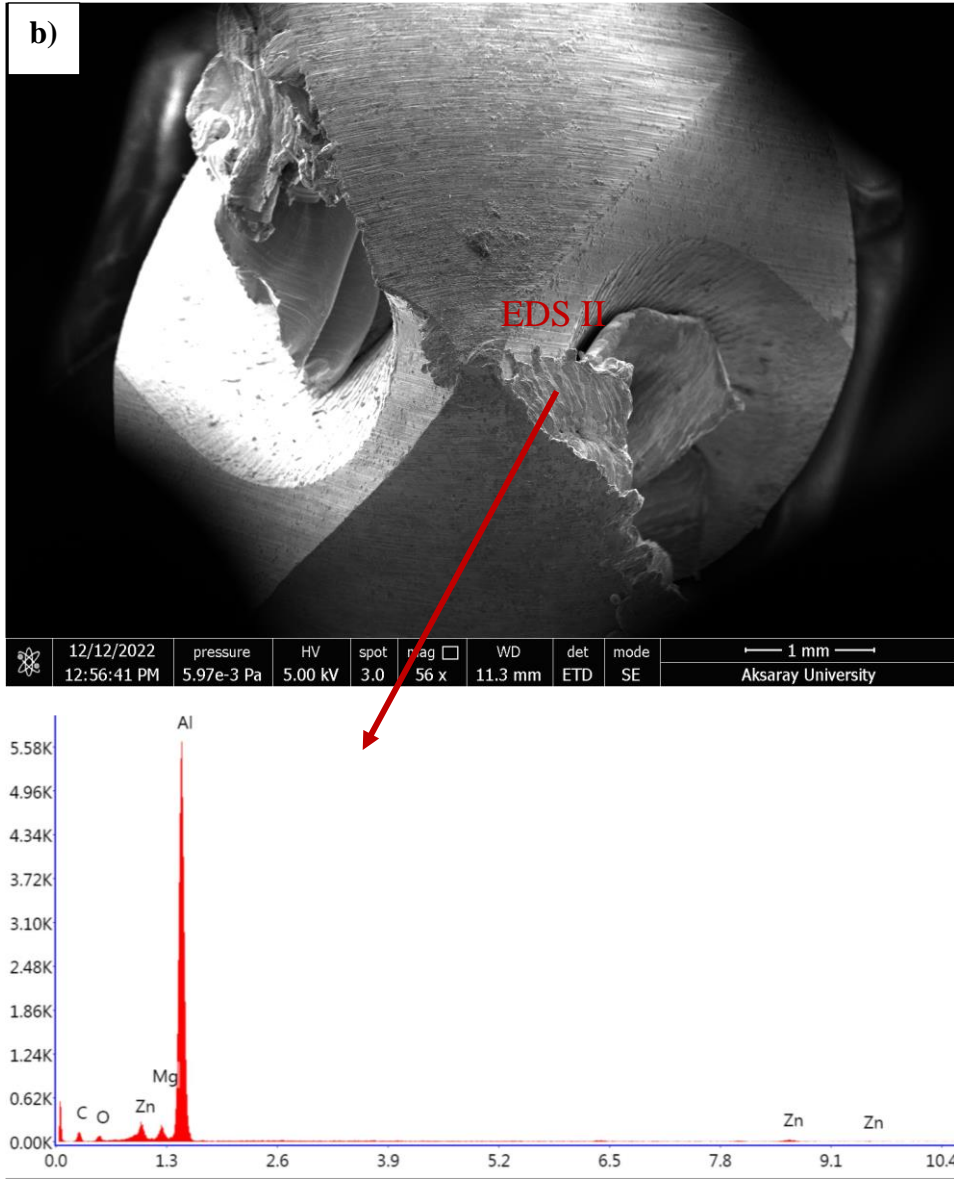
Şekil 5.9. İşleme koşuluna göre dairesellikten sapma değerlerinin dağılımı: a) Ham b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.

## 5.5. TAKIM AŞINMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kriyojenik işlem ve soğutma ortamının kesme performansına etkisini belirlemek amacıyla kesici takımlardaki aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Takım aşınması, yüzey kalitesi, ölçü tamlığı, işleme verimliliği ve takım ömrü dahil olmak üzere metal kesme işleminin birçok yönünü etkileyen önemli bir faktördür. Yaygın takım aşınma mekanizmaları olarak abrasif aşınma, adhesif aşınma, difüzyon ile aşınma ve oksidasyon aşınması yer almaktadır. Talaş kaldırma işlemi esnasında kesici takım performansı önemli ölçüde kırılma, plastik deformasyon, talaş yığılması (Built-Up Edge=BUE), ve tedrici takım aşınmasından etkilenmektedir.

MQL destekli işleme şartında 80 m/dak kesme hızında, 0,04 mm/diş ilerleme miktarın AA7075 alaşımının işlenmesi sonrası matkaplar üzerinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.10'da görülmektedir. Şekil 5.10 bakıldığında, a) ham ve b) kriyojenik işlem uygulana kesici takımlar için baskın aşınma modunun yığıntı talaş (BUE) olduğu ve ihmal edilebilir düzeyde takım ufalanmasının (chipping) meydana geldiği görülmektedir. Bu görüntülerden, 80 m/dak kesme hızında işleme sırasında adhesive aşınma mekanizmasının takım aşınmasını kontrol ettiği sonucu çıkarılabilir. Kesici takımın kesme yüzeyine ve tahliye oluklarına tedrici olarak yığılan talaş adhesive aşınmanın göstergesidir. Ham kesici takıma göre kriyojenik işlem uygulanan takımda yapışan talaşın daha az olduğu görülmektedir. Alüminyum alaşımları gibi sünek malzemelerin işlenmesinde yığıntı talaş oluşumu beklenen bir durumdur ve sementit karbür kesici takımların adhesive aşınması diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir [128, 129].





Şekil 5.10. Kesici takımlarda oluşan aşınmaların SEM görüntüleri: a) İşlemsiz b) Kriyojenik işlem uygulanmış takım.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, AA 7075 alaşımının ham ve derin kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla delinmesinde, kuru, hava ve MQL destekli işleme şartlarının; yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, çaptan ve dairesellik sapma üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın sonuçları aşağıda verilmiştir;

Kriyojenik işlemin tungsten karbür matkapların sertliğini arttırdığı tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanması sonrası sertlik değeri yaklaşık olarak %8,44 artış göstermiştir.

AA 7075 alaşımının kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla delinmesinde daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı değerleri elde edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları kuru işleme şartına göre hava ve MQL destekli işleme şartlarında yüzey pürüzlülüğü değerinin sırasıyla %99,81 ve %33,62 daha düşük olduğu belirlenmiştir.

En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için kriyojenik işlem uygulanan takım, MQL işleme şartı, 120 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme miktarı optimum kesme parametresi seviyeleri olduğu belirlenmiştir. Bu kesme şartlarında gerçekleştirilen delme deneyinde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,195 µm olarak ölçülmüştür.

İstatistiksel sonuçlar, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığını tahmin etmek için geliştirilen denklemlerin yüksek korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) ile deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğunu ve Taguchi optimizasyon yaklaşımının etkili bir şekilde uygulandığını göstermektedir.

Her iki takım kullanılarak yapılan delme deneyleri için yüzey kalitesinin iyileşmesinde en büyük paya soğutucu işleme (hava ve MQL) şartının sahip olduğu görülmüştür.

Her bir kesici takım için AA 7075 alaşımının MQL destekli işleme şartında delinmesinde çaptan ve dairesellikten sapma değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Bütün işleme şartlarında ham ve kriyojenik işlem uygulanan matkaplar gözden geçirildiğinde, ham kesici takımlar kullanılarak yapılan deneylerde ölçülen çaptan sapma değerlerine göre kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlar kullanılarak yapılan deneylerde ölçülen çaptan sapma değerlerinin yaklaşık olarak %50 daha az olduğu belirlenmiştir.

Her bir kesici takım için gerçekleştirilen bütün ölçümlerin ortalamaları dikkate alındığında, kuru işleme şartına göre hava ve MQL destekli işleme şartlarında yaklaşık olarak %40 ve %50 dairesellikten sapma değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir

Ham ve kriyojenik işlem uygulana kesici takımlar için baskın aşınma modunun yığıntı talaş (BUE) olduğu ve ihmal edilebilir düzeyde takım ufalanmasının (chipping) meydana geldiği görülmektedir

## KAYNAKLAR

1. Grand View Research., “Metalworking fluids market size, share”, *Growth report 2030*, Report ID: 978-1-68038-744-5 (2020).
2. Paulo, D. J., Sreejith, P. S., & Silva, J., “Materials and manufacturing processes”, *Materials and Manufacturing Processes*, 22, 45-50 (2007).
3. Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J., & Wakabayashi, T., “Dry machining and minimum quantity lubrication”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 53(2), 511-537 (2004).
4. Inasaki, I., “Towards symbiotic machining processes”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(7), 1053-1057 (2012).
5. Khunt, C. P., Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Mawandiya, B. K. “Performance assessment of vegetable oil-based minimum quantity lubrication (MQL) in drilling”, *Materials Today: Proceedings* (2020).
6. Silliman, J. D., “Cutting and grinding fluids: Selection and application (2nd ed.)” Dearborn, MI: *Society of Manufacturing Engineers* (1992).
7. Aronson, R. B., “Machine tool 101: Part 6, machine servers”, *Manufacturing Engineering*, 6(1), 47-52 (1994).
8. Dal, M., “Bitkisel esaslı kesme sıvılarının frezelemedeki performanslarının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, Kocaeli, Turkey (2009).
9. Klocke, F., & Eisenblaetter, G. “Dry cutting”, *CIRP Annals*, 46, 519-526 (1997).
10. Khan, M. M. A., Mithu, M. A. H., & Dhar, N. R., “Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid.” *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16), 5573-5583 (2009).
11. Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., Sarıkaya, M., & Erzincanlı, F., “Determination of MQL parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-based superalloy Waspaloy”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(11), 4667-4681 (2017).



12. Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G. M., Mandal, U. K., & Mondal, S. P., “Eco-friendly cutting fluids in minimum quantity lubrication assisted machining”, *A Review on the Perception of Sustainable Manufacturing* (2019).
13. Najiha, M. S., Rahman, M. M., & Kadirgama, K., “Performance of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluid during the minimum quantity lubrication machining of aluminium alloy AA6061-T6”, *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.015> (2016).
14. Chatha, S. S., Pal, A., & Singh, T., “Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication”, *Journal of Cleaner Production*, 137, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.139> (2016).
15. Zhu, Z., He, B., & Chen, J., “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> (2020).
16. Yücel, A., Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Şirin, Ş., Kıvık, T., Gupta, M. K., & Tomaz, I. V., “Influence of MoS<sub>2</sub> 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> (2021).
17. Giasin, K., “Machining fibre metal laminates and Al2024-T3 aluminium alloy”, Ph.D. thesis, Composite Systems Innovation Centre, Department of Mechanical Engineering, *The University of Sheffield*, England, (2016).
18. Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G. M., Mandal, U. K., & Mondal, S. P., “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 (2021).
19. Boulahmi, S., “Étude expérimentale des effets de l'outil de coupe, des conditions d'usinage et de lubrification sur la qualité de surface et le comportement en traction des pièces en alliages d'aluminium” (Master's thesis, *École de Technologie Supérieure*, Canada) (2015).

20. Javidikia, M., Sadeghifar, M., Songmene, V., & Jahazi, M., "Effect of turning environments and parameters on surface integrity of AA6061-T6: experimental analysis, predictive modeling, and multi-criteria optimization", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9-10), 2669-2683. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06027-w> (2020).
21. Islam, S., Khandoker, N., Izham, M., Azizi, T., & Debnath, S., "Development of a low cost MQL setup for turning operations", *MATEC Web of Conferences*, 95, 10004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179510004> (2017).
22. Kannan, C., Varun Chaitanya, C. H., Padala, D., Reddy, L., Ramanujam, R., & Balan, A. S. S., "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> (2020).
23. Khunt, C. P., Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Mawandiya, B. K., "Performance assessment of vegetable oil-based minimum quantity lubrication (MQL) in drilling". *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.741> (2020).
24. Cagan, S. C., Venkatesh, B., & Buldum, B. B., "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> (2020).
25. Abas, M., Sayd, L., Akhtar, R., Khalid, Q. S., Khan, A. M., & Pruncu, C. I., "Optimization of machining parameters of aluminum alloy 6026-T9 under MQL-assisted turning process". *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10916-10940. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.071> (2020).
26. Viswanathan, R., Ramesh, S., & Subburam, V. "Measurement and optimization of performance characteristics in turning of Mg alloy under dry and MQL conditions". *Measurement*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.018> (2018).
27. Davis, J. R. "Aluminum and Aluminum Alloys", *ASM International*, pp. 351-416 (1993).
28. Hatch, J. E. "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", *American Society for Metals* (1984).
29. Callister, W. D. "Materials Science and Engineering: An Introduction", *John Wiley & Sons* (2007).

30. Davis, J. R., "Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys", *ASM International* (2001).
31. Aluminum Association., "International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys", *The Aluminum Association*, Arlington, Virginia (2006).
32. Hussey, R. J., & Wilson, J., "Light Alloys: Directory and Databook". *Springer Science & Business Media* (2013).
33. Schweitzer, P. A., "Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties", (Vol. 19). *CRC Press* (2003).
34. Miller, W. S., et al., "Recent development in aluminium alloys for the automotive industry". *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37-49 (2000).
35. Polmear, I. J., "*Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*". *Butterworth-Heinemann* (2006).
36. Totten, G. E., et al., "Handbook of Aluminum: Volume 1", *Physical Metallurgy and Processes*. CRC Press (2003).
37. Kaufman, J. G., "Introduction to Aluminum Alloys and Tempers". *ASM International* (2000).
38. Altenpohl, D., "Aluminum: Technology, Applications, and Environment". *The Aluminum Association* (1998).
39. İnternet: "Yıldırım koruma kumaşı", URL: <https://kompozit.org.tr/tr/boeingleri-yildirimdan-koruyan-kumas-turklerden/> , Son Erişim Tarihi 08.06.2024
40. Starke Jr, E. A., & Staley, J. T., "Application of modern aluminum alloys to aircraft". *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2-3), 131-172 (1996).
41. Degarmo, E. P., Black, J. T., & Kohser, R. A., "Materials and Processes in Manufacturing". *John Wiley & Sons* (2011).
42. Polmear, I. J., *Light Alloys: "From Traditional Alloys to Nanocrystals"*. *Elsevier* (2006).

43. Totten, G. E., & MacKenzie, D. S., "Handbook of Aluminum: Volume 1: Physical Metallurgy and Processes". *CRC Press* (2003).
44. Murray, J. L., "The Aluminum-Silicon System". *International Metals Reviews*, 29(1), 125-132 (1984).
45. Luo, A. A., & Sachdev, A. K., "Magnesium and Aluminum Alloys". *JOM*, 66(2), 245-254 (2014).
46. Zolotarevsky, N. Y., Belov, N. A., & Glazoff, M. V., "Casting Aluminum Alloys". *Elsevier* (2007).
47. Mondolfo, L. F., "Aluminum Alloys", *Structure and Properties* (1976).
48. Tönshoff, H. K., Spintig, W., König, W., & Neises, A., "Machining of Holes: Developments in Drilling Technology". *CIRP Annals*, 43(2) (1994).
49. Teodoriu, C., & Bello, O., "An Outlook of Drilling Technologies and Innovations": Present Status and Future Trends. *Energies*, 14, 4499 (2021).
50. İnternet erişimi: "Delik çeşitleri": URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/drilling/non-rotating-drilling> Son erişim tarihi: 09.06.2024
51. İnternet: "Delik delme çeşitleri", URL: <https://shubhamkola.blogspot.com/2021/05/drilling-machine-operations-boring.html>, Son Erişim Tarihi: 07.06.2024.
52. Çakır, M. C., "Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri". *Vipaş A.Ş* (2000).
53. İnternet Erişimi: Delik delme tanımları:URL:"<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/machining-formulas-definitions/drilling-formulas-definitions> Son erişim tarihi: 09.06.2024
54. Şahin, Y., "Talaş Kaldırma Prensipleri". *Nobel Yayın Dağıtım* (2000).
55. Çakır, M. C., "Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri (1. baskı)". İstanbul, Türkiye: *Birsan Yayınevi* (2000).

56. Tönshoff, H. K., Spintig, W., König, W., & Neises, A., “Machining of Holes: Developments in Drilling Technology”. *CIRP Annals*, 43(2) (1994).
57. Yağmur, S., “Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın deneysel olarak incelenmesi” (Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, Türkiye) (2011).
58. İnternet erişimi: “Delik delme işleminde takım dönmesi ve ilerlemesi”: URL: <https://temak.com.tr/kesme-parametrelerinin-talas-kaldirma-islemine-etkileri/>
59. Groover, M. P., “Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems”. *Prentice-Hall Inc.* (2013).
60. Shaw, M. C., “Metal Cutting Principles”. *Oxford University Press* (1989).
61. Çiftçi, İ., “Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-129 (2003).
62. Sur, G., “Karma takviyeli alüminyum matriksli kompozitlerin üretimi, mekanik özellikler ve işlenebilirliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-267 (2008).
63. Zhang, J., “Theory and Technique of Precision Cutting”. *Pergamon Press* (1991)
64. İnternet erişimi: <https://www.guhring.com.au/troubleshooting/drilling/index.html>  
Son erişim tarihi: 08.06.2024
65. Altintas, Y. “Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations”, and CNC Design. *Cambridge University Press* (2012).
66. Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S., “Metal Cutting Theory and Practice”. *CRC Press* (2016).
67. Childs, T. H. C., Maekawa, K., Obikawa, T., & Yamane, Y., “Metal Machining: Theory and Applications”. Elsevier (2000).
68. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R., “Manufacturing Engineering and Technology.” *Pearson* (2014).

69. Trent, E. M., & Wright, P. K. "Metal Cutting.", *Butterworth-Heinemann* (2000).
70. Lee, E. S., & Suh, N. P. "Theory of Inventive Problem Solving" (TRIZ): *Methodology and Applications*. *Springer* (2009).
71. Armarego, E. J. A., & Brown, R. H., "The Machining of Metals". *Prentice-Hall* (1969).
72. Bhattacharyya, A., "Metal Cutting: Theory and Practice". *New Central Book Agency* (1998).
73. Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing": *Materials, Processes, and Systems*. *Wiley* (2010).
74. Doyle, E. D., & Dean, R. T., "The effects of cutting speed on tool wear during the turning of metal matrix composites". *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 231-237 (2001).
75. Kannan, S., & Kishawy, H. A., "Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites". *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3), 399-406 (2008).
76. Byrne, G., Dornfeld, D., & Denkena, B., "Advancing cutting technology". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(2), 483-507 (2003).
77. Bhattacharyya, A., & Ham, I., "Metal Cutting: Theory and Practice". *New Central Book Agency* (1969).
78. Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., & Wakabayashi, T., "Dry machining and minimum quantity lubrication". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 53(2), 511-537 (2004).
79. Lee, C., "Optimizing Cutting Speed in Drilling Operations". *Advanced Manufacturing Journal*, 41(5), 257-276 (2020).
80. Evans, K., "Impact of Feed Rate on Drilling Quality". *Journal of Mechanical Engineering*, 38(2), 189-202 (2020).

81. Richards, M., "Surface Roughness in Drilling". *Journal of Manufacturing Processes*, 33(1), 67-85 (2018).
82. Brown, A., "Tool Material and Geometry in Drilling". *Industrial Engineering Review*, 32(1), 45-58 (2018).
83. Parker, J., "Tool Geometry Optimization". *Advanced Materials Research*, 36(3), 253-270 (2019).
84. Wilson, T., "Material Influence on Surface Roughness". *Manufacturing Science Review*, 34(4), 285-300 (2018).
85. Harris, D., "Surface Quality in Soft Material Drilling". *Journal of Polymer Science*, 22(1), 45-53 (2016).
86. Yaman, K., Bıçakçı, N., & Özgedik, A., "Matkap boyunun delik toleranslarına etkisinin incelenmesi". *Journal of Polytechnic*, 20(4), 765-775 (2017).
87. Ahmadi, K., & Altintas, Y., "Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling". *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 68, 63-74 (2013).
88. Akdulum, A., & Kayır, A., "Investigation of deviation from diameter, circularity and cylindricality in drilling AA2024-T351 with U drills with different properties". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), 1167-1178 (2024).
89. Davis, L., "Machine Tolerances and Drilling Precision". *Engineering Technology Journal*, 39(4), 321-340 (2021).
90. Kim, H., & Lee, D., "Vibration Control in High-Speed Drilling". *Procedia CIRP*, 82, 340-345 (2019).
91. Dornfeld, D., & Lee, D. E., "Machine Design for Precision Manufacturing (1st ed.)". *Springer*, pp. 37-48 (2008).
92. Anonim [ Erişim (2020, 30 Kasım): <https://www.mahr.de/enus/Services/Production-metrology/Know-how/Gaging-Tips/Geometry-GagingTips>.

93. Yildiz, Y., & Nalbant, M., “A review of cryogenic cooling in machining processes”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(9), 947-964 (2008).
94. Pusavec, F., Stoic, A., & Kopac, J., “The role of cryogenics in machining processes”. *Tehnicki vjesnik*, 16(4), 3-10 (2009).
95. Jerold, B. D., & Kumar, M. P., “The Influence of Cryogenic Coolants in Machining of Ti-6Al-4V”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(3), 31005 (2013).
96. Hocheng, H., “Machining technology for composite materials: Principles and practice”. *Woodhead Pub., Cambridge, UK; Philadelphia, PA* (2012).
97. Gill, S. S., Singh, H., Singh, R., & Singh, J., “Cryoprocessing of cutting tool materials—a review”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(1-4), 175-192 (2010).
98. Rahman, M., et al. “Application of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining”. *Journal of Cleaner Production*, 17(6), 877-887 (2009).
99. Srikant, R. R., et al., “Environmental Impact and Cost Analysis of MQL Machining”. *Environmental Science & Technology*, 45(13), 5532-5538 (2011).
100. Kumar, S., et al., “Cost-Benefit Analysis of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining”. *Procedia CIRP*, 8, 62-67 (2013).
101. Silva, L. R., et al., “Tool Wear and Surface Finish in MQL Machining”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 52(5), 48-56 (2012).
102. Santos, A. D., et al., “Effect of MQL on Machining Performance of Aluminium Alloys”. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 482-491 (2013).
103. Çakır, A., “Al 7075 ve Al 6013 alüminyum malzemelerin delme operasyonları esnasındaki kesme parametrelerinin incelenmesi”, (Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, Türkiye) (2009).
104. Davim, J. P., “MQL: A Review on Micro-Lubrication Systems in Machining Processes”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, 17-25 (2012).



105. Gupta, M. K., et al., "Comparison of Conventional and MQL Machining: A Case Study". *Journal of Cleaner Production*, 54, 329-336 (2013).
106. Akgün, M., "Performance analysis of electrode materials in electro discharge machining of monel K-500". *Surface Topography: Metrology and Properties*, 10(3), 035026. (2022).
107. Gill, S. S., Singh, J., Singh, H. and Singh, R., "Metallurgical and mechanical characteristics of cryogenically treated tungsten carbide (WC-Co)", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 58 (1): 119-131 (2012).
108. Chaanthini, M. K., Murugappan, S., & Arul, S., "Study on Hole Quality in Drilling AA 6063 Plate under Cryogenic Pre-Cooling Environment". *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7476-7483. (2017).
109. Uddin, M., Basak, A., Pramanik, A., Singh, S., Krolczyk, G. M., & Prakash, C., "Evaluating hole quality in drilling of Al 6061 alloys". *Materials*, 11(12), 2443. (2018).
110. Erden, M. A., Uzun, F. G., Akgün, M., & Gökçe, H., "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. (2023).
111. Öndin, O., Kıvık, T., Sarıkaya, M., & Yıldırım, Ç. V., "Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel". *Tribology International*, 148, 106323. (2020).
112. Abas, M., Sayd, L., Akhtar, R., Khalid, Q. S., Khan, A. M., & Pruncu, C. I., "Optimization of machining parameters of aluminum alloy 6026-T9 under MQL-assisted turning process". *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10916-10940. (2020).
113. Chatha, S. S., Pal, A., & Singh, T., "Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication". *Journal of Cleaner Production*, 137, 537-545. (2016).
114. Akgün, M., & Demir, H., "Optimization of cutting parameters affecting surface roughness in turning of inconel 625 superalloy by cryogenically treated tungsten carbide inserts". *SN Applied Sciences*, 3(2), 277. (2021).

- 115.Reddy, T. S., Sornakumar, T., Reddy, M. V., Venkatram, R., & Senthilkumar, A., “Turning studies of deep cryogenic treated p-40 tungsten carbide cutting tool inserts– Technical communication”. *Machining Science and Technology*, 13(2), 269-281. (2009).
- 116.Özbek, N. A., “Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel”. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 9442-9456. (2020).
- 117.Vadivel, K., & Rudramoorthy, R., “Performance analysis of cryogenically treated coated carbide inserts”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 222-232. (2009).
- 118.Akgün, M., “A Comparative Study on the Cutting Performance of Uncoated, AlTiN and TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coated Carbide Inserts in Turning of Invar 36 Alloy”. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 11(1), 2045-2061. (2022).
- 119.Zeilmann, R. P., & Weingaertner, W. L., “Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant”. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 124-127. (2006).
- 120.Yıldırım, Ç. V., “Grafit parçacık takviyeli nano akışkan kullanılarak AISI 316'nın frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu”. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 326-341. (2019).
- 121.Sarikaya, M., Şirin, Ş., Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., & Gupta, M. K., “Performance evaluation of whisker-reinforced ceramic tools under nano-sized solid lubricants assisted MQL turning of Co-based Haynes 25 superalloy”. *Ceramics International*, 47(11), 15542-15560. (2021).
122. Yang, X., Chen, L., Zhang, Z., Li, Y., & Shui, Y., “Machinability assessment model for manufacturing high-temperature martensitic heat-resistant alloy steel via MQL”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(9), 3881-3901. (2022).
- 123.Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, A. M., Jamil, M., & Bellos, E., “A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 2057-2086. (2019).

124. Erden, M. A., & Akgün, M., “Effect of Mo addition on microstructure, mechanical and machinability properties of Cr-PM steels”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(10), 5455-5467. (2022).
125. Islam, M. N., & Boswell, B., “Effect of cooling methods on hole quality in drilling of aluminium 6061-6T.” In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 114, No. 1, p. 012022). *IOP Publishing*. (2016, February)
126. Braga, D. U., Diniz, A. E., Miranda, G. W., & 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*, 122(1), 127-138. (2002).
127. Akıncıoğlu, S., Gökkaya, H., & Uygur, İ., “The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 303-314. (2016).
128. Özlü, B., Akgün, M., & Demir, H., “Analysis and optimization of effects on surface roughness of cutting parameters on turning of AA6061 alloy”. *Gazi Müh Bilim Derg*, 5, 151-158. (2019).
129. Akgün, M., Demir, H., & Çiftçi, İ., “Mg<sub>2</sub>Si partikül takviyeli magnezyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu”. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 645-650. (2018).

## ÖZGEÇMİŞ

Gökhan ÖZGER, ilk ve orta öğrenimini Adıyaman ilinde ve lise öğrenimini Adıyaman Endüstri Meslek Lisesi Tesviye Bölümü'nde tamamlamıştır. 2007 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, Talaşlı Üretim Öğretmenliği Programında öğrenime başlayıp 2011 yılında mezun olmuştur. 2012 yılında Elektrik Üretim Anonim Şirketinin Afşin/Elbistan A Termik Santralinde Ölçü Test Kumanda Bölümünde teknisyen olarak işe başlamıştır. 2015 yılında Atatürk Hidro Elektrik Santralinde Teknik Büroda tasarım alanında çalışmıştır. Bu süre zarfında çeşitli sivil toplum ve Think-Tang kuruluşlarında görev alarak, ulusal ve uluslararası alanlarda sosyal ve toplumsal alanlarda çalışmalar yapmıştır. 2023 yılında Samsun Altinkaya Hes İşletme Müdürlüğüne tayin giderek halen aynı yerde çalışmalarına devam etmektedir. Evli ve 2 çocuk sahibidir.