
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SAVUNMA SANAYİNDE KULLANILAN ALÜMİNYUM MALZEMELERİN YÜKSEK BASINÇLI SOĞUTMA YÖNTEMLERİ İLE DELİNEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Büşra ÇALIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2026

ETİK BEYAN

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

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

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

Büşra ÇALIK

13/05/2026

SAVUNMA SANAYİNDE KULLANILAN ALÜMİNYUM MALZEMELERİN YÜKSEK BASINÇLI SOĞUTMA YÖNTEMLERİ İLE DELİNEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Büşra ÇALIK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2026

ÖZET

Delme işlemi, kapalı bir kesme bölgesinde gerçekleşmesi, talaş tahliyesinin zor olması ve kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle talaşlı imalat yöntemleri arasında en zorlayıcı operasyonlardan biridir. Bu durum, özellikle savunma sanayinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının işlenmesinde delik kalitesi ve geometrik doğruluk açısından kritik hale gelmektedir. Bununla birlikte, günümüzde çevresel etki, enerji tüketimi ve soğutucu akışkan kullanımı gibi sürdürülebilirlik kriterleri de üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, yüksek dayanım ve üstün mekanik özelliklere sahip Al 7075-T6 alaşımının delinmesinde uygun soğutma stratejilerinin kullanılması; hem operasyon verimliliği hem de ürün kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Al 7075-T6 alaşımının delinmesi sırasında içten soğutmalı yüksek basınçlı soğutma (YBS) uygulamasının delme performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler; üç farklı kesme hızı (140, 170 ve 200 m/dak), üç farklı ilerleme oranı (0,1-0,15-0,2 mm/dev) ve üç farklı soğutma basıncı (20, 40 ve 60 bar) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler Gri İlişki Analizi (GİA) ile bütüncül olarak değerlendirilmiş, kesme parametrelerinin gri ilişki derecesi üzerindeki etkileri ise varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle analiz edilmiştir. YBS koşullarına ek olarak kuru ve geleneksel soğutma yöntemleriyle karşılaştırmalı deneyler yapılmış; itme kuvveti, kesme momenti, güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, dairesellik ve silindiriklik değerleri performans çıktıları olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, YBS uygulamasının özellikle düşük ve orta kesme hızlarında daha kararlı bir delme süreci sağladığını, uygun basınç-hız-ilerleme kombinasyonlarıyla delik kalitesinin iyileştirilebildiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, kuru kesme koşullarında yüksek sıcaklık ve sürtünme etkileri nedeniyle yüzey pürüzlülüğü ve geometrik sapmaların belirgin biçimde arttığı tespit edilmiştir. Gri İlişki Analizi sonuçlarına göre en uygun kesme parametreleri 140 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme oranı ve 40 bar soğutma basıncı olarak belirlenmiş olup, bu koşullarda en yüksek gri ilişki derecesi (0,814) elde edilmiştir.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Delik Delme, Al 7075, içten soğutma, yüksek basınçlı soğutma, sürdürülebilir imalat
Sayfa Adedi	:	125
Danışman	:	Prof. Dr. Gültekin UZUN

INVESTIGATION OF DRILLABILITY VIA HIGH PRESSURE COOLING METHODS OF ALUMINIUM MATERIALS USED IN DEFENCE INDUSTRY

(M. Sc. Thesis)

Büşra ÇALIK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2026

ABSTRACT

Drilling is one of the most challenging machining operations due to its execution within a closed cutting zone, difficulties in chip evacuation, and the high temperatures generated during cutting. This situation becomes particularly critical in terms of hole quality and geometric accuracy during the machining of aluminum alloys widely used in the defense industry. In addition, sustainability criteria such as environmental impact, energy consumption, and cutting fluid usage have also become important factors in modern manufacturing processes. Therefore, the use of appropriate cooling strategies in the drilling of Al 7075-T6 alloy, which possesses high strength and superior mechanical properties, is of great importance in terms of both operational efficiency and product quality. In this study, the effects of internally supplied high-pressure cooling (HPC) on the drilling performance of the Al 7075-T6 alloy were experimentally investigated. The experiments were carried out using three different cutting speeds (140, 170, and 200 m/min), three different feed rates (0.1, 0.15, and 0.2 mm/rev) and three different coolant pressure levels (20, 40, and 60 bar). The experimental data were comprehensively evaluated using Grey Relational Analysis (GRA), while the effects of the cutting parameters on the grey relational grade were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA). In addition to HPC conditions, comparative drilling tests were conducted under dry and conventional cooling conditions. Thrust force, cutting torque, power consumption, surface roughness, diameter deviation, circularity, and cylindricity were evaluated as performance output parameters. The obtained results demonstrated that the application of HPC provides a more stable drilling process, particularly at low and medium cutting speeds, and that hole quality can be improved by selecting appropriate pressure–speed–feed combinations. In contrast, under dry cutting conditions, surface roughness and geometric deviations were found to increase significantly due to the effects of high temperature and friction. According to the Grey Relational Analysis results, the optimal cutting parameters were determined to be a cutting speed of 140 m/min, a feed rate of 0.1 mm/rev, and a coolant pressure of 40 bar, under which the highest grey relational grade (0.814) was achieved.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Drilling, Al 7075 alloy, ınternal coolant supply, high-pressure cooling, sustainable machining
Page Number	:	125
Supervisor	:	Prof. Dr. Gültekin UZUN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi birikimi, akademik vizyonu ve yol gösterici yaklaşımıyla bana rehberlik eden; karşılaştığım tüm zorluklarda sabırla destek olan ve bilimsel bakış açımı geliştirmeme büyük katkı sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Gültekin UZUN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın değerlendirilmesi sürecinde değerli görüş, öneri ve katkılarıyla çalışmamın gelişimine önemli katkılar sağlayan jüri üyeleri Doç. Dr. Selçuk YAĞMUR ve Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışma sürecimde teknik konularda verdikleri değerli katkılarla sürece destek olan Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü araştırma görevlileri Duygu GÜRKAN, Gözdenur COŞTAN, Saltuk Alper YAŞAR, Ömer Can FARUKOĞLU Muhammed Furkan ERHAN, Mehmet Okan KABAKÇI, Sercan BAYRAM'a ve tüm öğretim üyelerine en içten teşekkürlerimi sunarım.

FYL-2024-9976 kodlu proje ile araştırmamıza maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına teşekkür ederim.

Son olarak bu zorlu süreçte, her zaman yanımda olan, motivasyonumu yüksek tutmamda büyük katkı sağlayan ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Sağladıkları anlayış, sabır ve destek, bu tez çalışmasının tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 3

2.1. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Delik Delme Çalışmaları 3

2.2. Soğutma Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar 5

2.3. Yüksek Basınçlı Soğutma Teknikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar 7

2.4. Literatür Değerlendirmesi 20

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR TALAŞLI İMALAT 23

4. SOĞUTMA YÖNTEMLERİ 29

4.1. Yüksek Basınçlı Soğutma Yöntemi (YBS) 30

4.2. Kesme Sıvıları 33

4.2.1. Kesme sıvısı türleri 35

5. DELİK DELME İŞLEMİ 39

5.1. Delme İşlemini Etkileyen Parametreler 41

5.2. Delme İşleminde Kesme Kuvvetleri ve Moment 43

5.3. Matkaplar 45

Sayfa

6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI 49

6.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 50

6.2. Al 7075 Serisi ve İşlenebilirliği 51

7. MATERYAL VE YÖNTEM 53

7.1. Deney Malzemesi 53

7.2. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım ve Takım Tutucu 54

7.3. Takım Tezgahı 56

7.4. Kuvvet ve Momentlerin Ölçümü 57

7.5. Güç Tüketimi Değerlerinin Ölçümü 59

7.6. Delik Kalitesi Ölçümleri 60

7.7. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi 60

7.8. Deney Düzeneği ve Deney Parametreleri 61

7.9. Soğutma Sistemi 63

8. DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR 65

8.1. Farklı Soğutma Koşullarının İtme Kuvveti Üzerindeki Etkisi 65

8.2. Farklı Soğutma Koşullarının Kesme Momenti Üzerindeki Etkisi 69

8.3. Farklı Soğutma Koşullarının Güç Tüketimi Üzerindeki Etkisi 73

8.4. Farklı Soğutma Koşullarının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi 76

8.5. Farklı Soğutma Koşullarının Delik Çapı Üzerindeki Etkisi 80

8.6. Farklı Soğutma Koşullarının Silindiriklik Üzerindeki Etkisi 83

8.7. Farklı Soğutma Koşullarının Dairesellik Üzerindeki Etkisi 87

8.8. Farklı Soğutma Koşullarının Talaş Boyutları Üzerindeki Etkisi 91

8.9. Farklı Soğutma Koşullarının Kesici Takım Üzerindeki Etkisi 92

Sayfa

9. GRİ İLİŞKİ ANALİZİ VE İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRME..... 97

9.1. Gri İlişki Analizi..... 97

9.2. Varyans Analizi (ANOVA) 104

10. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 109

KAYNAKLAR 113

EKLER..... 123

EK-1. Uygunluk sertifikası 124

ÖZGEÇMİŞ 125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.1. Alüminyum alaşımlarının özellikleri 50

Çizelge 6.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 50

Çizelge 7.1. Al 7075 - T6 alaşımının kimyasal bileşimi 53

Çizelge 7.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 53

Çizelge 7.3. Deneylerde kullanılan matkabın özellikleri 54

Çizelge 7.4. Deneylerde kullanılan hidrolik takım tutucunun özellikleri 56

Çizelge 7.5. Takım tezgahının özellikleri 57

Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri 60

Çizelge 7.7. Kuru ve geleneksel soğutma deney parametreleri 62

Çizelge 7.8. YBS deney parametreleri 62

Çizelge 9.1. YBS deneylerine ait GİA'da kullanılan girdi ve çıktı parametreleri 97

Çizelge 9.2. YBS deneylerine ait normalizasyon sonuçları 98

Çizelge 9.3. YBS deneylerine ait uzaklık matrisi sonuçları 98

Çizelge 9.4. YBS deneylerine ait gri ilişki katsayısı 99

Çizelge 9.5. YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi ve sıralama 99

Çizelge 9.6. GİA'da kullanılan deney girdi ve çıktı parametreleri 101

Çizelge 9.7. Normalizasyon sonuçları 102

Çizelge 9.8. Uzaklık Matrisi sonuçları 102

Çizelge 9.9. Gri ilişki katsayısı 102

Çizelge 9.10. Gri ilişki derecesi ve sıralama 103

Çizelge 9.11. YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için ANOVA sonuçları 104

Çizelge 9.12. Gri ilişki derecesi için ANOVA sonuçları 105

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. C45E ve Inconel 718 için soğutma koşulları ve soğutma sıvısı basıncına ilişkin talaş formları 14

Şekil 2.2. Hem kuru hem de yüksek basınçlı soğutma koşullarında, farklı kesme hızları ve farklı ilerleme oranlarında takım ömründeki değişim 15

Şekil 3.1. Sürdürülebilir imalat yaklaşımının döngüsel yapısı 23

Şekil 3.2. Sürdürülebilir talaşlı imalatın temel karakteristikleri 24

Şekil 4.1. Talaşlı imalatta kullanılan soğutma yöntemleri 29

Şekil 4.2. Geleneksel harici nozullu YBS kurulumunun şematik diyagramı 32

Şekil 4.3. Takım içinden soğutma 33

Şekil 4.4. Talaşlı imalatta kesme sıvısı uygulaması 33

Şekil 4.5. Kesme sıvılarının maliyet analizi 34

Şekil 5.1. Delme işleminin talaşlı imalatta yeri 40

Şekil 5.2. Kesme hızı ve ilerleme hızı 41

Şekil 5.3. Talaş derinliği 42

Şekil 5.4. Kesici ucu etkileyen kuvvetler 43

Şekil 5.5. Matkap geometrisi 46

Şekil 5.6. İçten soğutmalı matkap 47

Şekil 6.1. 7075 Alüminyum alaşımı 51

Şekil 7.1. Delik Yerleşim Planı 54

Şekil 7.2. Deneylerde kullanılan kaplamasız karbür matkap 55

Şekil 7.3. Deneylerde kullanılan takım tutucu 55

Şekil 7.4. Deneylerde kullanılan takım tutucunun teknik çizimi 56

Şekil 7.5. Ölçümlerde kullanılan dinamometre ve veri okuyucu 58

Şekil 7.6. Kuvvet ölçüm seti şeması 58

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.7. Dinamometre ve takım tezgahı bağlantısının şematik gösterimi 59

Şekil 8.1. YBS deneylerine ait itme kuvveti sonuçları 65

Şekil 8.2. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerine ait itme kuvveti sonuçları .. 68

Şekil 8.3. YBS deneylerine ait kesme momenti sonuçları 70

Şekil 8.4. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerine ait kesme momenti sonuçları 72

Şekil 8.5. Güç tüketim değerleri grafiği 73

Şekil 8.6. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin güç tüketimine etkisi 75

Şekil 8.7. Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) sonuç grafiği 77

Şekil 8.8. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi 79

Şekil 8.9. Delik çapı değişim sonuç grafiği 81

Şekil 8.10. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin delik çap değerlerine etkisi 83

Şekil 8.11. Silindiriklik değerleri sonuç grafiği 84

Şekil 8.12. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin silindiriklik değerlerine etkisi 86

Şekil 8.13. Dairesellik değerleri sonuç grafiği 88

Şekil 8.14. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkisi 89

Şekil 9.1. YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi grafiği 100

Şekil 9.2. Gri ilişki derecesi grafiği 103

Şekil 9.3. (a) Yüksek basınçlı soğutma (YBS) deneylerine ait artıkların normal olasılık grafiği (b) Kuru, geleneksel ve YBS işleme koşullarını içeren 15 deney için artıkların normal olasılık grafiği 106

Şekil 9.4. (a) YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için artıkların tahmin edilen değerlere göre dağılımı (b) Kuru, geleneksel ve YBS koşullarını içeren 15 deneye ait gri ilişki derecesi için artıkların tahmin edilen değerlere göre dağılımı 106

Şekil **Sayfa**

Şekil 9.5. (a) YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için artıkların histogramı (b) Kuru, geleneksel ve YBS koşullarını içeren 15 deneye ait gri ilişki derecesi için artıkların histogramı 107

Şekil 9.6. (a) YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için artıkların deney sırasına göre dağılımı (b) Kuru, geleneksel ve YBS koşullarını içeren 15 deneye ait gri ilişki derecesi için artıkların deney sırasına göre dağılımı..... 108

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 7.1. Deneylerin yapıldığı takım tezgahı 57

Resim 7.2. CNC tezgahı kontrol paneli ekranından alınan güç değerleri 59

Resim 7.3. CMM cihazı görseli 60

Resim 7.4. Deney düzeneği 62

Resim 7.5. (a) Geleneksel soğutma (b) Kuru delme (c) İçten soğutmalı YBS uygulaması 64

Resim 7.6. YBS sistemi 64

Resim 8.1. 170 m/dak kesme hızında, (a) 20 bar (b) 40 bar (c) 60 bar basınç seviyelerinde kullanılan takımların görselleri 66

Resim 8.2. YBS, kuru ve geleneksel soğutma (GS) yöntemlerinin talaş boyutları üzerindeki etkisi 91

Resim 8.3. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerine ait deneylerde kullanılan takım görselleri 93

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
bar	Basınç
°	Derece
˚C	Derece Santigrat
µm	Mikron
kW	Kilowatt
f	İlerleme Oranı
Fz	İtme Kuvveti
f/dak	fit/dakika
l/dak	Litre/dakika
m/dak	Metre/dakika
mm/dak	Milimetre/dakika
mm	Milimetre
mm/dev	Milimetre/devir
Mz	Kesme Momenti
N	Newton
Ncm	Newton-santimetre
P	Güç
R_a	Yüzey Pürüzlülüğü
rpm	Devir/dakika
N/mm^2	Newton/Milimetrekare
mm^2	Milimetrekare

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
Al7075	7075 Serisi Alüminyum Alaşımı
BUE	Built Up Edge (Yığıntı Talaş)
CBN	Kübik Bor Nitrür

Kısaltmalar	Açıklamalar
CMM	Koordinat Ölçüm Makinesi
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
CO_2	Karbondioksit
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
GİA	Gri İlişki Analizi
GS	Geleneksel Soğutma
HPC	High Pressure Cooling (Yüksek Basınçlı Soğutma)
HPCJ	Yüksek Basınçlı Soğutma Jeti
HRC	Rockwell Hardness
HSS	Yüksek Hız Çeliği
MMY	Minimum Miktarda Yağlama
MPA	Megapaskal
LQL	Az Miktarda Yağlama
LCO_2	Sıvı Karbondioksit
LN_2	Sıvı Azot
PVD	Physical Vapor Deposition
RSM	Response Surface Methodology
SEM	Scanning Electron Microscope
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrür
TiAlCN	Titanyum Alüminyum Karbonitrür
TiN	Titanyum Nitrür
YBS	Yüksek Basınçlı Soğutma

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin hız kazanması ve teknolojinin gelişimiyle birlikte, yüksek dayanım-ağırlık oranına sahip malzemelere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Özellikle havacılık, savunma, otomotiv ve uzay sektörlerinde; yüksek mukavemet, korozyon direnci ve iyi işlenebilirlik gibi özellikleri bir arada sunabilen malzemelere duyulan ihtiyaç ön plana çıkmaktadır. Bu doğrultuda, 7000 serisi alüminyum alaşımları arasında yer alan 7075 Alüminyum alaşımı, sahip olduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu alaşım, yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu sayesinde yapısal uygulamalarda ideal bir seçenek olmakta, ancak talaşlı imalat sırasında oluşan sıcaklık, takım aşınması, yüzey kalitesinde bozulma ve talaş tahliyesi gibi bazı problemlerle karşılaşılabilmektedir. (Santos, Machado, Sales, Barrozo ve Ezugwu, 2016).

Talaşlı imalat, metal malzemelerin istenilen şekil ve toleranslarda işlenmesini sağlayan temel üretim yöntemlerinden biridir. Bu işlemler arasında yer alan delik delme operasyonu, hem takım hem de iş parçası açısından kritik zorluklar barındırmaktadır. Delik delme operasyonları hem geometri açısından hem de kesme kuvvetlerinin doğrudan kesici uçta yoğunlaştığı bir işlem olması bakımından önemli bir yere sahiptir (Bayraktar, Siyambaş ve Turgut, 2017). Kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklar, takım aşınmasını hızlandırmakta ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu gibi olumsuzluklar, üretim verimliliğini ve maliyeti doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle delik delme işleminde soğutma ve yağlama stratejileri, proses performansı açısından büyük önem taşımaktadır (Çakır, 2015).

Son yıllarda üretim süreçlerinin sürdürülebilirlik boyutu da önem kazanmış, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynak verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, soğutma ve yağlama yöntemleri üretim süreçlerinde belirleyici bir faktör haline gelmiştir. Geleneksel taşkın soğutma yöntemleri, kesme bölgesine büyük miktarda sıvı göndererek sıcaklığı düşürmeyi hedeflese de yüksek sıvı tüketimi, çevresel etkiler ve iş güvenliği sorunları nedeniyle sürdürülebilir üretim ilkeleriyle çelişmektedir (Ghosh ve Rao, 2015). Bu nedenle, sürdürülebilir imalat yaklaşımları doğrultusunda yeni nesil soğutma yöntemlerinin geliştirilmesi ve optimize edilmesi zorunlu hale gelmiştir.

Sürdürülebilir ve maliyet açısından verimli alternatifler bulma arayışı, araştırma ve geliştirme çalışmalarını yenilikçi yöntemlere yönlendirmiştir. İşleme süreçlerinde, kesme işlemleri ve yeşil üretim kültürünün gelişimine katkı sağlayan çeşitli soğutma teknikleri geliştirilmiştir. Yeşil üretim, operatörler için daha iyi çalışma koşulları sağlarken, aynı zamanda kesme sıvılarının satın alınması ve bertaraf edilmesi konusunda tasarruf edilmesine de katkıda bulunmaktadır (Ghani, Rizal ve Haron, 2014).

Bu alternatifler arasında öne çıkan Yüksek Basınçlı Soğutma (HPC/YBS) sistemleri, işleme bölgesinde ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması, takım ömrünün uzatılması ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi gibi birçok avantaj sunmaktadır. YBS yöntemi, kesme bölgesine yüksek basınç altında yönlendirilen akışkan sayesinde talaşların uzaklaştırılmasını kolaylaştırmakta, takım ömrünü uzatmakta ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmektedir. Ayrıca bu yöntem, geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük sıvı tüketimi ile çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Kramar ve Kopac, 2009; Debnath, Reddy ve Yi, 2014).

Bu çalışmada, kaplamasız, içten soğutmalı karbür matkaplar ile Al 7075-T6 alüminyum alaşımına delik delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yüksek basınçlı içten soğutma, dıştan geleneksel soğutma ve kuru delme koşulları uygulanmış ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı ilerleme, kesme hızı ve soğutma basıncı değerlerinin; yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi, kesme kuvvetleri ve takım aşınması gibi performans kriterleri üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, sürdürülebilir üretim hedefleri kapsamında yüksek basınçlı soğutma yönteminin etkinliği ortaya konmuştur. Deneysel sonuçlar çoklu performans kriterlerinin birlikte değerlendirilmesi amacıyla Gri İlişki Analizi (GİA) ile bütüncül olarak analiz edilmiş, kesme parametrelerinin gri ilişki derecesi üzerindeki etkileri ise varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Alüminyum alaşımları, sahip oldukları yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci ve iyi şekillendirilebilirlik özellikleri sayesinde özellikle savunma sanayi, havacılık ve otomotiv gibi stratejik sektörlerde önemli bir yer edinmiştir. Bu alaşımlar arasında yer alan 7075 serisi, yüksek mekanik dayanımı nedeniyle tercih edilmekte; ancak talaşlı imalat süreçlerinde işlenebilirliğinin zor olması, üretim sürecinde çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle delik delme işlemleri sırasında oluşan aşırı sıcaklık, takım aşınması, yüzey kalitesinde bozulma ve işleme toleranslarının sapması gibi olumsuz etkiler üretim verimliliğini düşürmektedir (Santos ve diğerleri, 2016). Dolayısıyla, kesme hızı, ilerleme oranı ve uygulanan soğutma tipi gibi kesme parametrelerinin doğru seçimi, elde edilecek yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi, geometrik toleranslar ve takım aşınması gibi performans çıktıları üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Alüminyum alaşımlarında delik delme işlemlerinin başarısı, yalnızca mekanik değil termal kontrol açısından da optimize edilmelidir. Bu nedenle, kesme bölgesinde oluşan ısıyı etkin bir şekilde uzaklaştırmak amacıyla çeşitli soğutma yöntemlerinin kullanımı kritik hale gelmiştir. Geleneksel taşkın soğutma, minimum miktarda yağlama, yüksek basınçlı soğutma gibi uygulamalar hem takım ömrünü uzatmak hem de çevresel etkileri azaltmak adına önemli avantajlar sunmaktadır. Sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda, verimli ve çevre dostu soğutma çözümleri üzerine yapılan çalışmalar giderek artmakta; bu alanda geliştirilen yenilikçi yöntemler, talaşlı imalat süreçlerinin hem ekonomik hem de ekolojik açıdan optimize edilmesine katkı sağlamaktadır (Grupta, 2020). Bu bölümde Alüminyum alaşımlarına uygulanan delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin, farklı soğutma yöntemlerinin, Alüminyum ve diğer mühendislik malzemelerinin işlenmesinde kullanılan yüksek basınçlı soğutma yöntemlerinin delik kalitesi, kesme kuvvetleri ve kesme sıvısı tüketim miktarı gibi üretim çıktılarına etkilerini konu alan çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Delik Delme Çalışmaları

Çakır ve arkadaşları, Al 7075 ve Al 6013 alüminyum alaşımlarının delik delme işlemleri sırasında kesici takım tipi (HSS ve karbür matkap), ilerleme ve kesme hızı gibi kesme parametrelerinin ilerleme kuvveti ve moment üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı ilerleme oranlarında ve kesme hızlarında yapılan deneylerde, ilerleme

oranı arttıkça hem kesme kuvvetlerinde hem de moment değerlerinde belirgin artış gözlemlemişlerdir. Yüksek hız çeliği (HSS) takımlar, özellikle düşük kesme hızlarında daha stabil sonuçlar verirken, karbür matkaplar yüksek ilerleme oranlarında daha fazla moment üretmiştir. Çalışma sonucunda, yapılan varyans analizi sonucuna göre kesici takımın tipi ve ilerleme oranının kesme kuvvetleri ve momentler üzerinde anlamlı etkileri olduğunu, ancak iş parçası malzemesinin etkisinin sınırlı kaldığını belirtmişlerdir (Çakır, Nalbant, Duran ve Ulaş, 2012).

Çaydaş ve Çelik çalışmalarında, Al 7075-T6 alüminyum alaşımının kuru delme işlemlerinde matkap uç açısı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı ve eksenel ilerleme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneyleri K20 kalite karbür matkap ile yapmışlardır. Çalışmada sabit kesme hızı ile farklı ilerleme değerlerini (5-10-15-20 ve 25 mm/dak) ve matkap uç açılarını (118°-125°-130°-135° ve 140°) test etmişlerdir. Deneyler sonucunda, ilerleme hızının ve matkap uç açısının artmasıyla, tüm deneylerde eksenel ilerleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün belirgin şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Takım uç sıcaklıkları artan ilerleme hızı ve matkap uç açısı değerlerine bağlı olarak azalmıştır. Bu durum talaşların daha etkin şekilde ısıyı taşımasıyla açıklanmıştır. Ayrıca uç açısının büyümesiyle temas alanının azalması sonucu sıcaklık değerlerinde düşüş sağlandığı belirtilmiştir. Çalışmada üç farklı talaş tipi gözlemlenmiş ve talaş tipi ile kesme parametreleri arasında doğrudan ilişki kurulmuştur. İlerleme miktarının artmasıyla talaş tipi, uzun sürekli yapıdan dolaşık bant yapıya dönüştüğü vurgulanmıştır. (Çaydaş ve Çelik, 2017).

Demir ve arkadaşları, gevrek yapısı nedeniyle sürtünmeli delme işlemlerinde Al 7075-T651 alüminyum alaşımının yüzey kalitesini ve bağlantı mukavemetini iyileştirmek amacıyla farklı çap ve derinliklerde ön delikler açarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 4 ve 6 mm kalınlıklarındaki ön delinmiş Al 7075-T651 alaşımına HSS matkaplarla 8 ve 10 mm çaplı delikler delmişlerdir. Ön delik çapının (1,5-2-2,5-3-3,5 ve 4 mm) ve derinliğinin (1-2-3 ve 4 mm), delik yüzey pürüzlülüğüne ve delikte oluşan kovan geometrisine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, ön delik çapı ve derinliğinin, takım geometrisiyle uyumlu seçildiğinde başlangıç deformasyonunu azalttığı, bunun da yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü ve daha silindirik, çatlaklardan arınmış kovan geometrileri elde edilmesini sağladığı görülmüştür. Oluşan etkileri göz önüne alarak 8 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının 2,5-3 mm, 10 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının ise 3-3,5 mm olduğunu ve ideal ön delik derinliğinin 2-3 mm arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Ayrıca, delik çapı ve malzeme kalınlığı arttıkça kovan yüksekliği ve çeper kalınlığında da artış gözlemlenmiş; optimum delik kalitesi için ön delik ölçülerinin takım ucunun kök çapı ve yüksekliği ile orantılı olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır (Demir, Adıyaman ve Yakut, 2017).

Yaşar çalışmasında, Al 7075 alüminyum alaşımının delinmesinde ilerleme ve kesme hızı gibi işlem parametrelerinin itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmiştir. Çalışmada TiAlN kaplamalı ve elmas kaplamalı tungsten karbür matkaplar ile üç farklı ilerleme değeri (0,05-0,1 ve 0,15 mm/diş), üç farklı kesme hızı (40-80 ve 120 m/dak) ve üç farklı matkap açısı (120°-130° ve 140°) kullanmıştır. Farklı kalite ve geometriye sahip karbür matkaplarla yapılan kuru delme işlemlerinde, en düşük itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine düşük kesme hızı (40 m/dak), düşük ilerleme (0.05 mm/dev), elmas kaplı karbür matkap ve 140° uç açısıyla ulaşmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında %4,9 oranında düşük sapma bulunmuş ve bu da modelin geçerliliğini kanıtlamıştır. Ayrıca, Gri İlişkisel Analiz (GİA) ile çoklu yanıt optimizasyonu uygulayarak en uygun delme parametrelerini başarıyla belirlemiştir (Yaşar, 2019).

2.2. Soğutma Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Dahnel ve arkadaşları, alüminyum alaşımlarının delinmesinde yüzey kalitesi ve takım ömrü üzerinde önemli etkileri olan kesme sıvısı kullanımını araştırmışlardır. Al 7075 malzemesinin kuru ve konvansiyonel kesme sıvısı altında delinmesi sırasında oluşan takım aşınması ve çapak oluşumunu incelemişlerdir. Çalışma, farklı kesme hızlarında (22-44 ve 66 m/dak) ve sabit (0,15 mm/dev) ilerleme oranında yapılan deneylerde, kesme sıvısı kullanımının kuru delmeye kıyasla ortalama %42'ye varan oranlarda takım aşınmasını azalttığını göstermiştir. En düşük takım aşınması ve çapak oluşumunu, 22 ve 44 m/dak hızlarda kesme sıvısı kullanarak elde ederken, üretkenlik açısından 44 m/dak hızın daha avantajlı olduğunu vurgulamışlardır. Bu bulgular, Al 7075 alaşımının işlenebilirliğini artırmak ve çapak alma maliyetlerini azaltmak adına kesme sıvısı kullanımının önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir (Dahnel, Fauzi, Raof, Mokhtar ve Khairussaleh, 2022).

Çakır ve arkadaşları, Al 7075 alüminyum alaşımının delik delme işleminde farklı soğutma yöntemlerinin (içten MMY, dıştan MMY, geleneksel soğutma ve basınçlı hava ile soğutma)

ve kesme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Taguchi L16 deney tasarımı ile dört farklı kesme hızı (100-125-150 ve 175 m/dak) ve dört farklı ilerleme oranı (0,10-0,15-0,20 ve 0,25 mm/dev) parametrelerini test etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, en iyi yüzey kalitesi geleneksel soğutma yöntemi ile elde edilirken, içten MMY uygulaması bu yönteme oldukça yakın performans göstermiştir. Artan ilerleme oranının yüzey pürüzlüğünü artırırken; artan kesme hızının ise yüzey pürüzlüğünü düşürdüğü gözlemlenmiştir. En kötü yüzey kalitesini ise basınçlı hava ile soğutma yöntemiyle elde etmişlerdir. ANOVA analizi sonucunda, yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerini en çok etkileyen parametrenin %82,16 oranla soğutma yöntemi, ardından %13,07 ile ilerleme oranı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca dıştan MMY uygulamasında, sıvının delik içine tam ulaşamaması nedeniyle yüzey kalitesinin içten MMY'ye göre düşük kaldığını vurgulamışlardır. Sonuç olarak, içten MMY yöntemini, çevre dostu yaklaşımıyla geleneksel soğutma sistemlerine güçlü bir alternatif olarak önermişlerdir (Çakır, Yıldırım ve Şeker, 2014).

Zhong ve arkadaşları bir çalışmada, çevresel sürdürülebilirlik açısından kesme sıvısı kullanımını en aza indirgemek amacıyla geliştirilen yeni bir yöntem olan az miktarda yağlama (LQL) tekniğini, havacılık alüminyum alaşımı 7050-T7451'in frezelenmesi işleminde kuru kesim ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Deneyler sırasında, LQL yöntemiyle 150 ml/dak ve 300 ml/dak oranlarında tam sentetik, suda çözünebilen kesme sıvısı uygulamışlardır. Titreşim sinyalleri zaman, frekans ve zaman-frekans düzleminde analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, kesme sıvısı uygulaması titreşimlerin sönüm hızını artırmış ve düşük frekans bölgelerinde enerji yoğunluğunu artırarak işleme kalitesini olumlu etkilemiştir. Yüksek devirli işlemlerde, düşük akış oranlı LQL'nin daha dengeli titreşim davranışları sergilediğini, yüksek akış hızlarında ise enerji artışının bazı frekans bantlarında aşırı titreşimlere neden olabileceğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, LQL'nin işleme kalitesi ve takım ömrü üzerindeki etkilerinin olumlu olmakla birlikte, uygun debi seçiminin kritik olduğunu vurgulamışlardır (Zhong, Zhao ve Wang, 2010).

Tsao çalışmasında, sert kaplamalı tungsten karbür uç frezelerin ve sülfürlü borik asit ester bazlı kesme sıvılarının A6061P-T651 alüminyum alaşımının frezelenmesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneylerde kaplamasız tungsten karbür uç freze ile TiAlN kaplamalı çok katmanlı tungsten karbür uç frezeyi karşılaştırmıştır. Deneyleri kuru ve sülfürlü borik asit ester kesme sıvısının minimum miktarda yağlama ile soğutma şartları altında gerçekleştirmiştir. Deney sonucunda takım ömrü ve kesme performansını incelemiştir.

Deneyler, TiAlN kaplamalı çok katmanlı uç frezelerin, kaplamasız frezelere kıyasla daha düşük takım aşınmasına sahip olduğunu göstermiştir. Kesme sıvısı kullanımı, takım aşınmasını %12,5 oranında azaltırken, kesme kuvvetlerinde %10'luk bir düşüş sağlamıştır. Özellikle TiAlN kaplamalı frezeler, yan ve uç aşınmada sırasıyla %38,7 ve %68,7 oranında daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuçlar, kaplamalı takımların ve gelişmiş kesme sıvılarının alüminyum alaşımlarının işlenmesinde etkinliğini ortaya koyarak, takım aşınmasını azaltmaya yönelik yeni stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Tsao, 2007).

Sreejith başka bir çalışmada, 6061 Alüminyum alaşımlarının tornalanmasında kuru, minimum miktarda yağlama (MMY) ve geleneksel kesme sıvılı soğutma yöntemlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, elmas kaplamalı karbür uç kullanmıştır. Kesme derinliği (1,0 mm) ve ilerleme değerini (0,15 mm/dev) sabit tutarak kesme hızı (50-400 m/dak) üzerinde değişiklik yapmıştır. Deney sonuçlarında takım aşınmasının kesme hızına bağlı olarak arttığını ve kuru işleme koşullarında en yüksek yapışma seviyesinin gözlemlendiğini göstermiştir. MMY, soğutma sıvısına kıyasla daha az, kuru işleme göre ise daha fazla yapışma ile sonuçlanmıştır. MMY sırasında yağlayıcının miktarı 50 ml/saatten 100 ml/saate çıkarıldığında, yapışan malzemede önemli bir azalma olmamıştır. MMY koşulları sırasında yapışan malzemenin daha fazla olmasının, takım geometrisinden kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Takım geometrisi üzerinde çalışmalar yapılması gerektiği önerisinde bulunmuştur. Ayrıca, kesme kuvvetleri, yapışma ve sürtünme etkisi nedeniyle kuru işlemde en yüksek, soğutma sıvısı uygulamalarında ise en düşük seviyede kaydedilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından, MMY ve soğutma sıvısı uygulamaları, kuru işleme göre daha iyi sonuçlar sağlamıştır (Sreejith, 2008).

2.3. Yüksek Basınçlı Soğutma Teknikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yılmaz, tez çalışmasında, Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde farklı soğutma yöntemlerinin yanı sıra özellikle soğutucu akışkan basıncının (10, 20, 40 ve 60 bar) delme performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Takım içinden uygulanan soğutma sistemlerinde basınç artışının delme operasyonu üzerindeki etkilerini analiz etmiş ve artan basınç ile kesme momentinin önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur. Bu iyileşmeyi yüksek basınçlı soğutmanın talaş oluşumu ve tahliyesi üzerindeki etkisiyle açıklamıştır. Artan basınç ile talaş boyutlarının küçüldüğünü, talaş tahliyesinin kolaylaştığını ve kesme bölgesinde daha etkin

bir kontrol sağlandığını gözlemlemiştir. Bu sayede talaşın kesme bölgesinde oluşturduğu direnç azalmış ve kesme momentleri düşmüştür. Ayrıca, artan soğutucu basıncı ile kesme bölgesindeki sıcaklıkların azaldığını ve bu durumun işlem stabilitesini artırdığını belirtmiştir. Bununla birlikte, yüksek basınçlı içten soğutmanın akış yönü nedeniyle delik içerisinde ek bir itme etkisi oluşturduğunu ve bu nedenle bazı durumlarda ilerleme kuvvetlerinin basınçla birlikte artabildiğini de ifade etmiştir (Yılmaz, 2022).

López de Lacalle ve arkadaşları, uçak motoru parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı ve Inconel 718 nikel bazlı süperalaşımının delme ve tornalama işlemlerinde, YBS'nin etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde hem dıştan hem de takım içi kanallarla yüksek basınçlı sıvı enjeksiyonu kullanmışlar, testleri 11 MPa basınçta ve dakikada 10 litre debide sıvı püskürten bir pompa ile gerçekleştirmişlerdir. Ti-6Al-4V malzemesinin delme işlemlerinde TiAlN kaplamalı karbür matkaplar kullanmışlardır. Bu kaplamanın yüksek mikrosertliği sayesinde takım ömrünün kaplamasız uca göre 4 kat arttığını belirtmişlerdir. Tornalama deneylerinde, titanyum alaşımında YBS kullanımıyla kesme kuvvetlerinde düşüş, talaş kırılmasında iyileşme, kesme bölgesi sıcaklığında azalma ve takım ömründe önemli artış sağlandığını ifade etmişlerdir. 11 MPa basınçla yapılan uygulamada, kesme hızı iki katına çıkartılmasına rağmen takım ömrü korunmuş ve talaş akışı %100 artmıştır. YBS ile yapılan işlemlerde, takımın kesici kenarında plastik deformasyon oluşmadığı, yalnızca düzgün ilerleyen bir aşınma gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, çalışma, yüksek basınçlı soğutma sistemlerinin özellikle titanyum alaşımlarında yüzey kalitesini iyileştirme, takım ömrünü ve üretkenliği artırma açısından etkin bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (López de Lacalle ve diğerleri, 2000).

Dhar ve arkadaşları, AISI 4340 çeliğinin delinmesinde, YBS kullanımının talaş şekli, delik yuvarlaklık sapması, koniklik ve takım aşınması üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, çapı 10 mm olan HSS matkap ucu, 30,75 m/dak kesme hızı, 0,10 mm/dev ilerleme ve 40 mm derinlik ile kullanmışlardır. YBS sistemi, 40 bar basınçta ve 6 l/dak debide, 1,0 mm çapında dıştan nozul ucu ile uygulanmıştır. Deneylerde, kuru ve YBS koşulları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, YBS uygulaması sayesinde talaşlar spiral yapıdan ince, düzgün yapıya dönüşmüş, renkleri de yanık mavi renkten metalik tona geçerek ısının etkin şekilde uzaklaştırıldığını göstermiştir. YBS ile yapılan delme işlemlerinde delik giriş ve çıkışında çap sapmaları ve standart sapmalar düşmüş, yuvarlaklık korunmuştur. Koniklik değerleri de YBS altında hem daha düşük hem de daha düzenli çıkmış, delik

kalitesi artmıştır. SEM analizleri sonucunda, kuru koşullarda takım ucu ciddi şekilde aşınırken, YBS koşullarında aşınma önemli ölçüde azalmış ve takım ömrü artmıştır. Ayrıca YBS, delik boyunca sıcaklık dağılımını homojen tutarak, takımın delik içinde sapmasını ve yön değişimini engellemiştir. Bu çalışma, yüksek basınçlı kesme sıvısının, özellikle delik kalitesi ve takım dayanımı açısından HSS takımlarla yapılan delik delme işlemlerinde önemli faydalar sunduğunu ortaya koymaktadır (Dhar, Rashid ve Siddiqui, 2006).

Satyanarayana ve diğerleri, AISI 4340 çeliğinin delinmesinde, yüksek basınçlı soğutma jeti (High Pressure Coolant Jet – HPCJ) uygulamasının delik kalitesi, talaş oluşumu ve takım aşınması üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, 1 beygirlik motorla çalışan bir pompa, debi ve basınç kontrol vanaları, geri dönüşüm pompası ve filtre içeren, 15 litrelik soğutma sıvısı tankına bağlı özel bir YBS sistem tasarlanmıştır. Sistemde, uç çapı 1,5 mm olan özel tasarım nozullar kullanılmış; soğutma sıvısı 1 l/dak debiyle 1 bar basınçta, matkap ucu ile iş parçası temas noktasına eğimli olarak yönlendirilmiştir. Delme işlemlerini, 8 mm HSS matkap ucu, 40 ft/dak kesme hızı, 0,002 inç/dev ilerleme ve 17 mm derinlik ile gerçekleştirmişlerdir. Kuru ve YBS koşulları karşılaştırıldığında, YBS uygulamasında takımın renk değiştirmediği, talaşların metalik ve düzgün spiral yapı gösterdiği, kuru koşullarda ise matkabın ısınarak maviye döndüğü ve talaşların düzensiz oluştuğu gözlemlenmiştir. Delik giriş ve çıkışında yapılan çap ve dairesellik ölçümlerinde, YBS koşullarında sapmaların azaldığını ve daireselliğin daha stabil olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, SEM analizlerinde, kuru koşullarda belirgin yan yüzey ve keski kenarı aşınmaları gözlemlenirken, YBS koşullarında takımda anlamlı bir aşınma oluşmamıştır. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) de kuru işleme kıyasla YBS altında daha düşük çıkmış, ısının etkin şekilde uzaklaştırılmasıyla takım ömrünün arttığı belirtilmiştir. Bu sonuçlar, YBS sisteminin özellikle düşük basınçta bile takım ömrünü uzattığını, yüzey kalitesini iyileştirdiğini ve talaş kontrolünü optimize ettiğini göstermiştir (Satyanarayana, Anitha ve Kumar, 2017).

Shete ve Sohani, AISI 1055 çeliğinin delme işlemi sırasında, yüksek basınçlı soğutma sisteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini Taguchi deney tasarımı yöntemi ile incelemiştir. Araştırmada, kendi geliştirdikleri özel bir YBS adaptör tertibatı, TiAlN kaplamalı 10 mm çapında içten soğutmalı karbür matkap kullanılmıştır. Deneylerde soğutma sıvısı, 7-13,5 ve 20 bar aralığında ve 0,4-0,8 l/dak debilerle uygulanmış; 55 mm derinliğinde delikler açılmıştır. Uygulanan dört parametre (soğutma basıncı, devir sayısı, ilerleme ve delik delme adımı derinliği), L9 ortogonal dizi ile test edilmiştir. Sonuçlar, yüzey

pürüzlülüğünün (R_a) en düşük 0,17 µm değerine 13,5 bar basınç, 4500 dev/dak, 0,05 mm/dev ilerleme ve 20 mm delme derinliği ile ulaşıldığını göstermiştir. Soğutma basıncı 13,5 bara kadar arttığında pürüzlülük iyileşmiş, ancak 20 bara çıktığında tekrar artmıştır. Ayrıca, delik alt yüzeyinde pürüzlülük değerlerinin üst yüzeye kıyasla daha yüksek olduğu ve bunun; kesme bölgesinde oluşan sıcaklık birikimi, talaş sıkışması ve titreşim kaynaklı deformasyonlarla ilişkili olduğu belirtilmiştir. En anlamlı etkiler, sırasıyla soğutma basıncı ve devir sayısı olarak öne çıkmış, ileri seviye analizlerde delik derinliğinin de önemli rol oynadığını görmüşlerdir. Yüksek basınçlı soğutma sayesinde, yüksek delme adımı kullanılarak da düşük pürüzlülük elde edilmiş; bu durum döngü süresini ve üretim maliyetini düşürmüştür. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü değerlerinin bazı durumlarda taşlama gibi finisaj operasyonları ile yarışabilecek seviyelere indiğini belirtmişlerdir (Shete ve Sohani, 2020).

Kovacevic ve arkadaşları, frezeleme işlemlerinde yüksek basınçlı su jeti soğutma/yağlama sisteminin verimliliğe etkisini araştırmışlardır. Su jeti, takım içinden ve harici nozul aracılığıyla olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmış; AISI 304 paslanmaz çelik ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımı, 68,8-200 MPa basınç aralığında işlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek basınçlı su jeti soğutma, geleneksel sıvı soğutmaya kıyasla kesme kuvvetlerini %40'a kadar azaltmış, takım aşınmasını %150'ye kadar düşürmüş ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir. Ayrıca, talaşların daha küçük ve düzenli olduğu, kesme sıcaklığının azaldığı gözlemlenmiştir. Takım talaş yüzeyinden doğrudan su jeti uygulamasının, harici nozula göre daha etkili bir soğutma sağladığı belirlenmiştir. Bu çalışma, yüksek basınçlı soğutma sistemlerinin, özellikle zor işlenen malzemelerde takım ömrünü uzatmada ve işleme performansını artırmada önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir (Kovacevic, Cherukuthota ve Mazurkiewicz 1994).

Kaminski ve Alvelid, alaşımlı çelik SS2541-03 iş parçası üzerinde gerçekleştirilen tornalama işlemlerinde, yüksek ve ultra yüksek basınçlı su jeti destekli soğutma yönteminin kesme bölgesi sıcaklığı, kesme kuvvetleri, talaş oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Deneylerde Al_2O_3 kaplamalı karbür uçlar ve kesme hızları 150-225 ve 300 m/dak; ilerleme hızı 0.3 mm/dev, kesme derinliği 3 mm olarak kullanılmıştır. Su jeti 5° açıyla, doğrudan talaş yüzeyine yönlendirilmiş ve 0,25-0,5 mm çapındaki nozullarla, 20-300 MPa basınç aralığında uygulanmıştır. Sıcaklık ölçümü için uca entegre edilmiş altın-platin termokupllar kullanılmış ve kenar sıcaklığında %40-45 oranında azalma gözlemlenmiştir. Su jeti, takım-talaş arayüzünde hidro-yastık (hydro-wedge) oluşturarak

sürtünmeyi azaltmış, temas uzunluğunu kısaltmış ve talaş sıkıştırma oranını düşürmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ultra yüksek basınçlarda daha da iyileşmiş, tırtık oluşumu azalmıştır. Özellikle 200-300 MPa basınçlarda işlenen yüzeylerde çapak oluşumu minimum seviyeye inmiştir. Bu yöntemle, yalnızca kesme bölgesinde oluşan ısının uzaklaştırılması değil, aynı zamanda talaş akış yönü ve kırılma mekanizması da optimize edilerek çevreci sıvılarla verimli işleme koşullarının sağlanabileceği vurgulanmıştır. (Kaminski ve Alvelid, 2000).

Senthil Kumar ve arkadaşları, farklı sertlik seviyelerine sahip ASSAB 718 ön sertleştirilmiş takım çeliği üzerinde gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde, yüksek basınçlı soğutma tekniğinin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş geometrisi üzerindeki etkilerini kuru kesim ve geleneksel soğutma koşullarıyla karşılaştırarak incelemiştir. Deneyler TiAlCN kaplamalı ve kaplamasız karbür uçlar kullanılarak, 150 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranı ve 0,35 mm kesme derinliği ile yapılmıştır. YBS sistemi, 20 bar basınçla mil içinden sıvı iletimi sağlayan bir pompa ile uygulanmıştır. Sonuçlara göre, 35-40 HRC sertliğindeki numunelerde yüksek basınçlı soğutma, kesme kuvvetlerini önemli ölçüde azaltmış, özellikle 40 HRC'de diğer yöntemlere kıyasla en düşük kuvvet değerleri elde edilmiştir. Kaplamasız uçlarla yapılan kesimlerde, YBS'nin takım ömrünü gözle görülür şekilde artırdığı, konvansiyonel soğutmaya göre daha düşük kenar aşınması belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından, düşük sertliklerde YBS ile geleneksel soğutma arasında fark az iken, yüksek sertliklerde YBS belirgin avantaj sağlamıştır. Talaş morfolojisi incelemelerinde, YBS ile üretilen talaşların daha geniş diş yapısına, daha büyük segmentlere ve daha az plastik deformasyona sahip olduğu görülmüştür. Çalışma, yüksek basınçlı soğutmanın hem sertleştirilmiş çeliklerin frezelenmesinde hem de sürdürülebilir üretim hedeflerinde önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur (Senthil Kumar, Rahman ve Ng, 2002).

Ezugwu ve Bonney, Inconel 718 süper alaşımının tornalanmasında, TiCN/Al_2O_3/TiN üçlü PVD kaplamalı karbür uçlar ile yapılan işlemlerde farklı soğutma basınçlarının takım performansına, yüzey kalitesine ve talaş oluşumuna etkisini sistematik olarak incelemiştir. Deneylerde, 20-30 ve 50 m/dak kesme hızları, 0,25 ve 0,3 mm/dev ilerleme oranları kullanılmış; 110-150 ve 203 bar olmak üzere üç farklı yüksek basınç uygulanmıştır. Sonuçlara göre, 50 m/dak hızda ve 203 bar basınçla yapılan işlemde takım ömrü %740'a kadar artmıştır. Kesme kuvvetleri, yüksek basınç altında hidrolik kama etkisi ile sürtünme katsayısının düşmesi sayesinde azalmış; ancak yine 20 m/dak hızda 203 bar basınçta kuvvet

artışı gözlemlenmiştir. SEM analizleri, 203 bar altında işlenen uçlarda kaplama soyulması ve aşındırıcı aşınma etkilerini ortaya koymuştur. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, her kesme koşulunda 6 µm sınırının altında kalmış ve işlenmiş yüzey bütünlüğünün bozulmadığı gösterilmiştir. Ayrıca, 203 bar basınçla talaşlar daha kısa, segmente ve kontrollü biçimde oluşmuştur. Bu çalışma, yüksek basınçlı kesme sıvısı uygulamalarının, özellikle yüksek hız ve ilerleme oranlarında, Inconel 718 gibi süper alaşımların işlenmesinde takım ömrünü ve talaş kontrolünü iyileştirmek adına etkili ve sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur (Ezugwu ve Bonney, 2004).

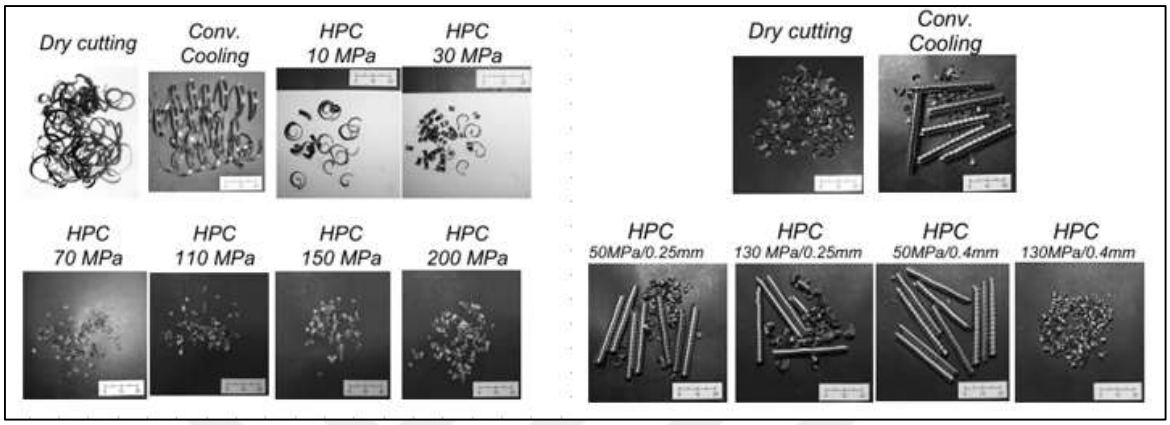
Ezugwu ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının tornalama işlemlerinde, farklı CBN (Cubic Boron Nitride) takım derecelerinin, yüksek basınçlı soğutma koşulları altında performansını kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Deneyler; 150-200 ve 250 m/dak kesme hızlarında, 0,5 mm kesme derinliği ve 0,15 mm/dev ilerleme ile gerçekleştirilmiş; 11 MPa (18,5 l/dak) ve 20,3 MPa (24 l/dak) soğutma basınçlarıyla, geleneksel soğutma (2,7 l/dak) karşılaştırılmıştır. Üç farklı CBN takımı (T1, T2, T3) ve karşılaştırma için kaplamasız karbür uç (T4) ile deneyler yapılmıştır (T1: %50 CBN, %50 TiC seramik; T2: %90 CBN, %10 Al seramik; T3: TiN kaplamalı CBN; T4: Kaplamasız Karbür (WC, Co bağlayıcılı). Sonuçlara göre, 11 MPa basınç altında T1 takımı ile %68, T4 ile %123; 20.3 MPa basınçta ise T1 ile %150, T4 ile %111 oranında takım ömrü artışı elde edilmiştir. Ancak CBN oranı yüksek (T2 ve T3) takımlarda, yüksek ısıl iletkenlik nedeniyle çentiklenme ve kırılma gibi aşınma mekanizmaları daha hızlı gelişmiş; bu durum takım ömrünü olumsuz etkilemiştir. T1 takımı, düşük CBN içeriği ve seramik matris yapısı sayesinde yüksek basınca daha dirençli olmuş ve en düzenli aşınma davranışını sergilemiştir. Kesme kuvvetleri, CBN takımlarında genel olarak daha düşük çıkmış, özellikle T1 ile daha stabil seyretmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, 0,4-1,9 µm aralığında ölçülmüş olup, en düşük R_a değeri T4 takımında elde edilmiştir. T1 takımında hız artışına rağmen yüzey kalitesi korunmuş; bu durum, keskinliğini daha uzun süre korumasına bağlanmıştır. Çalışma, yüksek basınçlı soğutmanın 11-20 MPa aralığında uygulandığında takım ömrünü ve yüzey kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini, ancak belirli bir basınç eşiğinin üzerindeki artışın her zaman ilave fayda sağlamadığını göstermektedir (Ezugwu, Silva, Bonney ve Machado 2005).

Ezugwu ve arkadaşları, Inconel 718 süper alaşımının tornalama işlemlerinde, SiC ile güçlendirilmiş Al_2O_3 seramik takımlar ile uygulanan farklı yüksek basınçlı soğutma koşullarının takım ömrü, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bütünlüğü

üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneylerde soğutma sıvısı 11, 15 ve 20,3 MPa basınç seviyelerinde, 20-50 l/dak debiyle harici nozul yardımıyla kesici takımın talaş yüzeyine yönlendirilmiştir. Referans olarak, konvansiyonel sistemde 5 l/dak debi uygulanmıştır. İşlemler, 200, 270 ve 300 m/dak kesme hızı, 0,1-0,2 mm/dev ilerleme ve 0,5 mm derinlikte gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, 15 MPa basınçta %71'e varan takım ömrü artışı sağlanmış, ancak 20,3 MPa uygulandığında, hidrodinamik erozyon nedeniyle çentik aşınması hızla artmış, bu da takım ömrünü tüm hızlarda düşürmüştür. Aşınma analizlerinde, 20,3 MPa'da çentik oluşumunun yan yüzey ve talaş yüzeyi boyunca yayıldığı gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetleri, artan basınçla birlikte belirgin şekilde azalmış; bunun, soğutma etkinliğinin artması ve yüksek basınçlı sıvının talaşı kaldırarak temas alanını azaltmasıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Talaşlar, yüksek segmentli ve iğne benzeri yapıda, keskin tırtıklı kenarlara sahip olarak oluşmuştur. Yüzey pürüzlülüğü tüm koşullarda kabul edilebilir sınırların altında kalmış; en iyi yüzey kalitesi, 6 mm burun yarıçapına sahip seramik uçların yardımıyla elde edilmiştir. Mikrosertlik profilleri, soğutma basıncının yüzeydeki plastik deformasyonu azalttığını; 30-50 μm derinlikte iş sertleşmesi etkisinin oluştuğunu göstermiştir. Çalışma, 15 MPa basınç seviyesinin kritik eşik olduğunu, bu değerin üzerindeki basınçlarda ise seramik uçlar için aşırı çentik aşınması nedeniyle performansın düştüğünü ortaya koymuştur (Ezugwu, Bonney, Fadare ve Sales, 2005).

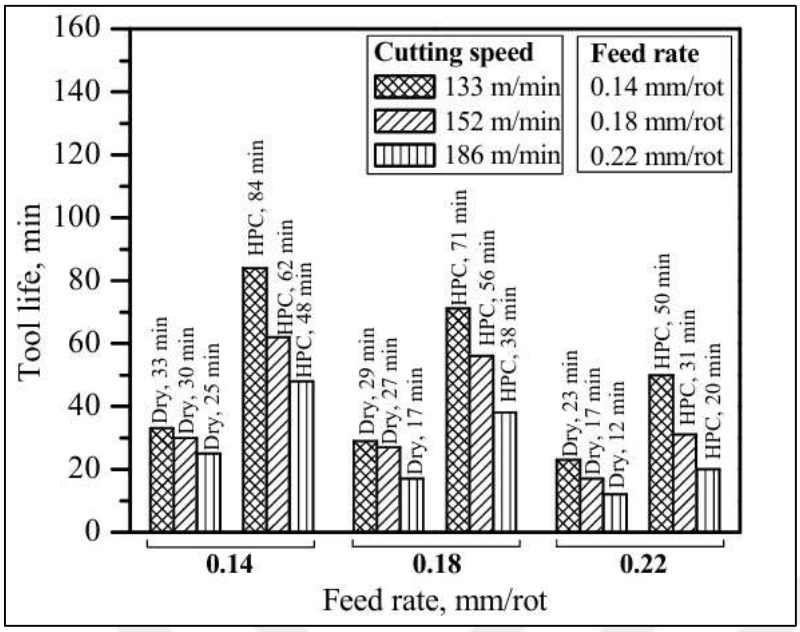
Kramar ve Kopač, yüksek basınçlı soğutmanın, işlenmesi zor malzemelerin tornalanmasındaki etkinliğini araştırmıştır. Çalışmada hem sert krom kaplı ve yüzeyden indüksiyonla sertleştirilmiş C45E çeliği hem de Inconel 718 nikel esaslı süper alaşım kullanılmıştır. Deneyler, kaplamalı karbür takımlar ile konvansiyonel torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Sistemde 200 MPa basınca ve 8 l/dak debiye sahip pistonlu bir yüksek basınç pompası kullanılmıştır. Soğutma sıvısı, %5,5 oranında sebze yağı bazlı klor içermeyen emülsiyon olarak belirlenmiştir. Sıvı, 0,25–0,4 mm çapındaki safir uçlu nozullar ile, takım talaş yüzeyine yönlendirilmiştir. C45E çeliği için 110 MPa basınçta 0,3 mm nozul, Inconel için ise 50-130 MPa basınçlar arasında 0,25 ve 0,4 mm nozullar kullanılmıştır. C45E çeliğinde, YBS ile konvansiyonel soğutmaya kıyasla %45 daha yüksek kesme hızı ve %25 daha fazla ilerleme hızı uygulanabilir hale gelmiş; takım ömrü 2 dakikadan 10 dakikaya çıkmıştır. Inconel 718'de ise YBS ile takım ömrü 4,5 dakikadan 8 dakikaya yükselmiş, sıcaklık ölçümlerinde %30'luk azalma elde edilmiştir. Ayrıca, en iyi performans ve en düşük soğutma sıvısı tüketimi, büyük çaplı nozul (0,4 mm) ve düşük basınç (50 MPa) kombinasyonunda elde edilmiştir. Talaş şekli Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi daha homojenik

ve kırık yapıda oluşmuştur. Takım aşınma mekanizmaları ve yüzey kalitesi değerleri de detaylı olarak değerlendirilmiş; tüm sonuçlar YBS'nin yalnızca takım ömrünü uzatmakla kalmayıp, üretim verimliliğini artırırken sıvı tüketimini %75'e kadar azaltabileceğini ortaya koymuştur (Kramar ve Kopač, 2009).



Şekil 2.1. C45E ve Inconel 718 için soğutma koşulları ve soğutma sıvısı basıncına ilişkin talaş formları

Kamruzzaman ve Dhar, AISI 1060 çeliğinin tornalanmasında, YBS uygulamasının kesme sıcaklığı, talaş şekli, kesme kuvvetleri, takım aşınması, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde deneysel olarak incelemiştir. Deneylerde, kaplamasız karbür uçlar, 93-266 m/dak kesme hızlarında ve 0,10-0,22 mm/dev ilerleme oranlarında kullanılmıştır. Soğutma sıvısı 6 l/dak debiyle ve 80 bar basınçta, 0,5 mm çapında dış nozuldan, talaş yüzeyine yönlendirilmiştir. Deneyler sonucunda, yüksek basınçlı soğutmanın, kesme bölgesindeki sıcaklığı önemli ölçüde düşürdüğü, takım aşınmasını azalttığı, talaşın daha etkili bir şekilde uzaklaştırıldığı ve yüzey kalitesini iyileştirdiği görülmüştür. Bu yöntem, özellikle daha düşük kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında etkili olmuş ve takım ömrünü Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi önemli ölçüde artırmıştır. Deney sonuçları, yüksek basınçlı soğutma sıvısının kullanıldığı ortamda kesme kuvvetlerinin azaldığını, talaş kontrolünün iyileştiğini ve yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde azaldığını göstermiştir (Kamruzzaman ve Dhar, 2009).



Şekil 2.2. Hem kuru hem de yüksek basınçlı soğutma koşullarında, farklı kesme hızları ve farklı ilerleme oranlarında takım ömründeki değişim

Nandy ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında, takım ömrü ve aşınma performansını değerlendirmek amacıyla geliştirdikleri yerli tasarım yüksek basınçlı soğutma sistemi ile kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Kurulan sistem; elektrik motoru, tek kanatlı pompa, basınç tahliye valfi, basınç göstergesi, yön kontrol valfi, dağıtım manifoltları, filtre, soğutma sıvısı tankı ve soğutma bobinlerinden oluşmuştur. Soğutma sıvısının sıcaklığı, sisteme entegre edilen şebeke tipi chiller ve bakır boru bobinleri yardımıyla sabit tutulmuştur. Nozullar, 0,6 mm ve 1,0 mm çapında olup, sert pirinç uçlu olarak tercih edilmiş ve jetler hem talaş yüzeyine hem de yan yüzeye 20° açıyla yönlendirilmiştir. Sistem, 71-140 bar arasında ayarlanabilir basınç sağlamış; yön kontrol valfi sayesinde soğutma sıvısı yalnızca talaş yüzeyi, yalnızca yan yüzey veya her iki yüzeye aynı anda uygulanabilmiştir. Bu sistem, ticari sistemlere göre düşük maliyetli, taşınabilir ve esnek bir çözüm sunarak, yüksek basınçlı soğutmanın takım ömrü üzerindeki etkilerinin analizinde önemli bir altyapı sağlamıştır (Nandy, Gowrishankar ve Paul 2009).

Patil ve Shinde, EN8 çeliğinin torna işlemlerinde, YBS'nin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneyler, karbür uçlar kullanılarak 2000 dev/dak hız, 0,1 mm/dev ilerleme ve 0,2 mm kesme derinliği ile gerçekleştirilmiştir. Soğutma sıvısı 10-20 ve 70 bar basınç seviyelerinde uygulanmıştır. Deneylerde, soğutma sistemine ait pompa, basınç göstergesi, basınç tahliye valfi ve dış

nozullu yüksek basınç ünitesi kullanılmıştır. 70 bar basınç ve 10 l/dak debi ile çalışan sistem, dış nozuldan talaş yüzeyine yönlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, 10 bar basınç altında 160 parça işlenebilirken, 20 bar ile 200 parça, 70 bar ile ise 520 parça gerekli yüzey kalitesi korunarak işlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) değeri 10 bar için 2,923 µm, 20 bar için 1,687 µm, 70 bar için 1,521 µm olarak ölçülmüştür. SEM görüntüleriyle yapılan takım ucu analizlerinde, 70 bar altında takım aşınmasının 46,49 µm, 10 bar altında ise 73,47 µm olduğu belirlenmiştir. Bu fark, yüksek basınçlı su bazlı sıvının kesme bölgesine daha etkili nüfuz ederek sıcaklığı düşürmesi ve takım ile talaş arasındaki sürtünmeyi azaltmasına bağlanmıştır. Ayrıca, düşük basınçta yüksek debi yerine yüksek basınçta düşük debi ile daha etkin sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma, yüksek basınçlı soğutmanın takım ömrünü uzattığını, yüzey kalitesini artırdığını ve çevreci su bazlı sıvılarla daha sürdürülebilir bir işleme ortamı sağladığını göstermiştir (Patil ve Shinde, 2013).

Ayed ve arkadaşları, Ti17 titanyum alaşımının tornalanmasında, yüksek basınçlı su jeti yardımıyla yapılan soğutmanın (High-Pressure Water Jet Assistance – HPWJA) takım aşınması ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Deneylerde kaplamasız WC/Co uçlar, 1,5 mm kesme derinliği ve 0,1 mm/dev ilerleme oranı kullanılmış, kesme hızı 50-100 m/dak aralığında değiştirilmiştir. Soğutma sistemi, 400 bar maksimum basınç ve 38 l/dak debi sağlayan bir pompa ile çalıştırılmıştır. %5 oranında suda çözünebilen yağ içeren 200 litrelik sıvı tankı kullanılmıştır. Nozul çapı 0,8 mm olan sistemle, 50-100-150-200 ve 250 bar basınç seviyelerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, 100 bar basınç seviyesinin optimum koşul olduğunu, bu basınç altında takım ömrünün yaklaşık 9 katına çıktığını göstermiştir. 100 m/dak kesme hızında konvansiyonel yağlama ile 1 dakikada tükenen takım ömrü, HPWJA ile 9 dakikaya ulaşmıştır. Daha yüksek basınç seviyelerinde (150-250 bar), talaş geri dönüşü ve yüzey çizilmeleri gibi yan etkiler artarak takım aşınmasını ve iş parçası yüzey bütünlüğünü olumsuz etkilemiştir. Çalışma sonunda, HPWJA ile 15 dakika takım ömrü hedeflendiğinde, konvansiyonel yağlama altında 61 m/dak olan maksimum kesme hızının, 81 m/dak'a çıkarılabildiği ve bunun da %32 üretkenlik artışı sağladığı belirtilmiştir. Bu sonuçlar, Ti17 gibi zor işlenebilir alaşımlarda optimum basınç düzeyinin belirlenmesinin takım ömrü ve yüzey kalitesi açısından kritik önemde olduğunu göstermiştir (Ayed, Germain, Ammar ve Furet, 2015).

Mia ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında hem talaş yüzeyine hem de yan yüzeye yönlendirilen çift jetli yüksek basınçlı soğutma sisteminin takım ömrü ve yüzey

pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneyler, 112 m/dak kesme hızı, 0,12 mm/dev ilerleme ve 1,0 mm kesme derinliğinde, TiCN+WC+Co kaplamalı karbür uçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan soğutma sistemi, 80 bar basınçta çalışan, iki çıkışlı özel nozul içeren ve her biri 0,5 mm çapında olan hatlar üzerinden toplamda 12 l/dak debi sağlayan bir düzeneğe sahiptir. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçümleri, kesme hızı ve ilerleme oranlarına bağlı olarak karşılaştırıldığında, YBS uygulamasında ortalama %15 oranında iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Yüksek ilerleme oranlarında yüzey pürüzlülüğü artarken, yüksek kesme hızları yüzey kalitesini olumlu etkilemiştir. Takım aşınması, optik mikroskop ve SEM analizleriyle değerlendirilmiş, kuru kesimde belirgin krater ve çentik aşınmaları, YBS koşullarında ise yan yüzey ve burun bölgelerinde aşırı sürtünmeden kaynaklı mikro yapışma ve kazıma izleri tespit edilmiştir. Ortalama yan yüzey aşınması, kuru kesimde 5 dakikada ISO 3685'e göre kabul sınırı olan 300 μm'ye ulaşırken, YBS uygulamasıyla bu değer 7 dakikada aşılmış, böylece %40 oranında takım ömrü uzaması sağlanmıştır. Ayrıca yardımcı yan yüzey aşınması baz alındığında takım ömrü %70'e varan oranda uzamıştır. İşlem süresine bağlı yüzey pürüzlülüğü artışı da yavaşlatılmış, yüzey pürüzlülüğüne dayalı takım ömrü kriteri açısından %80 oranında iyileşme elde edilmiştir. Çalışma, talaş ve yan yüzeylere yönlendirilmiş çift jetli YBS uygulamasının hem aşınma hem yüzey kalitesi açısından etkili ve sürdürülebilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Mia, Khan ve Dhar, 2017)

Lu ve arkadaşları, Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işlenmesinde kullanılan yüksek hızlı ultrasonik titreşimli tornalama (High-Speed Ultrasonic Vibration Cutting - HUVC) sürecine YBS uygulayarak, bunun takım ömrü, yüzey kalitesi, kesme sıcaklığı ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde, HUVC ile konvansiyonel tornalama karşılaştırılmış; kesme hızları 200-500 m/dak, ilerleme oranı 0,005-0,015 mm/dev ve 0,05 mm kesme derinliği kullanılmıştır. Soğutma sıvısı olarak %6 konsantrasyonlu suda çözünebilen yağ emülsiyonu, 50-200 bar aralığında 21 l/dak debiyle uygulanmıştır. Sonuçlar, HUVC ile birleştirilen YBS'nin, takım ömrünü önemli ölçüde uzattığını ve geleneksel kesime kıyasla yüzey kalitesini iyileştirdiğini göstermiştir. Özellikle, 200 bar YBS basıncı altında takım ömrü, kesme hızına bağlı olarak 5,7 ila 6,3 kat artmıştır. Ayrıca, HUVC + YBS kombinasyonu, kesme sıcaklığını %55'e kadar azaltmış ve kesme kuvvetlerini %15-45 oranında düşürmüştür. Geleneksel kesimde görülen yapışma ve oksidasyon aşınmaları, HUVC + YBS kullanılarak baskılanmış ve ana aşınma türü aşındırma olarak değişmiştir. Ancak, 500 m/dak kesme hızında, geçici darbe kuvvetleri nedeniyle bu

yöntemin avantajları sınırlanmıştır. Bu yöntem, titanyum gibi zor işlenen alaşımların hassas işlenmesinde verimliliği artırmak ve takım aşınmasını baskılamak için bir çözümdür (Lu, D. Zhang, X. Zhang ve Peng, 2020).

Lakner ve arkadaşları, Ti-6Al-4V titanyum alaşımının frezelenmesinde, yüksek basınçlı kesme sıvısı uygulamasının işleme performansı, ekonomik verimlilik ve çevresel etkiler açısından kapsamlı bir analizini gerçekleştirmiştir. 70 bar basınçta ve 25-37,5 l/dak debide kesme sıvısı uygulanmıştır. Sonuçlar, talaşların daha küçük ve homojen oluştuğunu, bu sayede talaş kanallarının daraltılarak aynı çapta daha fazla kesici kenarın uygulanabilir hale geldiğini göstermiştir. Takım ömrü açısından her iki takımda da benzer yan yüzey aşınma (VB = 200–210 µm) elde edilmiş; ancak özel takımda daha düzgün ve yapışmasız bir aşınma modeli gözlemlenmiştir. Ekonomik değerlendirmede, daha fazla kesici kenarın kullanımıyla süreç süresi %33 kısalmış ve %20'ye varan maliyet tasarrufu sağlanmıştır. Çevresel analizde, özel YBS sistemiyle filtre malzeme atığı %60 azalmış, toplam makine enerji tüketimi ise süreç süresinin kısalması sayesinde %20'nin üzerinde düşmüştür. Bu sonuçlar, uygun nozul yönlendirmesi ve takım tasarımıyla desteklenen YBS sistemlerinin, titanyum alaşımlarında yalnızca işlenebilirlik açısından değil, aynı zamanda çevresel ayak izi ve maliyet azaltımı yönünden de sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur (Lakner, Splettstoesser, Schraknepper ve Bergs, 2021).

Cica ve Kramar, Inconel 718 süper alaşımının boyuna tornalanmasında, yüksek basınçlı soğutma uygulamasının işlenebilirlik, karbon emisyonu ve üretim maliyeti üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Deneylerde, PVD TiAlN kaplamalı karbür uçlar ve 2 mm kesme derinliği, 0,25 mm/dev ilerleme, 55 m/dak kesme hızı kullanılmıştır. Soğutma sıvısı olarak %5 konsantrasyonda sebze yağı bazlı emülsiyon tercih edilmiş, YBS uygulamasında 50 MPa basınç ve 0,8 l/dak debi, geleneksel sistemde ise 0,4 MPa ve 6 l/dak değerleri uygulanmıştır. Nozul, talaş yüzeyine 5° açıyla ve 22 mm mesafeden yönlendirilmiştir. Karbon emisyonu analizinde, yüksek kesme hızlarında YBS'nin daha düşük toplam emisyon sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, daha az takım değişimi ve daha kısa işleme süresi ile ilişkilendirilmiştir. Örneğin, 90 m/dak kesme hızında YBS kullanımıyla toplam karbon emisyonu ciddi şekilde düşerken, parça başı üretim maliyeti de %52,7 oranında azalmıştır. Ayrıca, takım ve tezgâh maliyetlerinin toplam maliyetin %98'ini oluşturduğu, enerji ve sıvı tüketiminin daha küçük paylara sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu sonuçlar, YBS uygulamasının yalnızca işlenebilirliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda

çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından da önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur (Cica ve Kramar, 2023).

Sharma ve arkadaşları, torna işlemlerinde verimliliği artırmak amacıyla kullanılan farklı soğutma tekniklerinin performansını incelemişlerdir. Çalışmada, Minimum Miktarda Yağlama, Yüksek Basınçlı Soğutma, Kriyojenik Soğutma, katı soğutucular/yağlayıcılar ve Basınçlı Hava Soğutma (azot, karbondioksit, oksijen) yöntemleri karşılaştırılmıştır. Deneyleri AISI 1045, Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemeleri üzerinde test etmişlerdir. Çalışmada CBN ve seramik takımlar, kaplamalı karbür uçlar, katı yağlayıcılar ile desteklenen kesici uçlar kullanmışlardır. Bulgular, YBS'nin talaş kırılmasını iyileştirerek takım aşınmasını azalttığını ve yüzey kalitesini artırdığını göstermektedir. Kriyojenik soğutma ise özellikle zor işlenebilen malzemelerde takım ömrünü 4 kata kadar uzatmıştır. Ayrıca, MMY yönteminin çevre dostu bir alternatif olarak öne çıktığı ve minimum yağ kullanımıyla üretim maliyetlerini azalttığı vurgulanmıştır. Bu çalışma, sürdürülebilir ve verimli talaşlı imalat süreçlerine önemli katkılar sunmaktadır. Yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutma ile takım ömründe %70'e kadar artış gözlemlenmiştir. Kriyojenik soğutma ve MMY yöntemi, yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azaltmıştır. YBS yöntemi, talaş yönetimini kolaylaştırmış ve üretkenliği artırmıştır. Tüm soğutma yöntemleri, kuru işleme kıyasla kesme kuvvetlerinde düşüş sağlamıştır. Kaplamalı karbür takımlar kullanılarak AISI 1045 çeliğinin son işleme sürecinde, YBS, kuru kesme ve geleneksel düşük basınçlı sıvı uygulamaları altında takım aşınması incelenmiştir. En uzun takım ömrü, soğutma sıvısının yüksek basınç ve yüksek debiyle takım-talaş ara yüzeyine ve takım-iş parçası ara yüzeylerine aynı anda uygulanması veya yalnızca takım-iş parçası yüzeyine yüksek basınç ve düşük debiyle uygulanması durumunda elde edildiği vurgulanmıştır (Sharma, Dogra ve Suri, 2009).

Sonuç olarak, YBS tekniklerinin, özellikle işlenmesi zor süper alaşımlar ve titanyum bazlı malzemelerde takım ömrünü uzatma, talaş kırılabilirliğini artırma, yüzey kalitesini iyileştirme ve kesme kuvvetlerini azaltma açısından oldukça etkili olduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konulmuştur. Soğutma sıvısının yüksek basınçla kesme bölgesine etkin bir şekilde iletilmesi sayesinde, takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünme ve ısıl etkiler minimuma indirilmekte, bu da daha kararlı bir işleme süreci sağlamaktadır. Literatürdeki bulgular, YBS'nin sürdürülebilir ve yüksek performanslı bir soğutma alternatifi olarak geleneksel yöntemlerin yerini alma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

2.4. Literatür Değerlendirmesi

Literatürde alüminyum alaşımlarının talaşlı imalattaki işlenebilirliğine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle 7075 gibi yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, savunma, havacılık ve otomotiv sanayiinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Bu nedenle işleme performanslarının optimize edilmesi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Delik delme işlemi, üretim hattında en sık uygulanan operasyonlardan biri olmasına rağmen, bu malzeme grubunda kesme bölgesinde oluşan ısıl yük ve takım-yüzey etkileşimi gibi nedenlerle yüzey kalitesi ve takım ömrü açısından çeşitli zorluklar barındırmaktadır.

Delik delme işlemlerinde takım aşınmasını azaltmak, talaş tahliyesini kolaylaştırmak ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla kesme parametreleri üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda ilerleme miktarı, kesme hızı ve matkap geometrisi gibi değişkenlerin etkileri detaylı biçimde incelenmiş; bununla birlikte, soğutma ve yağlama yöntemlerinin seçimi de işleme kalitesini doğrudan etkileyen temel faktörlerden biri olarak öne çıkmıştır. Özellikle minimum miktarda yağlama, kuru kesme, kriyojenik soğutma ve nano katkılı akışkanlar gibi çevre dostu yaklaşımlar üzerine çok sayıda deneysel çalışma mevcuttur. Bu uygulamaların çoğu, çelikler ve titanyum alaşımları gibi zor işlenebilir malzemelere odaklanırken, alüminyum alaşımlarında sınırlı sayıda karşılaştırmalı analiz bulunmaktadır.

Yüksek basınçlı soğutma (YBS) sistemi, kesme bölgesine yüksek basınç altında sıvı iletimi sağlayarak özellikle talaş tahliyesini iyileştirme ve sıcaklık kontrolü sağlama açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Literatürde YBS uygulamalarının titanyum ve Inconel gibi yüksek sıcaklıkta mukavemetini koruyan alaşımlarda olumlu etkileri raporlanmıştır. Ancak, alüminyum alaşımları için YBS destekli delik delme uygulamaları henüz yeterince araştırılmamış ve sistematik analizler yapılmamıştır. Bu eksikliğin önemli nedenlerinden biri, alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği ve düşük sertliği nedeniyle klasik soğutma sistemleriyle çalışılabilirliğinin genellikle yeterli kabul edilmesidir. Ancak bu varsayım, işlem sürecinde sıvanma, talaş yapışması ve düzensiz yüzey geometrilerinin önüne geçilmesini tam olarak sağlayamamaktadır.

Delik delme sürecinde takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklanan sıvanma, yüzeyde yapışma ve kesici uçta plastik deformasyon gibi olumsuz etkilerin azaltılması,

doğrudan kesme bölgesindeki sıcaklığın kontrolüyle ilişkilidir. Alüminyum alaşımlarında özellikle düşük sertlik ve yüksek ısıl iletkenlik, sıvı metalin takım yüzeyine yapışmasını kolaylaştırmakta, bu da hem takım ömrünü kısaltmakta hem de delik geometrisinde istenmeyen sapmalara neden olmaktadır. Bu kapsamda, yüksek basınç altında uygulanan soğutma sıvısının, kesme bölgesine daha etkin nüfuz ederek birikmiş talaşı uzaklaştırması, sıvı metalin takım yüzeyine yapışmasını engellemesi ve kesme sıcaklığını kontrol altında tutması beklenmektedir. Bu nedenle, yüksek basınçlı soğutma uygulamasının alüminyum alaşımlarındaki etkilerinin ortaya konması, sadece yüzey kalitesi ve takım aşınması açısından değil; aynı zamanda BUE etkisinin ve kesme sıvısının kullanımının azaltılması ile çevresel sürdürülebilirliğin değerlendirilmesi açısından da önemli bir katkı sağlayacaktır.

Literatürde bu alandaki boşluk dikkate alındığında, bu çalışma Al 7075-T6 alüminyum alaşımında farklı kesme parametreleri ve soğutma basınçlarının karşılaştırmalı etkilerini inceleyerek özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Literatür araştırmaları değerlendirildiğinde, YBS yöntemine ilişkin çalışmaların sınırlı sayıda olduğu, mevcut çalışmaların ise daha çok tornalama ve frezeleme işlemleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle delik delme operasyonlarında YBS'nin etkilerini sistematik biçimde ortaya koyan çalışmaların eksikliği dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, yapılan deneysel çalışma; delik kalitesi, kesme kuvvetleri, moment ve takım aşınması gibi parametreler üzerinden YBS'nin performansını değerlendirmeyi amaçlamakta ve bu alandaki boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR TALAŞLI İMALAT

Sürdürülebilir imalat veya üretim, hammadde işlemeden nihai ürünün tedarikine kadar olan süreçte, sürdürülebilirliği destekleyen yeşil veya çevre dostu teknikleri içerir. Şekil 3.1.'de de görüldüğü gibi malzeme araştırmasından işlenmesine, üretimden kaliteye ve tedarik zincirine kadar olan tüm aşamalarda güvenli, yeşil ve temiz yani sürdürülebilir stratejilere büyük önem verilmektedir (Pusavec, Krajnik ve Kopac, 2010: Haapala, Zhao ve Camelio, 2013).



Şekil 3.1. Sürdürülebilir imalat yaklaşımının döngüsel yapısı (URL-1)

Sürdürülebilir imalat, Endüstri 4.0 dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Günümüzde araştırma ve geliştirme aşamasında olan yeşil imalat tekniklerinin, özellikle yeşil talaşlı imalat uygulamalarının yakın gelecekte üretim endüstrilerinde yaygın şekilde kullanılmaya başlanması beklenmektedir (Grupta, 2020).

İleri üretim uygulamaları göz önüne alındığında, en önemli üretim faaliyetlerinden biri olan talaşlı imalat, sürdürülebilir kalkınma potansiyeline sahip birçok faktörü içermektedir. Bu sürdürülebilirlik faktörleri arasında; soğutma ve yağlama sıvılarının kullanımı, takım ömrü, atıkların bertarafı, talaş geri dönüşümü ve enerji tüketimi gibi unsurlar yer almaktadır (Günay ve Yücel, 2013).

Sürdürülebilir imalat araştırmaları için en uygun konulardan biri, talaşlı imalat sırasında kullanılan soğutma ve yağlama sıvılarıdır, çünkü bu alanda yapılan ilerlemeler hem

ekonomik hem çevresel, hem de sağlık açısından olumlu etkiler sağlayabilir (Najiha, Rahman ve Yusoff, 2016). Sürdürülebilir imalatın temel karakteristik özellikleri Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Sürdürülebilir talaşlı imalatın temel karakteristikleri (Ghosh ve Rao, 2015)

Metal işleme, endüstride en yaygın kullanılan uygulamalardan biri olup, sürdürülebilir imalat yaklaşımına uygun bir alandır (Abdalla ve Patel, 2006). Talaşlı imalat sürecinde, kesici takım ile iş parçası arasında göreli bir hareket meydana gelir ve kesme bölgesinde sürtünmeye bağlı olarak yüksek sıcaklık oluşur. Bu sürtünmeyi kontrol altına almak, kesme sıcaklığını azaltmak, iş parçası ile takım arasındaki yapışmayı önlemek ve talaşları uzaklaştırmak amacıyla kesme sıvıları kullanılır (Sivarajan ve Padmanabhan, 2014). Bu konvansiyonel sıvıların çoğu, sürdürülebilir olmayan ham petrol türevlerinden elde edilmektedir (Pusavec ve ark., 2010a). Dünyada yıllık yaklaşık 640 milyon galon metal işleme sıvısı tüketildiği tahmin edilmektedir (Brockhoff ve Walter, 1998). Avrupa Birliği'ndeki yıllık tüketim yaklaşık 320.000 ton olup, bunun %66'sı kullanım sonrası bertaraf edilmektedir (Abdalla, Baines, McIntyre ve Slade, 2007).

Bu sıvıların yoğun kullanımıyla ilişkili olarak; bakım, depolama ve bertaraf maliyetleri ile birlikte ortaya çıkan meslek hastalıkları, en önemli olumsuzluklardandır. Kesme sıvısının depolanması ve bertaraf edilmesi maliyeti, toplam işleme maliyetinin iki katına kadar çıkabilmektedir (Marksberry, 2007). Yayınlanan veriler, meslek kaynaklı cilt hastalıklarının %80'inin kesme sıvılarından kaynaklandığını göstermektedir (Lawal, Choudhury ve Nukman, 2012). Hannu ve diğerlerinin (2013) çalışması, metal kesme sıvılarının işçilerde

solunum yolu ve cilt hastalıklarına neden olduğunu ortaya koymuştur. ABD Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü, 1 milyondan fazla çalışanın bu sıvıların toksik etkilerine maruz kaldığını bildirmiştir. Bu sıvıların yüksek yoğunlukta kullanımı, bronşit ve cilt bozuklukları gibi hastalıkların potansiyel sebebi olarak belirtilmiştir (Marksberry, 2007). Dolayısıyla, maliyet ve sağlık açısından, metal işleme sıvılarının kullanımının ortadan kaldırılması ya da önemli ölçüde azaltılması büyük önem taşımaktadır.

Araştırmacılar tarafından, talaşlı imalat sistemlerinde uygulanan sürdürülebilir imalat teknikleri üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Kesme sıvılarının çevresel etkilerinin azaltılması, metal imalatında sürdürülebilirliğin artırılması açısından temel öncelik hâline gelmiştir (Skerlos, Hayes, Clarens ve Zhao, 2008). Yapılan araştırmalara göre, geleneksel soğutma sıvılarının kullanımından vazgeçilerek ya da sıvı kullanımını azaltacak yollara başvurularak, yeni soğutma ve yağlama araştırmaları başlamıştır. Bunlar arasında; minimum miktarda yağlama destekli işleme, kuru kesme, kriyojenik soğutmalı işleme, yüksek basınç ile işleme, sürdürülebilir takım kaplamaları ve işlemleri ile enerji ve kaynak verimliliği yüksek işleme yöntemleri yer almaktadır (Davim, 2017; Gracia-Martinez, Miguel, Martinez-Martinez, Manjabacas ve Coello, 2019).

Kuru kesme işlemi, kesme sıvılarının (soğutucu/yağlayıcı) tamamen ortadan kaldırılması sayesinde çevreye zarar veren etkilerinin büyük ölçüde azaldığı bir yeşil işleme yöntemidir (Goindi, 2017). Yağlayıcı kullanılmadan yapılan işlemler, çevresel etkileri ve işleme maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Dixit, Sarma ve Davim (2012), kuru talaşlı imalatın çevre dostu bir teknik olduğunu ve hava ile su kirliliğine neden olmadığını belirtmişlerdir. Çevre dostu teknik, Obi'ye (2013) göre, "zararlı atık ve deşarjları azaltmaya yardımcı olan teknik" olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım doğrultusunda, kuru işleme, kesme sıvısı kullanılmadan gerçekleştirilebildiği için, geleneksel ıslak işleme yöntemlerine kıyasla daha sürdürülebilir bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Schultheiss, Zhou, Gröntoft ve Ståhl, 2013). Ayrıca, kuru işleme yöntemi ile oluşan talaşların geri dönüşüm amacıyla toplanması daha kolaydır. Kuru işleme, işletmelerin çevre dostu bir imaj oluşturmasına, soğutucu maliyetlerinin azaltılmasına ve çalışanlar arasında iş tatmininin artmasına katkı sağlayabilir.

Elbette, kuru işleme yöntemlerinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Kuru kesme işleminin en önemli dezavantajı, bazı takım ve iş parçası malzemesi kombinasyonlarında

takımın talaş yüzeyi ile talaş arasında güçlü bir yapışma oluşabilmesidir (Chetan, Narasimhulu, Ghosh ve Rao, 2014; Rotella, Dillon, Umbrello, Settineri ve Jawahir, 2014). Kuru kesme sırasında sıcaklık ve gerilmenin artması, takım ömrünü önemli ölçüde azaltabilir (Zhao, Barber ve Zou, 2002). İş parçası malzemesinin kesici takım yüzeyine yapışmasıyla oluşan yapışma aşınması, plastik deformasyon ve difüzyon aşınması gibi aşınma türleri termal nedenli aşınma mekanizmalarıdır. Öte yandan; aşındırma, çatlama ve kırılma gibi aşınmalar, gerilme kaynaklı olarak kuru işleme sürecinde gözlemlenir (Sharma ve diğerleri, 2009). Hasar görmüş veya aşınmış bir takım, yalnızca malzeme kaldırma oranını (MRR) düşürmekle kalmaz, aynı zamanda işlenen parçanın yüzey bütünlüğünü de olumsuz etkiler (Sharma ve Sidhu, 2014). Tüm bu olumsuz etkiler göz önüne alındığında, talaşlı imalat alanında kuru işleme yöntemine ek olarak başka sürdürülebilir imalat tekniklerine duyulan ihtiyaç kaçınılmazdır.

Özellikle yüksek hızda işlemeli delme işlemlerinde, yüksek kesme hızları, ilerleme oranları nedeniyle kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Bu yüksek sıcaklıklar, ürünün boyutsal doğruluğunu düşürür, takım ömrünü kısaltır ve yüzey bütünlüğünü bozar. Aynı zamanda, yüksek sıcaklıklar takım aşınmasını hızlandırır ve plastik deformasyon, termal çatlama gibi sorunlara yol açarak takımın erken arızalanmasına neden olur. Bu nedenle, bu yüksek sıcaklığı azaltmak için YBS yöntemi, hem ısıyı uzaklaştıran hem de yağlama sağlayan bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Düşük basınçlı kesme sıvısı kullanıldığında, yüksek sıcaklık nedeniyle bu sıvı buharlaşır ve takım-talaş-iş parçası ile temas ettiğinde bir bariyer (film) oluşturur. Bu durum, kesme sıvısının takım-talaş arayüzüne veya kesme bölgesine ulaşmasını engeller. YBS işleme sırasında, soğutma sıvısı yüksek basınçla uygulanır. Yüksek basınç sayesinde soğutma sıvısı, buhar bariyerini kırar ve kesme bölgesine kolayca nüfuz eder. YBS, özellikle yüksek üretim yapan sanayilerde, ürün kalitesi ve boyutsal doğruluğun kabul edilebilir sınırlar içinde olması gerektiğinde ve işlenmesi zor malzemelerin işlendiği durumlarda kullanılır (Satyanara ve diğerleri, 2017). Bu prensipler, işleme sürecinin verimliliğini artırmanın yanı sıra çevre endişelerine de katkıda bulunmaktadır (Kramar ve Kopac, 2009). Kesme bölgesindeki sıcaklığın azalması ve daha verimli talaş tahliyesinin birlikte sağlanması, takım ömrünü uzatmakta ve kesici takımın aşırı sıcaklık veya talaş kaynaklı hasarlar yerine doğal aşınma süreci sonucunda işlevini kaybetmesine katkı sağlamaktadır. Bu, işleme sürecinin verimliliğini ve kaliteyi artırmaktadır (Li, 1996). Bu prensipler, işleme sürecinin verimliliğini artırmanın yanı sıra çevre endişelerine de katkıda bulunmaktadır (Kramar ve Kopac, 2009).

Werthem ve Rotberg bir çalışmalarında yüksek basınçlı soğutma enjeksiyon tekniğinin, sadece kesme kuvvetlerinde ve sıcaklıkta azalma sağlamakla kalmadığını, aynı zamanda kesme sıvısı tüketimini de %50 oranında azalttığını belirtmişlerdir (Werthem ve Rotberg, 1992). Cica ve Kramar'ın ise çalışmalarında YBS destekli işlemenin, daha yüksek kesme hızlarında toplam karbon emisyonlarının azaltılmasını mümkün kıldığı için daha avantajlı olduğunu ortaya konmuştur. Buna ek olarak, her iki kesme ortamı için ekonomik analiz de yapılmış ve özellikle yüksek kesme hızlarında, YBS koşullarında toplam işleme maliyetinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular; işlenebilirlik, çevresel etkiler ve ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, YBS destekli işlemenin daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur (Cica ve Kramar, 2023).

4. SOĞUTMA YÖNTEMLERİ

Talaşlı imalat işlemlerinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın etkin bir şekilde kontrol altına alınması hem proses verimliliği hem de takım ve parça ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda geliştirilen soğutma ve yağlama stratejileri, üretim süreçlerinin performansını ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Soğutma yöntemlerinin seçimi; işlenen malzemenin türü, takım geometrisi, kesme parametreleri ve yüzey kalitesi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu bölümde, Şekil 4.1.'de görülen talaşlı imalat uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çeşitli soğutma yöntemleri; teknolojik gelişmeler, çevresel etkiler ve ekonomik boyutlar çerçevesinde sistematik olarak incelenecektir.



Şekil 4.1. Talaşlı imalatta kullanılan soğutma yöntemleri (Jawahir ve diğerleri, 2016; Uçak ve Çiçek, 2017)

Geleneksel talaşlı imalat süreçlerinde kesme sıvıları, kesme sırasında takım sıcaklığını düşürerek ve takım, talaş ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak takım ömrünü uzatmak amacıyla kullanılmaktadır. Kesme sıvısının yağlama işlevi, kesme kuvvetlerini azaltırken, talaş ile takım arasındaki yapışmayı ve kaynak benzeri sıkışmayı engellemeye yardımcı olur. Ayrıca, kesme bölgesinden talaşları uzaklaştırarak talaş dolaşıklığını ve takım ile iş parçası yüzey kalitesine zarar verebilecek yeniden kesme (re-cutting) etkisini azaltır. Ancak, kesme sıvıları çevre kirliliğine neden olabilen maddeler olup aynı zamanda sağlık açısından da risk oluşturmaktadır (Hong ve Broomer, 2000).

Minimum Miktarda Yağlama, geleneksel yoğun soğutmanın yerine geçebilecek potansiyel bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. MMY, küçük miktarda yağlayıcı uygulayarak geleneksel soğutmaya kıyasla daha çevre dostu bir seçenek sunar. Soğutma sıvısı kullanımının azaltılması, atık oluşumunu düşürmekle kalmaz, aynı zamanda işleme

sürecinin çevresel sürdürülebilirliğini de artırır. Ayrıca yapılan çalışmalar, MMY'nin kesme sıcaklıklarını, kesme kuvvetlerini ve takım aşınmasını azaltarak işleme verimliliğini artırabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, MMY ve diğer sürdürülebilir yağlama teknolojilerinin araştırılması, geleneksel soğutma yöntemlerinin olumsuz yönlerinin üstesinden gelmek için büyük önem taşımaktadır (Makhesana ve diğerleri, 2024).

Kriyojenik soğutma, -150 °C'nin altındaki çok düşük sıcaklıklarda bulunan malzeme veya ortamların kullanılmasıdır (Yildiz ve Nalbant, 2008). Kriyojenik soğutmada en yaygın kullanılan iki ortam, sıvı azot ve donmuş karbondioksittir. Sıvı azotla yapılan soğutma, kesme hızının artırılmasına, verimliliğin yükselmesine ve takım ömrünün uzamasına olanak tanır. Ayrıca, sera etkisi yaratmayan ve toksik olmayan yapısıyla çevre dostu bir soğutma ortamıdır (Anton, Andreas ve Friedrich, 2015).

Son yıllarda talaşlı imalatta hem soğutma hem de yağlama etkisini aynı anda sağlayan hibrit sistemler, özellikle zor işlenebilir malzemelerin işlenmesinde dikkat çekici avantajlar sunmaktadır. Bu sistemler arasında öne çıkan CryoMQL uygulamaları, sıvı karbondioksit (LCO_2) veya sıvı azot (LN_2) gibi kriyojenik akışkanların MMY ile birlikte kesme bölgesine yönlendirilmesi esasına dayanmaktadır (Pereira ve diğerleri, 2020). Bu yöntem hem ısıl kontrolü hem de sürtünme azaltımını aynı anda sağlayarak takım aşınmasını azaltmakta ve işlem kalitesini artırmaktadır.

4.1. Yüksek Basınçlı Soğutma Yöntemi (YBS)

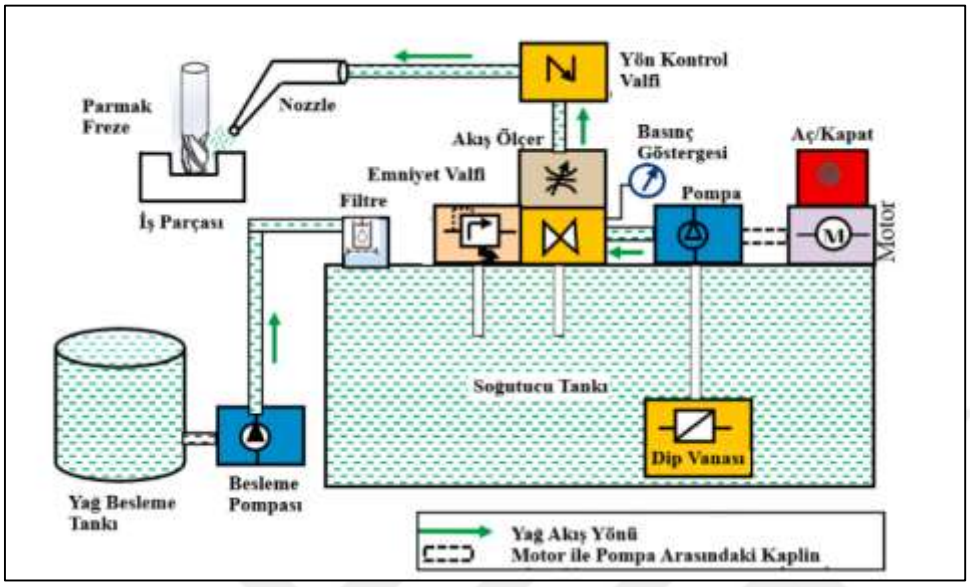
Yüksek hızlı işleme, üretkenliği artırmak için üretim teknolojilerinde gereklidir. Ancak, yüksek hızlı işleme yüksek sıcaklıklarla ilişkilidir ve bu sıcaklık çeşitli sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle, bu yüksek sıcaklığı azaltmak için YBS yöntemi, hem ısıyı uzaklaştıran hem de yağlama sağlayan bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Düşük basınçlı kesme sıvısı kullanıldığında, yüksek sıcaklık nedeniyle bu sıvı buharlaşır ve takım-talaş-iş parçası ile temas ettiğinde bir bariyer (film) oluşturur. Bu durum, kesme sıvısının takım-talaş arayüzüne veya kesme bölgesine ulaşmasını engeller. YBS ile işleme sırasında, soğutma sıvısı yüksek basınçla uygulanır. Yüksek basınç sayesinde soğutma sıvısı, buhar bariyerini kırar ve kesme bölgesine kolayca nüfuz eder. YBS, özellikle yüksek üretim yapan sanayilerde, ürün kalitesi ve boyutsal doğruluğun kabul edilebilir sınırlar içinde olması

gerektiğinde ve işlenmesi zor malzemelerin işlendiği durumlarda kullanılır (Satyanara ve diğerleri, 2017).

Yüksek basınçlı sistem uygulaması, kesme bölgesinden ısı uzaklaştırma oranını artırmak amacıyla kullanılır; çünkü kesme hızı ve güç arttıkça ısı oluşumu önemli bir faktör haline gelir (Debnath ve diğerleri, 2014). Geleneksel soğutmaya kıyasla, YBS'nin fikri, kesme bölgesine yüksek basınçlı bir emülsiyon jeti enjekte etmektir. Yüksek basınçlarla soğutma, akışkan jetinin basıncına ve akış hızına bağlı olarak daha yüksek üretkenlik sağlamak, kesme bölgesindeki sıcaklığı azaltmak ve talaş kontrolünü iyileştirmek için etkili bir yöntemdir (Kramar ve Kopac, 2009). Azaltılmış ısı ve daha verimli talaş tahliyesi kombinasyonu, takım ömrünü uzatır ve kesici takım aşırı ısı veya talaş hasarı nedeniyle erken arızalanmak yerine doğal aşınma süreciyle işlevini kaybeder. Bu, işleme sürecinin verimliliğini ve kalitesini artırmaktadır (Li, 1996).

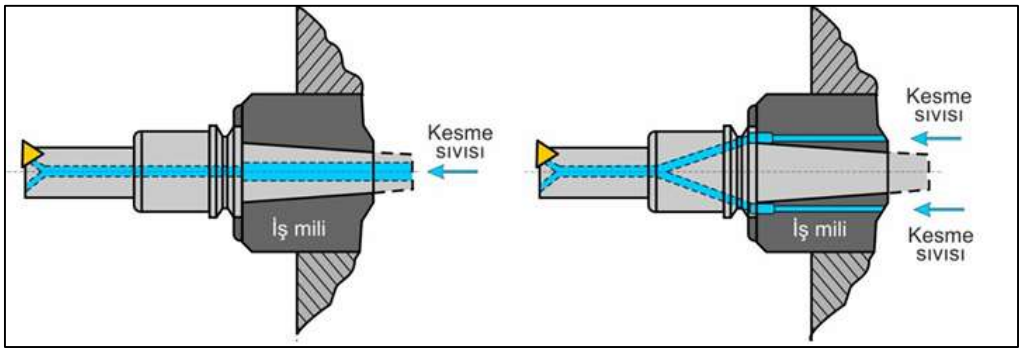
Bu prensipler, işleme sürecinin verimliliğini artırmanın yanı sıra çevre endişelerine de katkıda bulunmaktadır (Kramar ve Kopac, 2009). Werthem ve Rotberg bir çalışmalarında yüksek basınçlı soğutma enjeksiyon tekniğinin, sadece kesme kuvvetlerinde ve sıcaklıkta azalma sağlamakla kalmadığını, aynı zamanda kesme sıvısı tüketimini de %50 oranında azalttığını belirtmişlerdir (Werthem ve Rotberg, 1992). Cica ve Kramar'ın ise çalışmalarında YBS destekli işlemenin, daha yüksek kesme hızlarında toplam karbon emisyonlarının azaltılmasını mümkün kıldığı için daha avantajlı olduğunu ortaya konmuştur. Buna ek olarak, her iki kesme ortamı için ekonomik analiz de yapılmış ve özellikle yüksek kesme hızlarında, YBS koşullarında toplam işleme maliyetinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular; işlenebilirlik, çevresel etkiler ve ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, YBS destekli işlemenin daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur (Cica ve Kramar, 2023). Şekil 4.2.'de, geleneksel harici nozullu yüksek basınçlı soğutma (YBS) sistemine ait şematik diyagram sunulmaktadır. Bu sistemde, soğutucu sıvı, bir besleme pompası aracılığıyla soğutucu sıvı tankından alınarak, sisteme belirli bir basınç aralığında iletilmektedir. Pompa çıkışına entegre edilmiş basınç göstergesi (manometre) sayesinde, sistemdeki basınç seviyesi sürekli olarak izlenebilir. Akış yönü, yön kontrol valfi kullanılarak ayarlanmakta ve soğutucu, kesme bölgesine doğru yönlendirilmektedir. Bu kurulumda kullanılan nozul, takım ve iş parçası dışından (harici) yerleştirilmiştir. Nozul, kesici takımın talaş yüzeyine veya yan yüzeyine doğrudan yöneltilerek, soğutucu akışkanın

takım-talaş-iş parçası arayüzüne yüksek basınçla nüfuz edilmesi sağlanmaktadır (Sultana ve Dhar, 2023).



Şekil 4.2. Geleneksel harici nozullu YBS kurulumunun şematik diyagramı (Sultana ve Dhar, 2023)

Yüksek Basınçlı Soğutma Yöntemi takım dışından uygulanabildiği gibi takım içinden de uygulanabilmektedir. Takım içinden soğutma, özellikle delik delme operasyonlarında kesme bölgesine doğrudan ulaşmayı sağlayan en etkili yöntemlerden biridir. Matkap gövdesine açılan kanallar aracılığıyla yüksek basınçlı kesme sıvısı, doğrudan kesici uç bölgesine iletilir. Bu sayede takım ucunda oluşan sıcaklık hızla düşürülür, sürtünmeden kaynaklanan ısınma azaltılır ve kesici kenarların yağlanması sağlanır. Ayrıca talaşların daha kolay kırılarak kanallardan dışarı atılması mümkün olur. Bu yöntem, özellikle derin delik delme, ısıl iletkenliği düşük malzemelerin işlenmesi ve arka arkaya yapılan operasyonlarda takım ömrünün korunması açısından kritik avantajlar sunar. Literatürde yapılan çalışmalar, içten soğutmalı matkapların kullanıldığı delme işlemlerinde hem delik yüzey kalitesinin arttığını hem de takım ömrünün belirgin ölçüde uzadığını göstermektedir. Şekil 4.3.'de içten soğutma uygulamasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3. Takım içinden soğutma (Çakır, 2015).

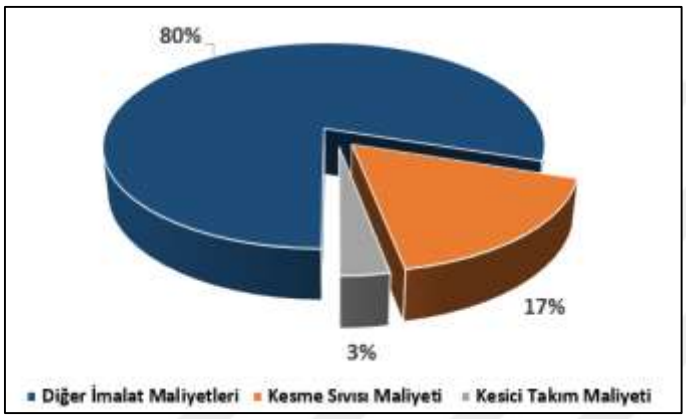
4.2. Kesme Sıvıları

Talaş kaldırma işlemlerinde, operasyonun etkinliği ve sürdürülebilirliği açısından soğutma ve yağlama uygulamaları önemli bir yer tutmaktadır. Bu amaçla kullanılan kesme sıvıları; kesme bölgesinde oluşan aşırı ısının hızlı bir şekilde uzaklaştırılması ve temas yüzeylerinde sürtünmenin azaltılması gibi temel görevleri yerine getirir. Soğutma, özellikle kesici takımın aşırı ısınmasını önleyerek takım ömrünü uzatırken; yağlama, takım ile talaş ve iş parçası arasındaki temas yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak yüzey kalitesini iyileştirir. Bununla birlikte, kesme sıvıları talaşların daha kolay tahliyesine yardımcı olur, yapışkan talaş oluşumunu önler, iş parçasında korozyon riskini azaltır ve genel işleme kalitesini artırır. Bu etkilerin en üst düzeyde sağlanabilmesi için, kesme sıvısının uygun yöntemlerle ve doğru miktarda kesme bölgesine iletilmesi gerekmektedir. Kesme sıvılarının etkin kullanımı hem üretim performansını hem de çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği olumlu yönde etkilemektedir (Yılmaz, 2022). Şekil 4.4'te soğutma sıvılarının dıştan geleneksel soğutma uygulamasında kullanımının görseli verilmiştir.



Şekil 4.4. Talaşlı imalatta kesme sıvısı uygulaması (URL-2)

Yapılan çalışmalar, talaşlı imalat süreçlerinde Şekil 4.5.'te gösterildiği gibi kesme sıvılarının maliyetinin toplam üretim giderlerinin yaklaşık %7-17'sini oluşturduğunu göstermektedir. Buna karşılık, kesici takım maliyetleri %3-4 seviyelerinde kalmaktadır. Bu durum, üretim ekonomisi açısından kesme sıvılarının toplam maliyetler içerisindeki kritik önemini açıkça ortaya koymaktadır (Çakır, Kavak ve Şeker, 2017). Soğutma sıvılarının doğru seçilmesi ve kullanılması, üretim maliyetlerini önemli ölçüde düşürebilir. Yüksek performanslı soğutma sıvıları, daha yüksek kesme hızlarına ve ilerleme oranlarına izin vererek üretkenliği artırır ve takım ömrünü uzatır (Astakhov, 2001).



Şekil 4.5. Kesme sıvılarının maliyet analizi (Çakır ve diğerleri, 2017)

Kesme sıvıları, metal işleme süreçlerinde kritik bir rol oynar ve atölye verimliliği, takım ömrü ve işlenmiş parçanın kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak, kullanım süreleri göz önüne alındığında, kesme sıvılarının kalite üzerindeki etkisi zamanla azalır ve genellikle verimliliklerini kaybettiklerinde bertaraf edilmek zorunda kalırlar. Kesme sıvıları hakkında bilgi sahibi olmak, olası tehlikeleri ve bakım gereksinimlerini anlamak, iş yerinde güvenliği artırırken sıvı kullanım maliyetlerini de azaltacaktır.

En verimli kesme sıvıları şu temel işlevleri yerine getirir:

- Yüksek sıcaklıklarda takımın sertliğini korur.
- Metal partiküllerini temizleyerek işleme bölgesini temiz tutar.
- Mikrop oluşumunu önler.
- Kesme kenarını yağlayarak takım ömrünü uzatır.
- Takımın paslanmasını ve korozyona uğramasını engeller.

- İşlenmiş parçanın ölçü doğruluğunu artırır.

Bu nedenle, kesme sıvılarının uygun şekilde kullanımı, metal işleme sürecinin verimliliğini artırırken aynı zamanda üretim maliyetlerini de düşürmektedir (Ravi, Gurusamy ve Mohanavel, 2021).

Etkili bir kesme sıvısının sahip olması gereken özellikleri ise şöyledir:

- Yüksek ısı iletkenliği sayesinde etkili soğutma sağlamalıdır.
- İyi yağlama özelliklerine sahip olmalıdır.
- Yüksek parlama noktasına sahip olmalı ve yangın riski oluşturmamalıdır.
- Çalışma sıcaklıklarında yapışkan veya katı çökeltiler oluşturmamalıdır.
- Oksidasyona karşı stabil olmalıdır (bozulmamalıdır).
- İşlenen malzemede korozyona veya deformasyona neden olmamalıdır.
- Yeni oluşan yüzeylere karşı korozyon koruması sağlamalıdır. Kesme sıvısı, işleme sırasında açığa çıkan taze yüzeylerin oksitlenmesini veya paslanmasını önlemelidir.
- Yağlayıcı bileşenleri kolayca bozulmamalıdır. Kesme sıvısının zamanla bozulup kötü kokular veya istenmeyen kimyasal değişiklikler oluşturması engellenmelidir.
- Sürekli kullanımdan dolayı kötü koku oluşmamalıdır. İş ortamında rahatsız edici kokuların oluşmaması için kimyasal stabilitesi yüksek olmalıdır.
- Cilt tahrişine veya kontaminasyona neden olmamalıdır. Kesme sıvıları, işçiler için güvenli olmalı ve uzun süreli temas halinde sağlık riskleri oluşturmamalıdır.
- Uygun viskoziteye sahip olmalıdır. Kesme sıvısı, işleme bölgesinde kolayca akabilmeli ve talaşlardan damlayarak uzaklaşabilmelidir.

Bu özellikler göz önünde bulundurularak işleme süreçlerinden en iyi sonucu elde etmek için kesme sıvılarının dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir (Mamidi ve Xavior, 2014).

4.2.1. Kesme sıvısı türleri

Kesme sıvıları başlangıçta, makine takımını yağlamak ve soğutmak amacıyla fırçalarla uygulanan basit yağlar olarak kabul edilmiştir. Ancak, kesme işlemleri daha zorlu hale geldikçe, kesme sıvılarının formülasyonları daha karmaşık hale gelmiştir. Kesme sıvıları,

geniş özellik yelpazesi nedeniyle farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Genel olarak, Su bazlı kesme sıvıları, Yağ bazlı kesme sıvıları ve Gaz bazlı kesme sıvıları olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır:

Su bazlı kesme sıvıları: Daha önce de belirtildiği gibi, kesme sıvılarının temel etkilerinden biri, kesme bölgesinde oluşan ısının iletim yoluyla uzaklaştırılmasıdır. Bu nedenle, özellikle soğutma amacıyla kullanılan kesme sıvılarının yüksek termal iletkenliğe ve özgül ısı kapasitesine sahip olması istenir (Baradie, 1996). Bu özellikler açısından değerlendirildiğinde, su hem etkili bir soğutucu olması hem de düşük maliyetli olması nedeniyle en uygun akışkandır. Ancak su, özellikle pahalı takım tezgâhlarında yaygın olarak kullanılan demir esaslı malzemeler için korozif bir özelliğe sahiptir (Ashaktov, 2006). Ayrıca, suyun yağlama kabiliyeti düşüktür ve makinedeki kayma ve dönme yüzeylerinde kullanılan yağlayıcıları temizleyerek makine aşınmasını artırma eğilimindedir. Bu sorunların önüne geçmek ve su bazlı kesme sıvılarının yağlama özelliklerini iyileştirmek amacıyla suya çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir (Oberg, Jones, Horton ve Ryffel, 2004: 1143–1146).

Su ile karışabilen kesme sıvıları; emülsifiye yağlar, sentetik ve yarı sentetik sıvılar olmak üzere üç gruba ayrılır. Emülsifiye yağlar, mineral yağ içeriğiyle birlikte suya dağılmasını sağlayan emülgatörler içerir (Grzesik, 2008). Bu sıvılar, mineral yağların yağlama ve korozyon önleyici özelliklerini, suyun soğutma etkisiyle birleştirir. Sentetik sıvılar ise mineral yağ içermeyen, suyu yumuşatma, korozyonu önleme, yağlama sağlama, yüzey gerilimini azaltma ve karışımı stabilize etme gibi amaçlarla kullanılan inorganik veya organik kimyasal çözeltiler içeren kesme sıvılarıdır. Sentetik kesme sıvıları (CL'ler), suda çözünebilen sentetik yağlayıcılar, yüksek basınç katkı maddeleri, korozyon inhibitörleri, biyositler, yüzey aktif maddeler ve köpük kesici ajanlar içerir. Bu sıvılar genellikle düşük yağlama özelliğine sahip soğutucular olarak değerlendirilir ve düşük kesme kuvvetlerinin gerektiği işlemlerde tercih edilir. Ancak bu düşük yağlama kapasitesi, sentetik kesme sıvılarının endüstride kullanımını sınırlayan temel dezavantajdır (Baradie, 1996: Ashaktov, 2006). Yarı sentetik kesme sıvıları ise hem mineral yağ hem de kimyasal katkı maddeleri içerir ve hem emülsifiye yağların hem de sentetik sıvıların özelliklerini taşır. Sentetik sıvılara kıyasla daha iyi yağlama sağlarlar ve emülsifiye yağlara kıyasla daha temizdirler ve paslanmaya karşı daha etkilidirler. Su ile karışabilen sıvılarla ilgili temel sorunlardan biri, bu sıvılarda bakteri ve mantarların üremesiyle sıvının kullanım ömrünün azalması ve sağlık

açısından risklerin artmasıdır. Kesme sıvılarındaki bakteri oluşumunu kontrol altına almak için nem tutucular (humectants), mikrop öldürücüler (germicid) ve bakterisit katkı maddeleri kullanılabilir (Baradie, 1996).

Yağ bazlı kesme sıvıları: Yağ bazlı bir yağlayıcı (neat oils olarak da adlandırılır), mineral, hayvansal, bitkisel ve sentetik yağlardan elde edilir. Mineral yağlar (petrol bazlı yağlar), istenilen yağlama özelliklerine sahip olmaları nedeniyle en yaygın kullanılan türdür. Bu kesme sıvıları, uygulama alanlarını genişletmek için bazı katkı maddeleri içerebilir. Örneğin, naftenik mineral yağlar ve parafinik mineral yağların özellikleri, yağlayıcı katkı maddeleri, aşırı basınç (EP) katkıları, koku gidericiler, viskozite düzenleyiciler ve polar katkılar eklenerek geliştirilmektedir (Shokrani, Dhokia ve Newman, 2012).

Düz (straight) yağlar iyi bir yağlama, kilitlenme karşıtı (anti-seizure) özellik ve korozyon koruması sağlarken; yüksek yük ve sıcaklıklarda bu özelliklerini sürdürememekte, duman ve sis (mist) oluşturmaktadır. Bu nedenle düz yağların kullanımı, alüminyum, magnezyum, pirinç, düşük karbonlu çelikler gibi işlenmesi kolay metallerin düşük yoğunluklu talaşlı işleme operasyonları ile sınırlıdır. Buna karşılık, bileşik (compounded) mineral yağlar yüksek kesme basınçları ve sıcaklıkları altında işlenen yüzeyle kimyasal reaksiyona girerek; diş çekme, rayba çekme, diş açma, broşlama gibi düşük hızlı, ağır işleme uygulamaları için uygun hale gelir (Ashaktov, 2006: Baradie, 1996: Oberg ve diğerleri, 2004).

Mineral bazlı yağlayıcılar, takım-talaş arayüzünü yağlamak için kullanılır ve böylece kesme bölgesinde sürtünmeyi ve sürtünmeden kaynaklanan ısıyı en aza indirir. Bunun sonucunda, takımın talaş yüzeyinde (rake face) oluşan krater aşınması azalır. Daha düşük kesme kuvvetleri gerekli hale gelir. Makine takımının hareketli parçalarının yağlanmasında etkili olur. İşlenmiş yüzeyde ve makine takımında korozyonu önlemeye yardımcı olur (Shokrani ve diğerleri, 2012).

Gaz bazlı kesme sıvıları: Gaz bazlı kesme sıvıları (CL'ler), oda sıcaklığında gaz hâlinde bulunan ancak talaşlı imalat uygulamalarında gaz ya da soğutulmuş/basınçlandırılmış akışkan formunda kullanılan maddeleri ifade eder. Başlıca gaz bazlı CL'ler; hava, azot, argon, helyum ve karbondioksittir. Bu gaz bazlı kesme sıvıları, yağlama kapasitelerini artırmak amacıyla genellikle geleneksel kesme sıvılarıyla birlikte sis (mist) veya damlacık formunda kullanılabilir. Gazların soğutucu olarak en bilinen kullanımı kuru kesmedir. Bu

yöntemde, kesici takım ve iş parçasının soğutulması için hava kullanılır. Ancak gazların termal iletkenliği düşüktür ve soğutma kapasiteleri sınırlıdır. Bu nedenle, gaz bazlı CL'lerin soğutma yeteneğini artırmak için gazı sıkıştırma, soğutma ve sıvılaştırma gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Geleneksel soğutma yöntemlerinin talaş–takım ara yüzeyine nüfuz edemediği ağır işleme koşullarında, basınçlı gaz bazlı CL'ler özellikle cazip bir alternatif haline gelmektedir (Baradie, 1996: Shokrani ve diğerleri, 2012).

Ayrıca, az miktarda yağlayıcının eklenmesi kesme sıcaklığını ve kesme kuvvetlerini azaltabilir. Özellikle biyolojik olarak parçalanabilen yağların hava ile birlikte mikro damlacıklar hâlinde püskürtülmesiyle bir çalışmada, düşük karbonlu çeliklerin yüksek hızlı frezelenmesinde takım aşınmasının %44 oranında azaldığı gözlenmiştir. Yağ spreyiyle işleme bölgesinin hedeflenmesi, kesme sıcaklığını ve kuvvetlerini de düşürmektedir (Lo´pez de Lacalle, Angulo, Lamikiz ve Sa´nchez, 2006).

CO_2, argon, azot ve helyum gibi gaz bazlı CL'ler, yüksek kesme sıcaklıklarında kesici takımı ve işlenmiş yüzeyi oksidasyondan koruyacak inert bir ortam oluşturarak da avantaj sağlamaktadır (Shokrani ve diğerleri, 2012).

5. DELİK DELME İŞLEMİ

Savunma ve Havacılık sektöründe, civata veya perçin gibi bağlantı elemanları yapıların montajında çok sık kullanılmaktadır. Bu durum, yüksek gerilme yığılmaları nedeniyle yorulma çatlaklarının başlayabileceği kritik bölgeler olan bağlantı deliklerinin delinmesini gerektirir. Buradaki önemli bir husus, yapının yorulma ömrünün, büyük ölçüde delme işlemine bağlı olan delik yüzey bütünlüğünden etkilenmesidir. Bu nedenle delik delme işleminde, deliğin yüzey bütünlüğü, delik kalitesi, daireselliği gibi konular önem arz etmektedir (Landon ve diğerleri, 2022).

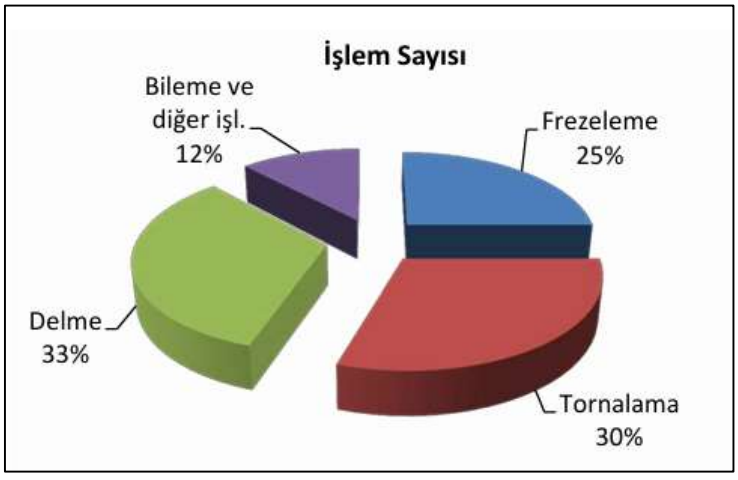
Genel olarak, alüminyum alaşımlarının işlenmesi diğer metallere (örneğin, çelikler ve titanyum) kıyasla nispeten kolaydır; ancak alüminyum alaşımının delinmesi sırasında, alaşımın yüksek sünekliği ve talaşın yapışma eğilimi nedeniyle kesme sırasında, yoğun plastik deformasyon meydana gelmekte ve bu durum büyük çapak oluşumuna neden olmaktadır. Çapak, genellikle şekil sertleşmesi etkisi nedeniyle orijinal malzemeden daha sert olan plastik olarak deforme olmuş iş parçası malzemesidir (Pilný, De Chiffre, Píška ve Villumsen, 2012). Delik giriş ve çıkışında oluşan çapak istenmeyen bir durumdur; çünkü yüzey kalitesi ve parça kenarlarında boyutsal bozulmalar gibi iş parçasının doğruluğunu ve kalitesini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, montaj ve kullanımda da zorluklara yol açabilmektedir (Lastnosti ve Vrtanju, 2012). Bu nedenle, çapakları gidermek için genellikle ikincil bir işlem olan çapak alma uygulanır. Ancak, çapak alma işlemi katma değer yaratmayan, maliyetli ve zaman alıcı bir operasyon olarak değerlendirilmektedir. Yüksek hassasiyet gerektiren parçalar, örneğin uçak motorlarında, çapak alma maliyetleri toplam imalat maliyetlerinin %30'una kadar çıkabilmektedir (Dornfeld ve Min, 2009). Ayrıca, çapak alma işlemleri; çapağın konumu, uzunluğu, kenar sayısı ve boyutu nedeniyle karmaşık olabilmektedir. Bu ikincil finisaj operasyonlarını otomatikleştirmek zordur ve bu nedenle üretim hatlarında darboğaz haline gelebilmektedir. Endüstriyel uygulamalar, parçanın karmaşıklığı ve hassasiyeti arttıkça çapak alma maliyetlerinin de arttığını göstermektedir (Dahnel ve diğerleri, 2022).

Dolayısıyla, delik delme işlemlerinde delik kalitesinin korunması, çapak oluşumunun en aza indirilmesi ve yüzey bütünlüğünün iyileştirilmesi, yalnızca yapısal bütünlük ve ürün güvenilirliği açısından değil, aynı zamanda üretim verimliliği ve maliyetlerin düşürülmesi

bakımından da kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, delme parametrelerinin ve uygulanan soğutma yöntemlerinin süreç performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması, savunma ve havacılık sanayii başta olmak üzere birçok sektörde stratejik bir gereklilik haline gelmiştir.

Takım aşınması, talaş oluşumu ve delik kalitesi, delme işleminin temel parametreleridir ve devir sayısı (n), ilerleme miktarı (f), takım geometrisi, tezgâh kurulumu ve ıslak/kuru işleme gibi kesme koşulları ile çevresel faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenmektedir (Aamir ve diğerleri, 2021).

Delik delme operasyonu, talaşlı imalat süreçleri içerisinde en yaygın uygulanan yöntemlerden biridir ve toplam talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır. Ayrıca, imalat süresinin yaklaşık dörtte biri de bu işlem sırasında harcanmaktadır. Delme işleminin talaşlı imalat içerisindeki yeri Şekil 5.1.'de verilmiştir. Delik delme genellikle üretim zincirinde son aşamalardan biri olarak uygulanmakta ve üretim ekonomisi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Tornalama ve frezeleme ile kıyaslandığında, kinematik ve dinamik özellikler bakımından benzerlik göstermekte, fakat kesme sırasında talaşın kapalı bir bölgede oluşması nedeniyle talaş tahliyesi güçleşmektedir (Yağmur ve diğerleri, 2017). Matkapta meydana gelen talaş kalınlığı, talaşın akış karakterini belirleyen temel faktörlerden biridir. Takım ile iş parçası arasındaki sürtünme kaynaklı ısı birikiminin yeterince uzaklaştırılamaması ve matkabın merkezinde kesme hızının sıfıra yaklaşması, delik delme işleminin en önemli sorunları arasında yer almaktadır (Bayraktar ve diğerleri, 2017).



Şekil 5.1. Delme işleminin talaşlı imalatta yeri (Çakır, 2015)

5.1. Delme İşlemini Etkileyen Parametreler

Delme operasyonlarında temel hareket, takımın ya da iş parçasının gerçekleştirdiği dönme hareketidir. Bu temel hareketi sağlayan mil devri (n), dakikadaki dönüş sayısı ile ifade edilmektedir (Avuncan, 1998 ; Yağmur, 2011; Meral, 2010; Groover, 2021).

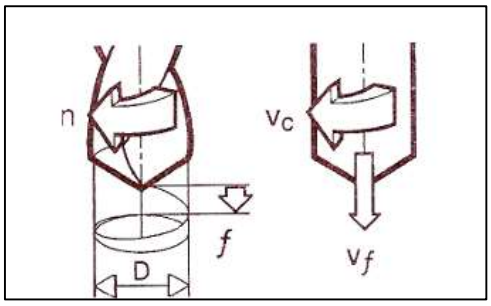
Delme işleminde kesme hızı (Vc), takımın çevresel hızı esas alınarak hesaplanır ve devir sayısı bilindiğinde kolayca bulunabilir. Takım çapı (D) dikkate alındığında, matkap her dönüşünde çevresi kadar bir yol alarak dairesel bir hareket yapar. Çap değeri milimetre cinsinden verildiğinde, kesme hızının metre/dakika biriminde ifade edilebilmesi için elde edilen sonuç 1000'e bölünmelidir.

$$V_c = \frac{D.\pi.\mathrm{n}}{1000}\ [\mathrm{m/dak}] \qquad (5.1)$$

İlerleme hızı ya da parçaya nüfuziyet hızı (V_f, mm/dak), birim zamanda kat edilen mesafe olarak tanımlanır ve takımın iş parçasına göre ya da iş parçasının takıma göre ilerlemesini ifade eder. Bu kavram, aynı zamanda tezgâhın veya iş tablasının ilerleme hızı şeklinde de adlandırılmaktadır.

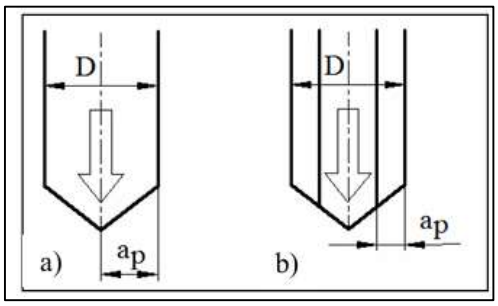
$$V_f = f * n\ [\mathrm{mm/dak}] \qquad (5.2)$$

Devir başına ilerleme (f - mm/dev), ilerleme hızının hesaplanmasında kullanılan temel bir parametre olup, takımın ya da iş parçasının her bir devirde kaydettiği ilerleme miktarını ifade eder.



Şekil 5.2. Kesme hızı ve ilerleme hızı (Çakır, 2000: 349, 410; Kutlu, 2009)

Talaş genişliği ya da radyal talaş genişliği (ap-mm), takımın iş parçası yüzeyiyle temas eden kısmını belirtir ve tıpkı tornalama işleminde olduğu gibi yarıçap üzerinden tanımlanır (Yağmur, 2011).



Şekil 5.3. Talaş derinliği (Avuncan, 1998; Meral, 2010)

$$a_p = \frac{\mathrm{D-d}}{2}\,[\mathrm{mm}] \tag{5.3}$$

Takım birden fazla kesici kenara sahip olduğundan (z, kesici kenar sayısını göstermektedir), talaş kesit alanı (A, mm²) tanımlanırken kenar başına ilerleme miktarı (fz, mm/z) dikkate alınır. Bu alan, her bir kesici kenarın kaldırdığı malzeme miktarını ifade eder ve kenar başına ilerleme ile radyal kesme derinliğinin çarpımıyla elde edilir.

$$f_z = \frac{f}{z}\,[\mathrm{mm/kenar}] \tag{5.4}$$

$$A = a_p * f_z\,[\mathrm{mm^2}] \tag{5.5}$$

Bu tanımlara dayanarak, talaş hacmi (V, mm³/dak) yani birim zamanda kaldırılan malzeme miktarı hesaplanabilir. Burada talaş hacmi, kesme hızı ile talaş kesit alanının çarpımına eşittir (Eş. 5.6). Kesme hızı metre/dakika cinsinden verildiğinde, talaş hacminin mm³/dak olarak bulunabilmesi için sonuç 1000 ile çarpılarak ifade edilir (Çakır, 2000: 349, 410; Aslan, 2022).

$$\mathrm{V = A * Vc * 1000}\,[mm^3/\mathrm{dak}] \tag{5.6}$$

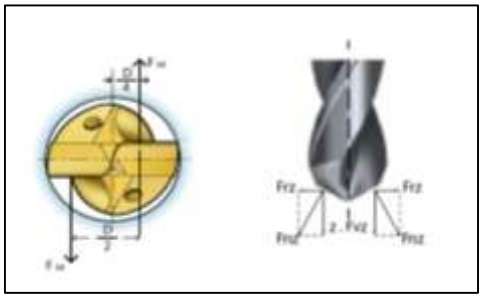
Kesme hızı, takım ömrü ve enerji tüketimi açısından belirleyici rol oynamaktadır. Yüksek kesme hızlarında, matkap üzerinde serbest yüzey aşınması hızlanmakta, kesici kenarlarda plastik deformasyon görülmekte ve bu durum delik kalitesinde düşüşe, hatta tolerans dışı

sonuçlara neden olabilmektedir. Buna karşılık, kesme hızının çok düşük seçilmesi ise takım ucunda talaş yığılmasına yol açarak talaş tahliyesini güçleştirmekte, süreç verimliliğini azaltmakta ve delik başına maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, optimum kesme hızının belirlenmesi hem takım performansı hem de işlem kalitesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

İlerleme hızı ise talaş oluşum mekanizmasını doğrudan belirleyen temel unsurlardan biridir ve tıpkı kesme hızında olduğu gibi enerji tüketimini etkileyerek mekanik ve termal gerilmelere katkıda bulunur. Yüksek ilerleme değerleri, talaş kontrolünü kolaylaştırmakta, işlem süresini kısaltmakta ve takım aşınmasını belirli ölçüde azaltabilmektedir. Bununla birlikte, bu durum matkap kırılma riskini artırmakta ve delik kalitesinin düşmesine yol açabilmektedir. Düşük ilerleme hızlarında ise daha uzun talaşların oluşması, kesme süresinin uzaması ve dolayısıyla delik başına maliyetin artması söz konusudur. Buna karşılık, düşük ilerleme miktarları yüzey kalitesinde iyileşme sağlasa da takım aşınmasının hızla artmasına neden olabilmektedir (Çakır, 2000: 349, 410; Meral, 2010; Yağmur, 2011; Groover, 2021).

5.2. Delme İşleminde Kesme Kuvvetleri ve Moment

Kesme kuvveti, bir malzemenin işlenebilirlik seviyesini ortaya koyan en önemli göstergelerden biridir. Talaşlı imalat sırasında genellikle düşük kesme kuvvetleri tercih edilir; çünkü bu kuvvetler yalnızca işlenen yüzeyin kalitesini değil, aynı zamanda matkabın takım ömrünü de doğrudan etkilemektedir. Kesme momentinin yükselmesi, takım ile iş parçası arasındaki temas bölgesinde sıcaklık artışına yol açar. Tek bir kesici ağız dikkate alındığında ise, bu bölgede ilerleme kuvveti (F_{vz}), radyal kuvvet (F_{rz}) ve kesme kuvveti (F_{sz}) meydana gelmektedir (Şekil 5.4) (Mendi, 1996: 5, 40; Yağmur, 2011; Bayraktar ve diğerleri, 2017; Aslan, 2022).



Şekil 5.4. Kesici ucu etkileyen kuvvetler (Guhring Takım Kataloğu,2023)

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere, kesici ağızların konumları nedeniyle her bir ağızda meydana gelen radyal kuvvetler birbirini dengelemektedir. Bu nedenle delik delme sürecinde yalnızca F_s ve F_v kuvvetleri etkin olmaktadır (Yağmur, 2011). Bir kesici ağza karşılık gelen kesme kuvveti ise bu denge durumuna bağlı olarak tanımlanmaktadır:

$$F_{sz} = A_{sz}k_s = \frac{dS_z}{2}k_s = \frac{ds}{4}k_s \tag{5.7}$$

ve toplam kesme kuvveti

$$F_s = zF_{sz} = 2F_{sz} = ds_z k_s = \frac{ds}{2}k_s \tag{5.8}$$

şeklinde hesaplanır.

Burada k_s, özgül kesme kuvvetini ifade etmektedir. İki ağızlı matkapta oluşan toplam kesme momenti;

$$F_S = 2F_{SZ} \text{ (Nm)} \tag{5.9}$$

$$M_s = zF_{sz}\frac{d}{4} = 2F_{sz}\frac{d}{4} = F\frac{d}{4_S} \qquad veya \tag{5.10}$$

$$M_s = \frac{d^2 s k_S}{8.10^3} \text{ (Nm)} \tag{5.11}$$

ile hesaplanabilir. Burada d (mm), s (mm/devir); k, (N/ mm²) olarak konulur ve s M (Nm) olarak bulunur. Bu bağıntıdan verilen bir s M (Nm) değerinde delinebilecek delik çapı

$$d = \sqrt{\frac{8.10^3 M_S}{s.k_S}} \text{ (mm)} \tag{5.12}$$

olarak bulunur. İlerleme s = zs_s bağıntısı ile tayin edilir (Mendi, 1996: 5, 40; Bayraktar ve diğerleri, 2017).

Toplam ilerleme kuvveti ise;

$$F_V = 2.F_{VZ} = 2.F_{SZ}.\sin x = F_s.\sin x \tag{5.13}$$

bağıntısı ile hesaplanır.

İlerleme kuvveti (Fv), eksenel karaktere sahip bir kuvvettir. Delik delme işleminde, ana kesici ağızlarda ortaya çıkan bu kuvvetin yanı sıra, radyal kesici ağızda da eksenel yönde F1 ilerleme kuvveti oluşmaktadır. Dolayısıyla, delme işlemi sırasında matkap üzerinde etkili olan ve aşılması gereken toplam eksenel kuvvet bu bileşenlerin birleşiminden meydana gelmektedir ve (5.14)'de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır (Mendi, 1996: 5, 40; Meral, 2010).

$$F_a = 2.F_{VZ} + F_1 = F_v + F_1 \quad (5.14)$$

5.3. Matkaplar

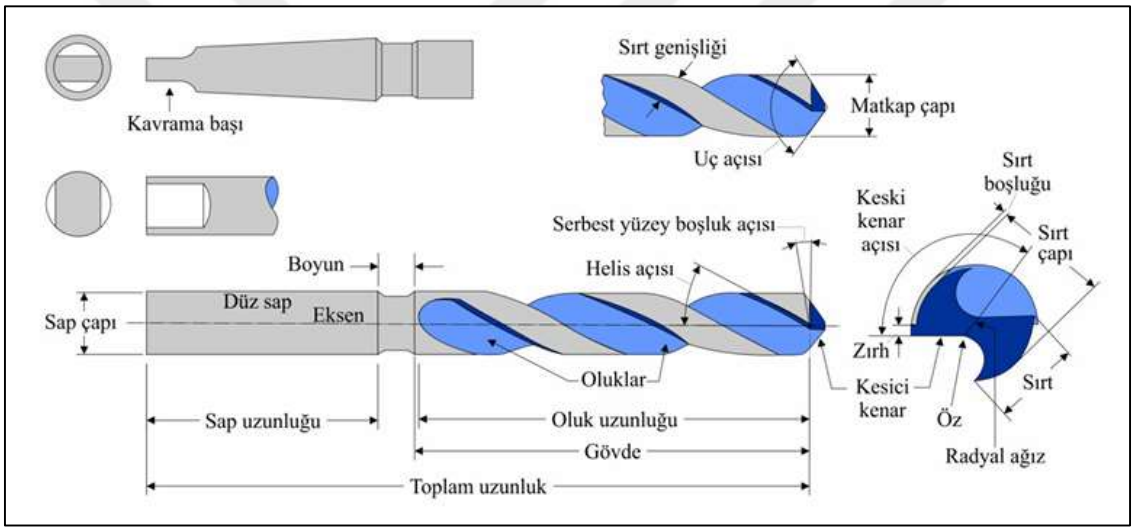
Matkaplar, talaşlı imalat süreçlerinde en yaygın kullanılan kesici takım gruplarının başında gelmektedir. Bir matkap, kendi ekseni etrafında dönme hareketi yaparken aynı zamanda ekseni boyunca ilerleyerek sahip olduğu iki kesici ağzı ile talaş kaldırır. Metal malzemelerin işlenmesinde ise farklı tiplerde matkap çeşitleri tercih edilmektedir.

Matkap ucu, kesici kenarları barındıran, malzemeyi keserek talaş kaldırmayı ve delik oluşumunu sağlayan bölümdür. Çoğu matkap iki kesici ağızla üretilmekle birlikte, üç kesici kenara sahip tipler de bulunmaktadır. Uç kısmının geometrisi taşlama işlemiyle oluşturulur; bu sırada bıçak yerleştirme açısı ve arka kesme açısı da şekillendirilir. Standart işleme koşullarında matkap ucu yaklaşık 118° uç açısıyla taşlanır ve kesme kenarı açısı genellikle 8°-12° arasında olur (Yağmur, 2011).

Matkap gövdesi, uç kısımdan başlayarak sapa kadar devam eden, üzerinde bükümlü yivlerin (helis olukların) bulunduğu bölümdür. Bu oluklar, delme sırasında kesici kenarlar tarafından çıkarılan talaşların uzaklaştırılmasını sağlar. Helis oluklarının sayısı, kesici kenar sayısına eşittir ve farklı burulma açılarıyla üretilebilir. Bu spiraller, kesici kenarların eğim açısını belirler. Gövde üzerinde yer alan spiral olukların arka yüzeyleri taşlanarak bütünlük oluşturulur ve bu kısımlar kesicinin taşıyıcı yapısını meydana getirir. Matkap uçları, talaş atma esnasında matkabın tüm gövdesinin delik yüzeyine sürtünmesini önleyecek şekilde döner. Gövde kısmı ise, takımın iş parçasına girerken sıkışmasını engellemek amacıyla hafif inceltilerek imal edilir. Bu incelme oranı düşük olmakla birlikte, delme sürecinin güvenli ve

verimli şekilde gerçekleşmesine katkı sağlar. Helisel oluklar, kesici uçtan başlayarak şaft kısmına kadar mekanik yöntemlerle açılır. Bu oluklar, ince ve sürekli talaşların matkap üzerinde kırılmadan dışarı atılmasını sağlarken, aynı zamanda kesme kuvvetlerinin oluşturduğu torka (Mz) karşı matkabın dayanıklılığını artırır (Şeker, 1997: 5, 11). Matkabın bölümleri Şekil 5.5.'te verilmektedir.

Sap bölümü, matkabın tezgâh veya matkap presine bağlandığı kısımdır. Çoğu matkap, belirli bir iç çapa sahip silindirik saplarla üretilse de özellikle geniş çaplı matkap uçları montaj kolaylığı sağlamak amacıyla konik yapıda tasarlanarak doğrudan ana mile bağlanabilmektedir (Meral, 2010; Yağmur,2011; Aslan, 2022; Yılmaz, 2022).



Şekil 5.5. Matkap geometrisi (Çakır, 2015; Yılmaz, 2022)

Delik delme esnasında talaşların helisel kanallar üzerinden uzaklaştırılması, kesme sıvılarının doğrudan kesme bölgesine ulaşmasını güçleştirmektedir. Bu sorunu gidermek ve daha etkili bir soğutma sağlamak amacıyla, matkap gövdesine açılan iç kanallar sayesinde içten soğutmalı matkaplar geliştirilmiştir. Bu tasarımda kesme sıvısı, matkabın içinden geçerek doğrudan kesme noktasına iletilir. Böylece yalnızca kesici ucun soğutulması ve yağlanması değil, aynı zamanda talaşların daha hızlı ve verimli biçimde uzaklaştırılması ile talaşın da soğuması sağlanır. İçten soğutma sistemi özellikle derin delik delme uygulamalarında, yüksek sıcaklıkların ortaya çıktığı işlemlerde ve arka arkaya yapılan delik delme operasyonlarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Yılmaz, 2022). İçten soğutma kanalına sahip matkap görüntüsü şekil 5.6.'da yer almaktadır.



Şekil 5.6. İçten soğutmalı matkap (URL-3)

6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum ve alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım, mükemmel korozyon direnci, şekillendirilebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi üstün özellikleri sayesinde günümüz imalat sektöründe en fazla tercih edilen malzemelerden biri haline gelmiştir. Saf alüminyum hafif ve korozyona dayanıklı olmakla birlikte, mekanik özellikleri sınırlıdır. Bu nedenle, kullanım alanlarını genişletmek amacıyla alüminyum farklı alaşım elementleri (bakır, magnezyum, çinko, silikon vb.) ile birleştirilerek daha yüksek dayanım, sertlik ve aşınma direnci kazandırılmış alaşımlar elde edilmektedir. Bu gelişmiş özellikler sayesinde alüminyum alaşımları, havacılık ve savunma sanayii, otomotiv, gemi ve tren üretimi, inşaat, enerji iletim hatları ve paketleme endüstrisi gibi çok geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Çakır, 2015).

Alüminyum alaşımlarının tercih edilmesinde en önemli etkenlerden biri, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunmalarıdır. Özellikle uçak ve uzay yapılarında hafiflik ile birlikte yüksek dayanım kritik bir tasarım kriteri olduğundan, alüminyum alaşımları bu alanlarda vazgeçilmez malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, kolay işlenebilirlik ve yüzey işlemlerine uygunluk gibi avantajlar da bu alaşımların endüstriyel önemini artırmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarının büyük bir kısmı geri dönüştürülebilir olup, üretimde enerji tasarrufu sağladıkları için sürdürülebilir imalat açısından da stratejik bir konuma sahiptir (Çağan, Uğurlu, Buldum ve Sevim, 2017).

Mikroyapısal ve mekanik özellikler açısından bakıldığında, alüminyum alaşımları genel olarak döküm alaşımları ve şekillendirilmiş (işlenmiş) alaşımlar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bunun yanı sıra, alaşım elementlerinin cinsine ve sertleşme mekanizmalarına bağlı olarak ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan alaşımlar olarak da alt sınıflara ayrılmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alaşımlarda mukavemet, soğuk şekillendirme işlemleriyle artırılırken; ısıl işlem uygulanabilen alaşımlarda çözeltiye alma, yaşlandırma gibi ısıl işlemler sonucunda sertlik ve dayanım değerlerinde kayda değer artış elde edilmektedir (Aslan, 2022). Çizelge 6.1.'de Alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.1. Alüminyum alaşımlarının özellikleri

Alüminyum Alaşım Serisi	Yoğunluk (g/cm³)	Erime Noktası (°C)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Elektriksel İletkenlik (% IACS)	Çekme Dayanımı, Maksimum (MPa)
1000	2,7	646–658	218–243	59–65	45–205
2000	2,75–2,84	502–643	121–140	39–50	172–670
3000	2,72–2,73	629–654	121–190	27–38	90–295
4000	2,7	532–632	120–180	23,26–32,26	110–470
5000	2,64–2,68	568–654	120–160	29–52	110–590
6000	2,69–2,70	554–655	130–226	50–55	89,6–565
7000	2,72–2,81	476–657	115–222	46–60	70–750

6.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları, içerdiği alaşım elementlerine ve uygulanan ısıl işlem yöntemlerine bağlı olarak farklı mekanik ve fiziksel özellikler göstermektedir. Bu nedenle endüstride alüminyum alaşımları genellikle dört haneli seri numaraları ile sınıflandırılır. Bu sistemde ilk hane, alaşımın ana alaşım elementini tanımlamakta ve her seri kendine özgü özellikler sergilemektedir. Ayrıca, alaşımlar ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan gruplar olarak da ayrılmakta, bu da onların mekanik davranışlarını ve kullanım alanlarını doğrudan etkilemektedir.

Çizelge 6.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Seri	Ana Alaşım Elementi	Genel Özellikler	Tipik Kullanım Alanları
1xxx	Saf Alüminyum (> %99)	Yüksek korozyon direnci, yüksek ısıl ve elektriksel iletkenlik, düşük mekanik dayanım	Elektrik kabloları, kimyasal ekipmanlar
2xxx	Bakır (Cu)	Yüksek mukavemet, düşük korozyon direnci, genellikle ısıl işlem uygulanabilir	Havacılık, otomotiv, askeri uygulamalar
3xxx	Mangan (Mn)	İyi korozyon direnci, orta dayanım, iyi şekillendirilebilirlik	Çatı kaplamaları, içecek kutuları, inşaat malzemeleri
4xxx	Silikon (Si)	Düşük genleşme katsayısı, yüksek aşınma direnci, gri renkli yüzey	Otomotiv motor parçaları, ısıya dayanıklı bileşenler
5xxx	Magnezyum (Mg)	Çok iyi korozyon direnci, deniz ortamına uygun, kaynak kabiliyeti yüksek	Gemi yapımı, basınçlı kaplar, ulaşım sektörü
6xxx	Magnezyum + Silikon (Mg_2Si)	İyi mekanik özellikler, korozyon direnci, ısıl işlemle güçlendirilebilir	Otomotiv parçaları, inşaat profilleri, borular
7xxx	Çinko (Zn) (genellikle Mg ve Cu katkılı)	Çok yüksek mukavemet, nispeten düşük korozyon direnci, ısıl işleme uygundur	Uçak ve savunma sanayi,
8xxx	Çeşitli (ör. Demir, Lityum vb.)	Özel amaçlı alaşımlar, iyi form verilebilirlik, ince folyo üretimi	Alüminyum folyolar, lityumlu yapısal malzemeler

6.2. Al 7075 Serisi ve İşlenebilirliği

7075 serisi alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılan 7xxx serisinin önemli bir üyesidir. Kimyasal bileşiminde temel alaşım elementi olarak çinko (Zn) bulunmakta, buna ek olarak magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) ilaveleri ile mukavemet ve sertlik artırılmaktadır. Bu alaşım grubu özellikle havacılık ve savunma sanayiinde kritik yapısal bileşenlerde tercih edilmektedir. 7075 alüminyum alaşımına ait görsel şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. 7075 Alüminyum alaşımı

Al 7075-T6 alüminyum alaşımı ise çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemleri sonucunda elde edilmekte olup, bu koşulda alaşım yüksek çekme dayanımı, sertlik ve yeterli tokluk özellikleri göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek mukavemet değerleri korozyon direncini bir miktar düşürmekte, bu nedenle bazı uygulamalarda yüzey kaplamaları ile korozyon dayanımı artırılmaktadır (Akdemir, 2024).

İşlenebilirlik açısından Al 7075-T6, sahip olduğu yüksek dayanım nedeniyle talaşlı imalat işlemlerinde belirli zorluklar barındırır. Özellikle delik delme operasyonlarında yüksek kesme kuvvetleri, takım aşınmasının hızla artması, çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülüğünün bozulması sık karşılaşılan problemlerdir. Ayrıca, nispeten düşük termal iletkenliği nedeniyle kesme bölgesinde ısının birikmesi, talaş tahliyesini zorlaştırarak yapışmış talaş kenarı (BUE) oluşumuna sebep olabilmektedir. Ancak, uygun kesme parametreleri seçimi, kaplamalı veya içten soğutmalı karbür matkapların kullanımı ve yüksek basınçlı soğutma (HPC) gibi gelişmiş soğutma teknikleri ile bu olumsuzlukların önüne geçmek mümkündür.

7. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, başta Savunma Sanayi'de çok sık kullanılan, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ile öne çıkan Al 7075-T6 alüminyum alaşımında delik delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek basınçlı soğutma (YBS) koşullarının delme performansına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde tornalama ve frezeleme üzerine çok sayıda YBS çalışması bulunmasına karşın, delik delme işlemlerinde yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, farklı kesme parametreleri ve soğutma basınçları altında deneyler yapılarak, kesme kuvvetleri, kesme momenti, takım aşınması ve delik kalitesini belirleyen; yüzey pürüzlülüğü, dairesellik, delik çapı ve silindiriklik değerleri gibi temel performans kriterleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

7.1. Deney Malzemesi

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak Al 7075-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşım, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle özellikle havacılık ve savunma sanayiinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 7.1. ve 7.2.'de verilmiştir. Çizelgedeki değerler uygunluk sertifikasından alınmış olup eklerde yer almaktadır.

Çizelge 7.1. Al 7075 - T6 alaşımının kimyasal bileşimi

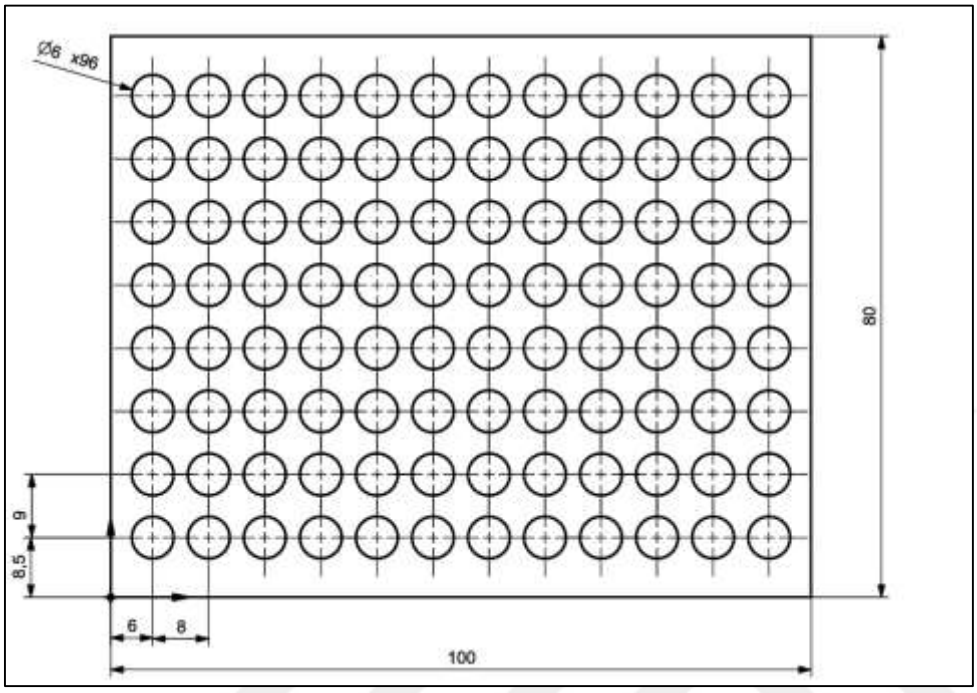
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Zi+Ti	Diğer	Al
0,5	0,5	1,6	0,3	2,5	5,7	0,25	0,25	0,16	Kalan

Çizelge 7.2. Al 7075 - T6 alaşımının mekanik özellikleri (Çaydaş ve Çelik, 2017)

Mekanik Özellik	Değer
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	600
Akma Mukavemeti (MPa)	550
Uzama (%)	11
Sertlik (HB)	150

Deney numuneleri 18x80x100 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Numune boyutlarının belirlenmesinde kuvvet ölçümlerinin doğru şekilde yapılabilmesi amacıyla özel olarak tasarlanmış bağlama kalıbı dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan matkap çapı Ø6 mm

olup, numune kalınlığı bu çapın üç katına karşılık gelecek şekilde 18 mm olarak seçilmiştir. Numune boyutları ve delik yerleşim planı Şekil 7.1.'de yer almaktadır.



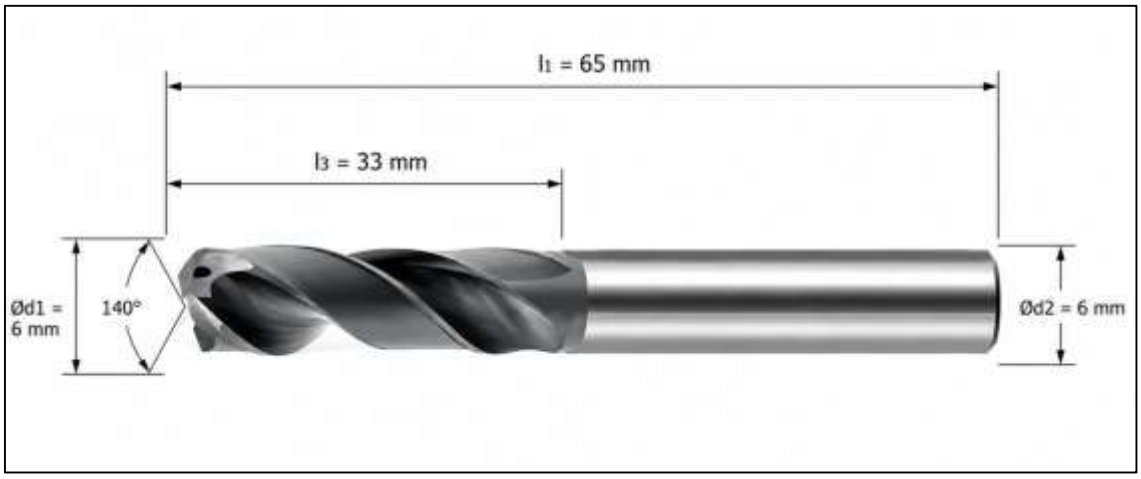
Şekil 7.1. Delik Yerleşim Planı

7.2. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım ve Takım Tutucu

Delik delme deneylerinde Ø6 mm kaplamasız karbür matkaplar kullanılmıştır. Matkaplar, iki adet içten soğutma kanalına sahip olup, K20 kalite karbür çubuklardan bilenmiştir. Matkaplara ait teknik özellikler Çizelge 7.3.'te verilmiştir. Şekil 7.2.'de yer alan, deneylerde kullanılan matkaplar proje kapsamında ANKATOOL firmasından tedarik edilmiş ve her bir deney için yeni bir matkap kullanılmıştır.

Çizelge 7.3. Deneylerde kullanılan matkabın özellikleri (URL-4)

Matkap Özellikleri	
Takım Malzemesi	Karbür
Kaplama	Kaplamasız
Soğutma Kanalı	2
Ağız Sayısı	2
Çapı	6 mm
Uç Açısı	140°
Helis Boyu	33 mm
Şaft Boyu	65 mm

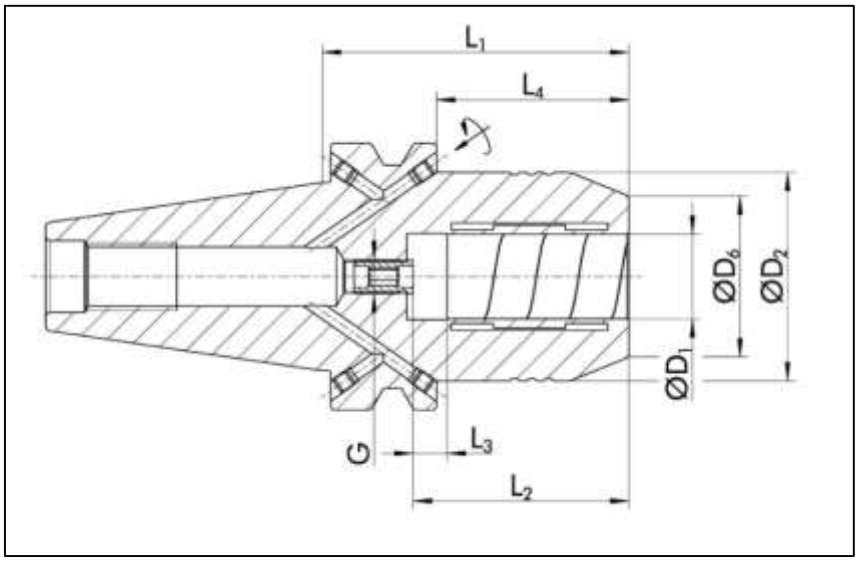


Şekil 7.2. Deneylerde kullanılan kaplamasız karbür matkap

Tüm deneylerde takım tutucu olarak Schunk Tendo-EC BT40 standart hidrolik takım tutucu tercih edilmiştir. Tutucunun görseli Şekil 7.3. ve teknik çizimi Şekil 7.4.'te verilmiştir. Teknik özellikleri ise Çizelge 7.4.'de yer almaktadır. Hidrolik takım tutucular, bağlama kuvvetini hidrolik sıvı basıncı ile oluşturmaktadır. Mekanik sistem tarafından tahrik edilen piston yardımıyla hidrolik sıvı, takımın yerleştirildiği bölgeye iletilmekte; takım sapına her yönden sabit ve yüksek basınç uygulanmaktadır. Bu özellik sayesinde hidrolik tutucular, takım üzerinde yüksek rijitlik sağlamakta ve düşük salgı değeri ile hassasiyet gerektiren delme işlemlerinde avantaj sunmaktadır.



Şekil 7.3. Deneylerde kullanılan takım tutucu (URL-5)



Şekil 7.4. Deneylerde kullanılan takım tutucunun teknik çizimi (URL-5)

Çizelge 7.4. Deneylerde kullanılan hidrolik takım tutucunun özellikleri

Schunk Tendo-EC BT40 Takım Tutucu Özellikleri	
Bağlama Çapı	Ø20
Uzunluğu	72,5
D1	20 mm
D2	49,25 mm
D6	38 mm
L1	72,50 mm
L2	51 mm
L3	10 mm
L4	45,50 mm
G	M8X1

7.3. Takım Tezgahı

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 5 eksenli HAAS VF-2SS CNC işleme merkezinde yürütülmüştür. Tezgâha ait temel teknik özellikler Çizelge 7.5.'de, deneylerin yapıldığı takım tezgahı ise Resim 7.1.'de sunulmuştur. Kullanılan CNC tezgâhı, hem içten hem de dıştan soğutma sistemleri ile donatılmıştır. Dıştan soğutma ünitesi yaklaşık 3 bar basınca, içten soğutma sistemi ise 60 bar seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Bu çalışmada, farklı basınç değerlerinin işleme performansına etkilerini inceleyebilmek amacıyla, tezgâhın içten soğutma hattına ek bir sistem tasarlanarak entegrasyonu sağlanmıştır.

Çizelge 7.5. Takım tezgahının teknik özellikleri

Özellik	Değer
X, Y ve Z Eksenleri	762, 406, 508 mm
Tezgâh Gücü	22,4 kW
En Yüksek Devir	12000 dev/dak
En Yüksek İlerleme Hızı (kesme için)	21,2 m/dak
En Yüksek İlerleme Hızı (tabla için)	35,6 m/dak
Takım Kapasitesi	30+1
Soğutma Sıvısı Kapasitesi	208 Litre



Resim 7.1. Deneylerin yapıldığı takım tezgâhı

7.4. Kuvvet ve Momentlerin Ölçümü

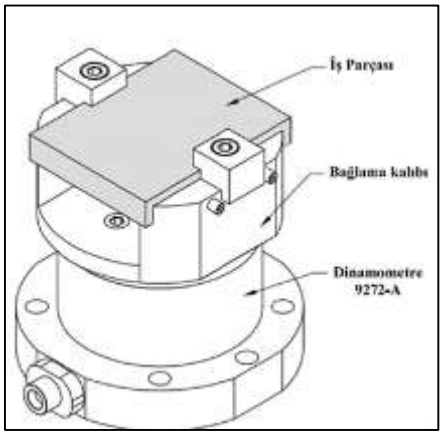
Delik delme deneyleri sırasında ortaya çıkan kuvvet ve momentlerin ölçülmesinde, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvar altyapısında bulunan KISTLER 9272A tipi dört bileşenli piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır. Şekil 7.5.'te deneylerde kullanılan dinamometre ve veri okuyucu yer almaktadır. Bu ölçüm sistemi, aynı anda üç yönlü kesme kuvvetini (Fx, Fy, Fz) ve kesme momentini (Mz)

kaydedebilme özelliğine sahiptir. Deneylerde kullanılan numuneler, dinamometre üzerine doğrudan bağlanamadığından, cihaz ölçülerine uygun olarak tasarlanmış özel bir bağlama kalıbı aracılığıyla sabitlenmiştir. Numuneler, kalıp içerisine hem yan yüzeylerinden hem de üst kısımdan pabuçlar yardımıyla yerleştirilmiş ve rijit bir bağlantı sağlanmıştır. Dinamometre ve bağlama kalıbının birlikte montajı ile oluşturulan deneysel kuvvet ölçüm düzeneği Şekil 7.6.'da verilmiştir. Şekil 7.7.'de ise dinamometrenin tezgah ile bağlantısının şematik gösterimi yer almaktadır.

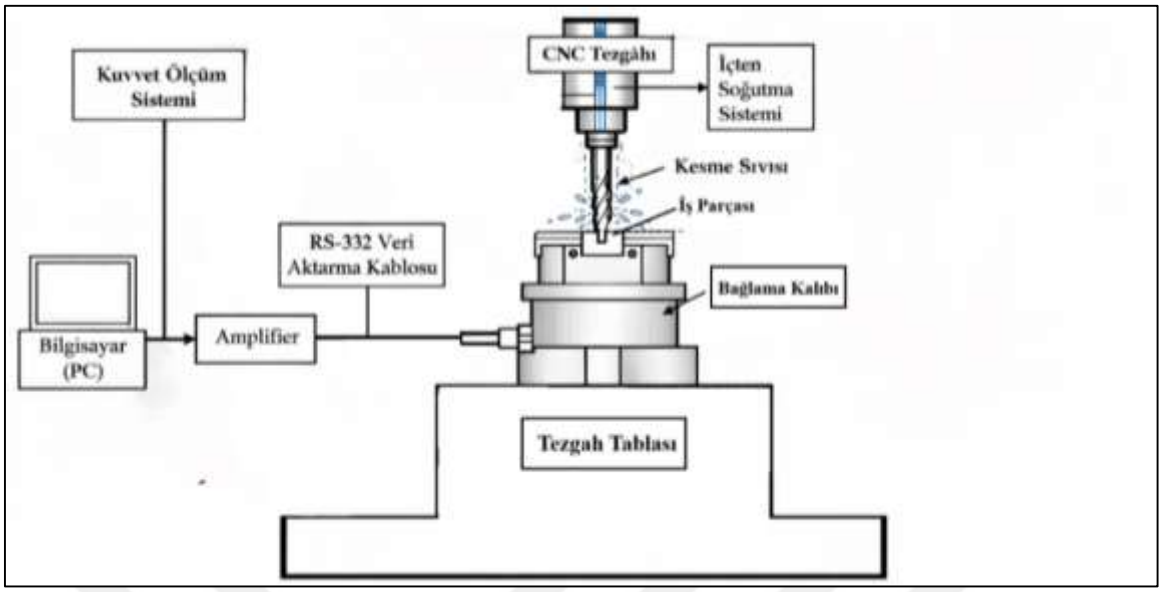


Şekil 7.5. Ölçümlerde kullanılan dinamometre ve veri okuyucu

Deney süresince dinamometre tarafından kaydedilen sinyaller, RS-232 veri aktarım kablosu üzerinden amplifiera iletilmiştir. Sinyallerin güçlendirilmesi ve veri toplama kartına aktarılması amacıyla, KISTLER 5070-A tipi çok kanallı amplifier kullanılmıştır. Ölçüm verilerinin işlenmesi ve kuvvet–moment grafiklerinin elde edilmesinde ise Windows tabanlı sistemlerle uyumlu olan KISTLER DynoWare 2825A-02-01 yazılımı tercih edilmiştir. Bu sayede elde edilen ham veriler, sayısal forma dönüştürülerek analizlerde kullanılabilir hale getirilmiştir.



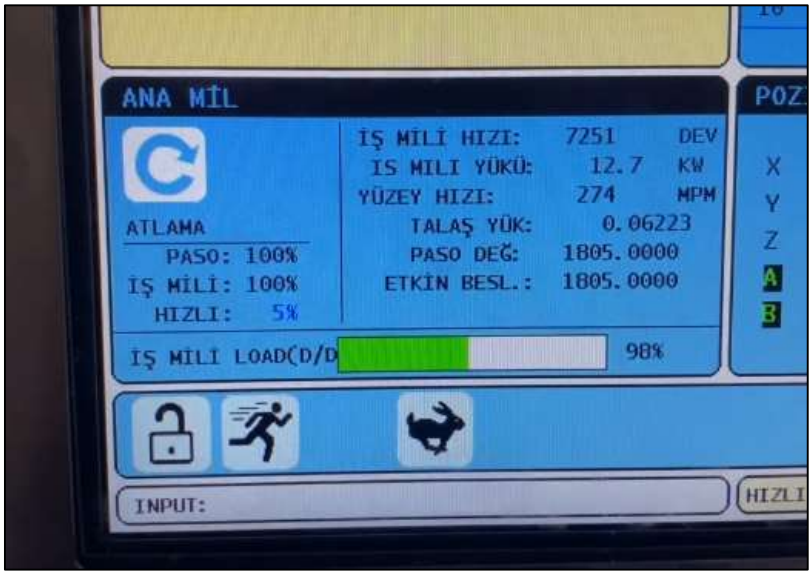
Şekil 7.6. Kuvvet ölçüm seti şeması (Uzun, 2013)



Şekil 7.7. Dinamometre ve takım tezgahı bağlantısının şematik gösterimi

7.5. Güç Tüketimi Değerlerinin Ölçümü

Deneyler sırasında güç tüketimi değerleri, Resim 7.2.'de verilen CNC tezgâhı kontrol panelinde gerçek zamanlı olarak görüntülenen iş mili güç değerleri (kW) esas alınarak elde edilmiştir. Delme işlemleri boyunca tezgâh ekranı video kaydı ile takip edilmiş, kayıtlar daha sonra yavaşlatılarak kararlı kesme bölgesine ait güç değerleri okunmuştur. Her deney için kontrol panelinden okunan en yüksek üç güç değeri dikkate alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ilgili deneyin güç tüketimi değeri belirlenmiştir.



Resim 7.2. CNC tezgahı kontrol paneli ekranından alınan güç değerleri

7.6. Delik Kalitesi Ölçümleri

Havacılık ve Savunma Sanayii uygulamalarında kullanılan parçaların montajında, deliklerin geometrik doğruluğu kritik bir öneme sahiptir. Deliklerdeki çap, dairesellik ve silindiriklik hataları; montaj esnasında civata, perçin veya diğer bağlantı elemanlarının uyumunu doğrudan etkileyerek, yapısal bütünlüğü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, delik kalitesinin hassas ölçüm yöntemleriyle değerlendirilmesi hem güvenilirlik hem de fonksiyonellik açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada deliklerin kalite değerlendirmesi, şekil ve konum toleransları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Deliklerin geometrik özellikleri; çap ölçüsü, dairesellik ve silindiriklik değerleri üzerinden incelenmiştir. Ölçüm işlemleri, Resim 7.3.'te verilen, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan, Hexagon Global Performance (07.10.07) model koordinat ölçüm cihazı (CMM) ile yapılmıştır.



Resim 7.3. CMM cihazı görseli

7.7. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Delik kalitesini belirleyen en önemli kriterlerden biri de yüzey pürüzlülüğü değeridir. Çalışma kapsamında deliklerin iç yüzey pürüzlülükleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Mitutoyo SJ-410 model

yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Bu cihaz, yüksek hassasiyetli tarama özelliği sayesinde yüzey profillerini ayrıntılı şekilde kaydetmekte ve Ra, Rz, Rq gibi yüzey pürüzlülük parametrelerinin hesaplanmasına imkân sağlamaktadır. Yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri Çizelge 7.6.'da verilmiştir.

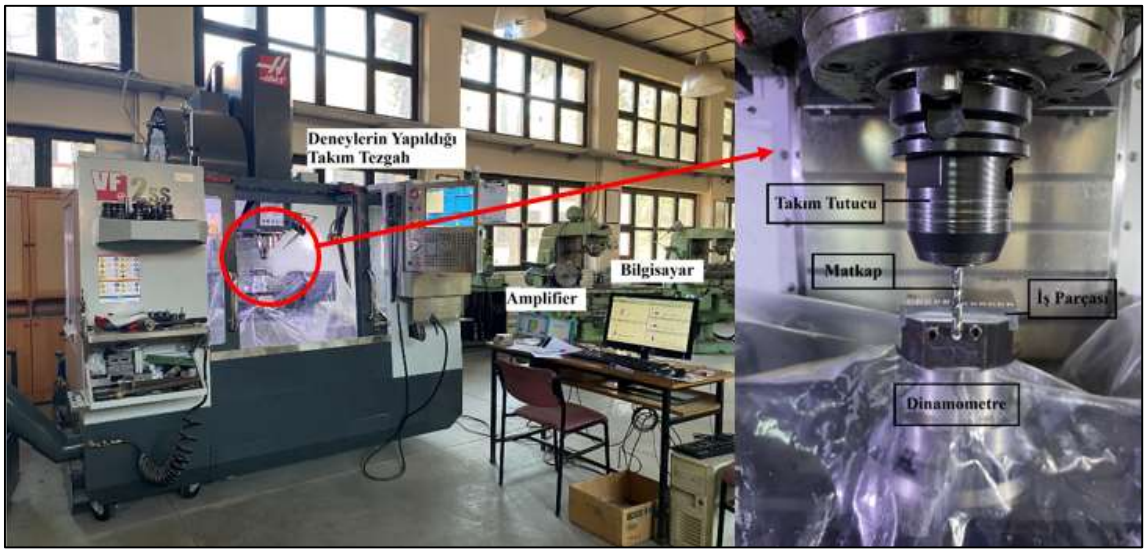
Çizelge 7.6. Yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri



Özellik	Değer
Ölçme uzunluğu	25 mm
Tarama kuvveti	0,75 mN
Tarama hızı	0,05 – 1 mm/sn
Ölçüm özellikleri	Ra, Rz ve Rq
Örnekleme uzunluğu	0,08 – 0,25 – 0,8 – 2,5 – 8 – 25 mm

7.8. Deney Düzeneği ve Deney Parametreleri

Deneysel çalışmalar kapsamında delik delme işlemleri; kuru, geleneksel soğutma ve yüksek basınçlı içten soğutma olarak üç farklı soğutma koşulu altında yürütülmüştür. Kuru ve geleneksel soğutma deneylerinde, sabit ilerleme miktarı (0,1 mm/dev) ile üç farklı kesme hızı (140, 170 ve 200 m/dak) kullanılmış ve toplam 6 deney yapılmıştır. Yüksek basınçlı soğutma koşullarında ise üç farklı kesme hızı (140, 170 ve 200 m/dak), üç farklı ilerleme (0,1-0,15 ve 0,20) ve ek olarak üç farklı basınç seviyeleri (20, 40 ve 60 bar) uygulanarak 27 deney yapılmıştır. Böylece farklı kesme hızları ve ilerleme miktarları altında, kuru, geleneksel ve yüksek basınçlı soğutma koşulları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deney parametreleri üretici takım kataloğunda yer alan değerlere, 7075-T6 alüminyum alaşımı üzerine yapılan delik delme çalışmalarına ve tezgahın maksimum devir kapasitesine göre belirlenmiştir (Çakır,2015). Basınçlar ise tezgahın sahip olduğu yüksek basınç pompasının kapasitesine göre belirlenmiştir. Tezgahta yer alan yüksek basınç pompası maksimum 60 bara kadar basınç sağlayabilmektedir. Deneylerde kullanılan 20, 40 ve 60 bar basınç seviyeleri, maksimum basınca göre yaklaşık %33 aralıklı olacak şekilde seçilmiştir. Bu sayede, farklı basınç seviyelerinin işleme performansı üzerindeki etkisinin sistematik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çizelge 7.8.'de yüksek basınçlı içten soğutmalı delik delme deneylerinde kullanılan parametreler; Çizelge 7.7.'de ise kuru ve geleneksel soğutma şartları altında yapılan deney parametreleri yer almaktadır. Deney düzeneği ise Resim 7.4.'de verilmiştir.



Resim 7.4. Deney düzeneği

Çizelge 7.7. Kuru ve geleneksel soğutma deney parametreleri

Deney No	Soğutma Şartı	Kesme Hızı (mm/dak)	İlerleme (mm/dev)	Devir	ilerleme
1	Kuru	140	0,1	7431	743
2		170		9023	902
3		200		10616	1062
4	Geleneksel Soğutma	140		7431	743
5		170		9023	902
6		200		10616	1062

Çizelge 7.8. YBS deney parametreleri

Deney No	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/dak)	İlerleme (mm/dev)	Devir	İlerleme (mm/dak)
1	20	140	0,1	7431	743
2			0,15		1115
3			0,2		1486
4		170	0,1	9023	902
5			0,15		1354
6			0,2		1805
7		200	0,1	10616	1062
8			0,15		1592
9			0,2		2123
10	40	140	0,1	7431	743
11			0,15		1115
12			0,2		1486
13		170	0,1	9023	902
14			0,15		1354

Çizelge 7.8.(devam) YBS deney parametreleri

15			0,2		1805
16		200	0,1	10616	1062
17			0,15		1592
18			0,2		2123
19	60	140	0,1	7431	743
20			0,15		1115
21			0,2		1486
22		170	0,1	9023	902
23			0,15		1354
24			0,2		1805
25		200	0,1	10616	1062
26			0,15		1592
27			0,2		2123

7.9. Soğutma Sistemi

Bu çalışmada geleneksel soğutma yöntemi, takım dışından; YBS ise takım içinden uygulanmıştır. Her iki yöntemde de aynı kesme sıvısı tercih edilmiştir. CNC tezgâhı üzerinde bu yöntemlere uygun ayrı soğutma devreleri ve pompaları bulunmaktadır. Takım dışı soğutma uygulamasında tezgâhın standart pompası yaklaşık 3 bar basınç sağlamaktadır. Takım içi soğutma için kullanılan pompa ise 60 bara kadar çıkabilen kapasiteye sahiptir. Tezgâh üzerinde yapılan ek düzenlemeler sayesinde, içten soğutma sistemi farklı basınçlarda çalıştırılabilmiş ve bu kapsamda deneylerde 20, 40 ve 60 bar basınç değerleri uygulanmıştır. Soğutma sıvısı uygulanmadan yapılan kuru deneyler ile geleneksel soğutma ve YBS uygulaması karşılaştırılmıştır. Takım dışından uygulanan soğutma uygulaması Resim 7.5. (a)'da; kuru delme Resim 7.5. (b)'de; takım içinden uygulanan YBS uygulaması ise Resim 7.5. (c)'de görülmektedir.



Resim 7.5. (a) Geleneksel soğutma (b) Kuru delme (c) İçten soğutmalı YBS uygulaması

CNC tezgâhında takım içi soğutma için yüksek basınca çıkabilen bir pompa bulunmaktadır. Deneylerde, soğutma koşullarını çeşitlendirmek ve farklı basınç seviyelerinin işleme performansına etkilerini inceleyebilmek amacıyla, tezgâha ek bir basınç ayar sistemi entegre edilmiştir. Bu kapsamda, tezgâhın içten soğutma pompası çıkışına hidrolik basınç ayar valfi yerleştirilmiş ve fazla sıvının geri dönüşü için tahliye hattı tezgâh tankına bağlanmıştır. Ayrıca, valf çıkışına monte edilen manometre ile soğutucu akışkan basıncı sürekli izlenmiştir. Böylece, kesme bölgesine farklı basınç seviyelerinde akışkan gönderilerek deneyler kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tezgâha eklenen YBS sisteminin görseli Resim 7.6.'da yer almaktadır.

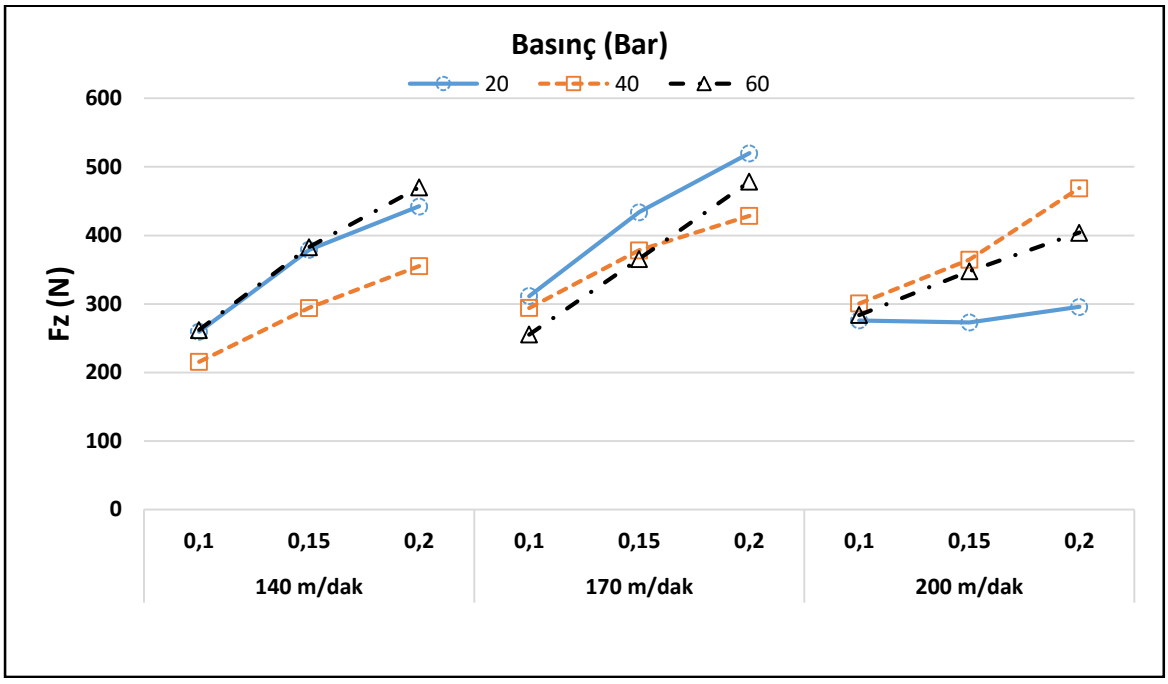


Resim 7.6. YBS sistemi

8. DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

8.1. Farklı Soğutma Koşullarının İtme Kuvveti Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, yüksek basınçlı soğutma (YBS) koşullarında gerçekleştirilen delme deneylerinden elde edilen itme kuvveti (Fz) değerleri, kesme hızı, ilerleme ve soğutma basıncının etkileri açısından birlikte değerlendirilmiştir. Deney sonuçları Şekil 8.1.'de yer almaktadır.



Şekil 8.1. YBS deneylerine ait itme kuvveti sonuçları

Genel olarak Fz değerlerinin ilerleme artışıyla belirgin biçimde yükseldiği görülmektedir. Bu durum, artan ilerleme oranıyla birlikte talaş kesitinin büyümesi ve malzeme deformasyonunun artması sonucunda takım ucundaki eksenel yüklerin artmasıyla açıklanabilir. Literatürde de benzer şekilde, ilerleme oranının Fz üzerinde en baskın parametre olduğu ve artan ilerlemenin itme kuvvetini doğrudan yükselttiği bildirilmiştir (Atak ve Yağmur, 2024; Çakır ve ark., 2012).

Kesme hızı açısından değerlendirildiğinde, düşük hızlarda (140 m/dak) Fz değerlerinin görece düşük, orta hızlarda (170 m/dak) ise en yüksek seviyeye ulaştığı, yüksek hızlarda (200 m/dak) ise tekrar düşüş eğilimine geçtiği görülmüştür. Bu eğilim, kesme bölgesindeki

ısıl yumuşama ve talaş ayrılma mekanizmasıyla ilişkilidir. Orta hızda artan sıcaklık, malzemenin akma dayanımını düşürmek yerine, kesme bölgesinde yapışma eğilimini artırarak sürtünmeyi büyütür; bu da Fz'nin yükselmesine yol açar. Resim 8.1.'de yer alan 170 m/dak kesme hızı ve sırasıyla 20 bar, 40 bar ve 60 bar basınçta kullanılan takım görselleri incelendiğinde, kesici kenar çevresinde talaş yapışması ve sıvanma izlerinin oluştuğu görülmektedir. Özellikle düşük basınç koşullarında takım-talaş temas bölgesinde oluşan yapışma tabakasının, talaş akışını zorlaştırarak sürtünmeyi artırdığı ve buna bağlı olarak itme kuvvetinin yükselmesine katkı sağladığı düşünülmektedir. 200 m/dak kesme hızında ise, kesme bölgesinde artan sıcaklığın etkisiyle iş parçası malzemesinin deformasyon direnci azalmış ve malzemenin kesmeye karşı daha kolay şekil değiştirmesi sonucu kuvvetlerde düşüş meydana gelmiştir (Trent ve Wright, 2000; Shaw ve Cookson, 2005).



(a)	(b)	(c)

Resim 8.1. 170 m/dak kesme hızında, (a) 20 bar (b) 40 bar (c) 60 bar basınç seviyelerinde kullanılan takımların görselleri

Basınç düzeylerinin karşılaştırılması, YBS sisteminin etkinliğinin yalnızca basınç artışıyla doğrusal bir biçimde artmadığını, aksine kesme hızı ve ilerleme oranıyla etkileşimli bir şekilde optimum aralıkta gerçekleştiğini göstermiştir. 0.1 ilerleme değerinde ve düşük kesme hızında (140 m/dak) 20 bar ile elde edilen itme kuvveti 259,6 N iken, 40 bar basınçta bu değer yaklaşık %17 azalarak 215,6 N'ye düşmüştür. Ancak basınç 60 bar seviyesine çıkarıldığında Fz değeri tekrar yükselerek 262,2 N'ye ulaşmıştır. Bu sonuç, düşük hızlarda 40 bar basıncın talaş bölgesine optimum miktarda soğutma sağlayarak kesme direncini azalttığını, ancak 60 bar seviyesinde soğutma debisinin artmasıyla soğutma sıvısının talaş kırılma bölgesinde türbülans oluşturup kesme stabilitesini bozabileceğini göstermektedir (Oezkaya ve Biermann, 2018). Orta kesme hızında (170 m/dak) 20 bar koşulunda 311,4 N olan Fz değeri, 40 bar basınçta %5,6 azalarak 293,9 N'ye düşmüş, 60 bar basınçta ise %13

oranında daha düşük bir seviyeye (255,2 N) ulaşmıştır. Bu eğilim, artan basınçla birlikte artan akış debisinin, talaş sıkışmasını azaltması ve sürtünme alanını daraltmasıyla açıklanabilir (D'Addona ve Raykar, 2019). Ancak yüksek kesme hızında (200 m/dak) 20 bar basınçta 275,6 N olarak ölçülen kuvvet, 40 bar koşulunda %9 artarak 300,6 N'ye yükselmiş, 60 barda ise tekrar %5 azalarak 283,9 N'ye düşmüştür. Bu durum, yüksek hızlarda soğutma sıvısının etki süresinin azalması ve sıvının talaş altına yeterince nüfuz edememesiyle ilişkilendirilebilir (Dhar ve ark., 2006).

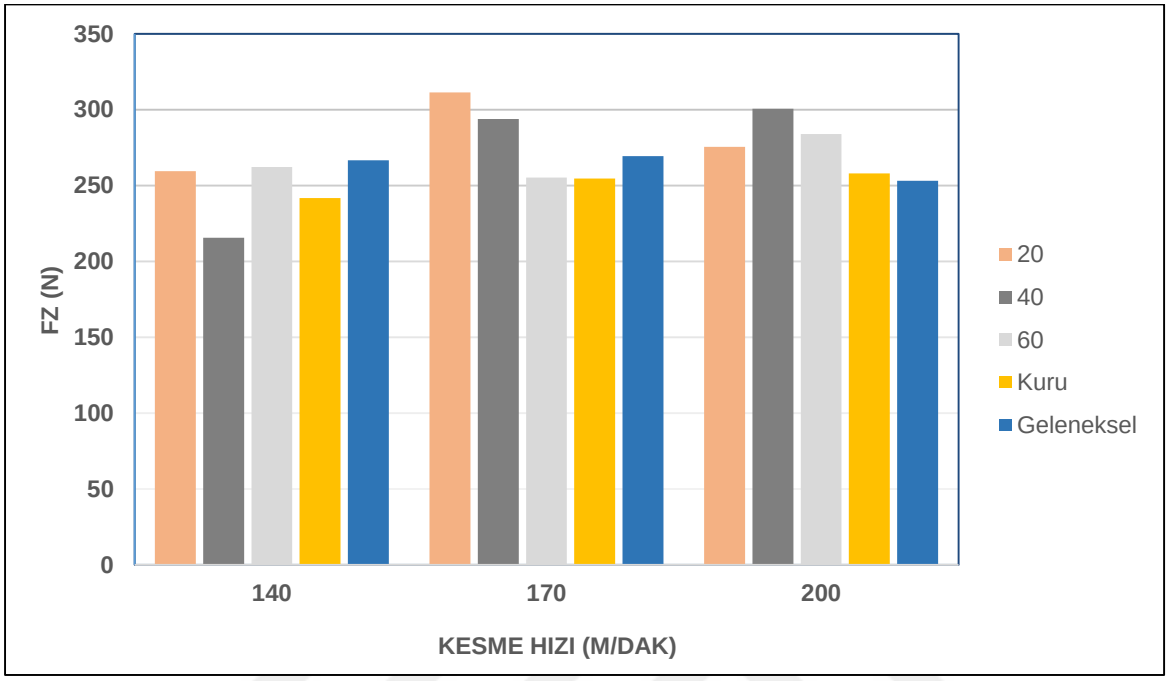
İlerleme oranı 0,15 mm/dev olarak artırıldığında,140 m/dak'da 20 bar için 379,1 N olan Fz değeri, 40 barda %22 azalarak 294,5 N'ye düşmüş; 60 barda %1 artarak 383,0 N olmuştur. 170 m/dak'da 434,0 N olan Fz, 40 barda %12,8, 60 barda %15,7 azalmıştır; en düşük değer 60 barda elde edilmiştir. 200 m/dak'da ise 273,1 N olan Fz, 40 barda %33,5 ve 60 barda %27,4 artmıştır. Elde edilen sonuçlar genel olarak, orta hıza kadar basınç artışının talaş sıkışmasını azaltıp Fz'yi düşürebildiğini, ancak yüksek kesme hızında, artan kesme bölgesi sıcaklığı ve talaş akışındaki düzensizlikler nedeniyle basınç artışı bazı koşullarda Fz değerlerinin yükselmesine neden olmuştur (Dhar ve ark., 2006).

0.2 mm/dev ilerleme oranında ise 140 m/dak'da 442,4 N olan Fz, 40 bar'da %19,7 azalarak 355,3 N'ye inerken, 60 barda %6,3 artarak 470,2 N'ye çıkmıştır. 170 m/dak'da 519,9 N olan Fz, 40 barda %17,5, 60 barda %7,9 azalmıştır. 200 m/dak'da 295,8 N olan Fz, 40 barda %58,5, 60 barda %36,6 artmıştır; yani yüksek hız–yüksek ilerlemede basınç artışı Fz'yi belirgin biçimde yükseltmiştir.

Elde edilen bulgular, optimum basınç değerinin kesme hızı ve ilerleme ile değiştiğini göstermektedir. Düşük hızda 40 bar, orta hızda 60 bar basınç en düşük itme kuvvetini sağlamış, yüksek hızda ise 20-60 bar aralığında belirgin bir üstünlük gözlenmemiştir. Bu durum, yüksek basınçlı soğutmanın özellikle orta kesme hızlarında ve düşük–orta ilerleme oranlarında talaş tahliyesini kolaylaştırarak kesme kuvvetlerini azalttığını, ancak aşırı ilerleme veya yüksek hızlarda etkinliğin sınırlanabileceğini göstermektedir.

YBS deneylerinden elde edilen bulgular, 0,1 mm/dev ilerleme oranının hem kuvvet hem de moment açısından optimum performansı sağladığını ortaya koymuştur. Bu nedenle sonraki aşamada, 0,1 mm/dev ilerleme oranı sabit tutularak kuru ve geleneksel soğutma

yöntemlerinin YBS'ye kıyasla performansları incelenmiştir. Bu karşılaştırmalı deneylere ait sonuçlar Şekil 8.2.'de sunulmuştur.



Şekil 8.2. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerine ait itme kuvveti sonuçları

Deney sonuçları genel olarak, kesme hızının artışıyla birlikte itme kuvvetinde düşüş eğilimi olduğunu, ancak bu etkinin soğutma stratejisine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Düşük kesme hızında (140 m/dak) özellikle 40 Bar YBS koşullarında ölçülen Fz değerinin kuru ve geleneksel koşullara göre belirgin şekilde düşük olması, yüksek basınçlı soğutmanın talaş bölgesine etkin şekilde nüfuz ederek sürtünme katsayısını azaltması ve takım-talaş arayüzünde sıcaklık artışını sınırlandırmasıyla açıklanabilir. Bu sonuç, YBS'nin kesme kuvvetlerini düşürdüğü yönündeki bulgularla uyumludur (Dhar ve ark., 2006; Kramar ve Kopač, 2009).

Kesme hızı 170 m/dak'ya yükseldiğinde 60 bar basınç altında itme kuvvetinin en düşük değere ulaştığı görülmüş; bu durum, artan talaş hacmine rağmen yüksek basınçlı akışın talaş tahliyesini iyileştirerek talaş sıkışmasını önlemesiyle ilişkilendirilebilir.

Ancak 200 m/dak kesme hızında YBS'nin avantajı azalmış, etkileşim süresinin kısalması ve soğutma sıvısının talaş altına erişim süresinin azalması nedeniyle kuru ve geleneksel

koşullarda ölçülen kuvvetlerin YBS'ye yakın veya daha düşük değerlere ulaştığı gözlenmiştir (Oezkaya ve Biermann, 2018).

Basınç düzeyleri kıyaslandığında, düşük hızlarda 40 bar, orta hızlarda ise 60 bar basınç uygulamasıyla en düşük itme kuvvetlerinin elde edildiği görülmüştür. Özellikle 140 m/dak kesme hızında, 40 bar basınç altında ölçülen Fz değeri (215,6 N), 20 bar (259,6 N) koşuluna kıyasla yaklaşık %17 daha düşük olup, bu da YBS'nin talaş bölgesinde sürtünme ve sıcaklığı azaltarak kesme direncini düşürdüğünü göstermektedir. Ancak basınç 60 bar seviyesine çıkarıldığında, Fz değeri yeniden artarak 262,2 N'ye yükselmiş, bu da aşırı basıncın talaş tahliyesi bölgesinde türbülans oluşturarak kararlılığı azaltabileceğini düşündürmektedir. 170 m/dak hızda 20 bar'da 311,4 N olan kuvvet, 40 bar'da yaklaşık %5,6 azalarak 293,9 N'ye, 60 bar'da ise %18 azalarak 255,2 N'ye düşmüştür. Bu eğilim, artan basınçla birlikte jet momentumunun talaş sıkışmasını önlemesi ve takım–talaş arayüzünde sürtünmeyi azaltmasıyla açıklanabilir. 200 m/dak hızda ise 20 bar'da 275,6 N olan kuvvet, 40 bar'da %9 artarak 300,6 N'ye çıkmış, 60 bar'da ise yeniden %5 azalarak 283,9 N'ye düşmüştür. Bu sonuç, yüksek hızlarda jetin etki süresinin azalması ve sıvının talaş altına tam olarak ulaşamamasıyla ilişkilendirilmektedir (Oezkaya ve Biermann, 2018).

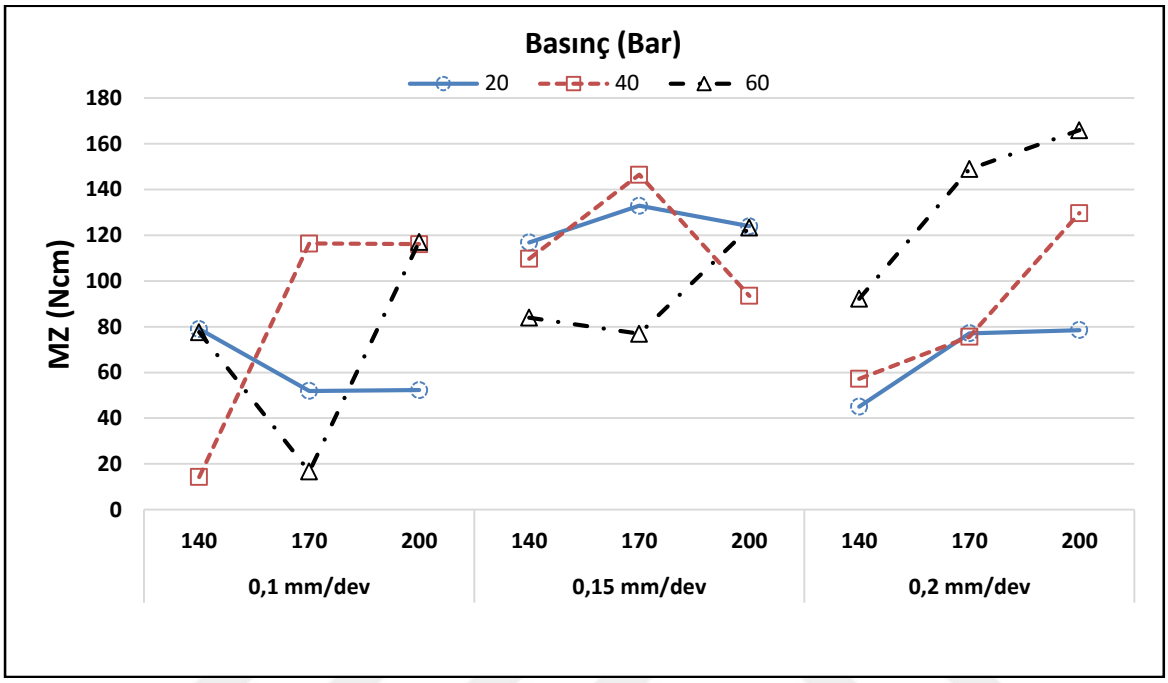
Genel olarak değerlendirildiğinde, optimum basınç değeri kesme hızıyla birlikte değişmektedir: düşük hızda 40 bar, orta hızda 55–60 bar aralığı en uygun sonucu vermiş, yüksek hızda ise basınç artışının etkisi sınırlı kalmıştır. Bu bulgular, yüksek basınçlı soğutmanın etkinliğinin sadece basınç artışına değil, aynı zamanda jet kararlılığı, talaş oluşum rejimi ve ısı birikimi gibi parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Dhar ve ark., 2006; Kramar ve Kopač, 2009).

8.2. Farklı Soğutma Koşullarının Kesme Momenti Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, yüksek basınçlı soğutma (YBS) koşullarında gerçekleştirilen deneylerde ölçülen kesme momenti (Mz) değerleri, kesme hızı, ilerleme ve basınç düzeyi açısından birlikte değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına ait moment değerleri Şekil 8.3.'te yer almaktadır.

Genel olarak Mz değerleri, kesme hızı ve ilerleme oranının artışıyla yükselme eğilimi göstermiştir. Bu durum, artan talaş kesitiyle birlikte dönme direncinin artması ve takımın

maruz kaldığı sürtünme momentinin büyümesiyle ilişkilidir (Cuesta ve ark., 2016; Yılmaz, 2022). Ancak moment değişimi yalnızca ilerlemeyle değil, soğutma basıncıyla da doğrudan etkilenmiştir.



Şekil 8.3. YBS deneylerine ait kesme momenti sonuçları

0,1 mm/dev ilerleme oranında, 140 m/dak kesme hızında, 20 bar basınçta ölçülen moment yaklaşık 79 Ncm iken, 40 bar basınçta %82 azalarak 14,2 Ncm'ye düşmüş, 60 bar basınçta ise tekrar yükselerek 77,6 Ncm seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, 40 bar basınçta etkin soğutma ve yağlayıcılığın sürtünmeyi azaltmasıyla açıklanabilirken, 60 bar basınçta artan sıvı debisinin talaş bölgesinde türbülans oluşturup sürtünmeyi yeniden artırmasıyla ilişkilendirilebilir.

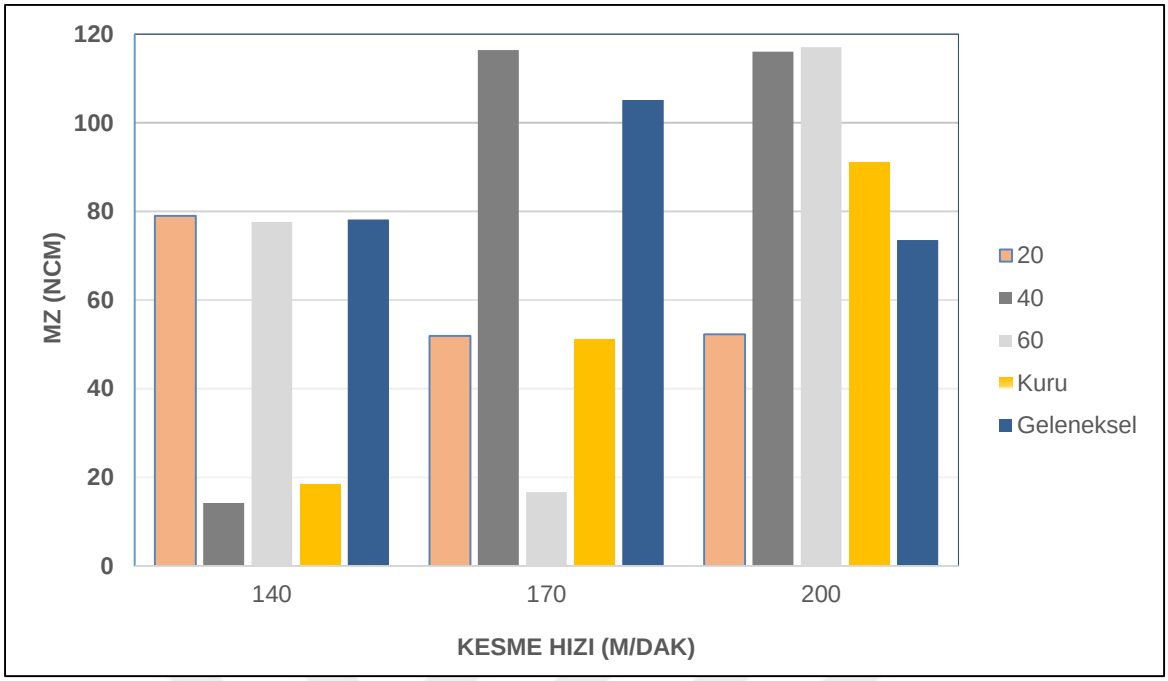
170 m/dak kesme hızında, 20 bar basınçta 51,9 Ncm olan moment, 40 barda yaklaşık %124 artış göstererek 116 Ncm seviyesine yükselmiş, 60 barda ise 17 Ncm civarına gerilemiştir. Bu değişim, orta hızlarda 40 bar akışın kesme bölgesini soğuturken yağlayıcılık açısından yetersiz kalması, dolayısıyla alüminyumun takım yüzeyine yapışma eğiliminin artmasıyla margin sürtünmesinin büyümesi sonucunda momentin yükselmesi şeklinde açıklanabilir (Astakhov, 2006). Buna karşın 60 bar basınçta artan sıvı akışıyla daha kararlı bir yağ film tabakasının oluşması ve talaş tahliyesinin iyileşmesi, moment değerlerinde belirgin düşüş sağlamıştır.

200 m/dak kesme hızında ise 20 bar koşulunda 52,3 Ncm olan moment, 40 barda yaklaşık %122 artışla 116 Ncm'ye, 60 barda ise %44 artışla 117 Ncm'ye ulaşmıştır. Bu artış, yüksek kesme hızında jetin kesme bölgesine ulaşma süresinin kısalması ve sıvının ısıl kontrol etkisinin zayıflamasıyla açıklanabilir (D'Addona ve Raykar, 2019).

İlerleme oranı 0,15 mm/dev'e çıkarıldığında, kesme momenti (Mz) değerlerinde genel olarak artan talaş kesitiyle ilişkili olarak yüksek seviyeler gözlenmiştir (Yılmaz, 2022). 140 m/dak kesme hızında, 20 bar basınçta ölçülen moment 116,8 Ncm iken, 40 bar koşulunda bu değer yaklaşık %6 oranında azalarak 109,7 Ncm'ye düşmüş, 60 bar basınçta ise yaklaşık %28 oranında daha belirgin bir azalma ile 83,9 Ncm seviyesine gerilemiştir. 170 m/dak kesme hızında 132,9 Ncm olan moment, 40 bar basınçta %10,9 artışla 146,5 Ncm, 60 barda ise %7 azalarak 76,9 Ncm değerine gerilemiştir. Bu durum, orta hızda 60 bar basınç altında yağ film kalınlığının artması ve talaş tahliyesinin iyileşmesiyle sürtünmenin azalması sonucu momentin düşmesiyle açıklanabilir. 200 m/dak kesme hızında ise 20 bar basınçta 124,0 Ncm olan moment, 40 bar koşulunda yaklaşık %25 azalarak 93,5 Ncm'ye düşmüş, 60 bar basınçta ise 123,3 Ncm değeriyle başlangıç seviyesine oldukça yakın kalmıştır. Bu sonuç, yüksek kesme hızlarında basınç değişiminin moment üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

İlerleme oranı 0,20 mm/dev'de ise moment değerleri genel olarak yükselmiş, bu da artan talaş hacmi ve deformasyon miktarıyla ilişkilendirilmiştir. 140 m/dak'da 45,1 Ncm olan moment, 40 bar basınçta %26,6 artışla 57,1 Ncm, 60 barda ise %2,7 artışla 92,2 Ncm olmuştur. 170 m/dak'da 77,1 Ncm olan moment, 40 barda %1,2 azalarak 75,6 Ncm, 60 bar'da %93 artarak 149,0 Ncm seviyesine ulaşmıştır. 200 m/dak'da ise 78,5 Ncm olan moment, 40 barda %58 artarak 129,7 Ncm, 60 barda %111 artarak 165,9 Ncm olmuştur. Bu sonuçlar, yüksek ilerleme ve hızlarda basınç artışının, talaşın hızlı akışıyla birlikte oluşan oluk içi sıvı sıkışması ve margin sürtünmesinin artışı nedeniyle dönme direncini yükselttiğini göstermektedir (Ashaktov, 2006).

Genel olarak değerlendirildiğinde, YBS sisteminde momentin düşürülmesinde optimum basınç ve hız kombinasyonunun belirlenmesi kritik öneme sahiptir; basınç artışı belirli bir eşiğe kadar iyileştirici etki gösterirken, bu eşiğin üzerinde soğutma-yağlama dengesi bozulmakta ve moment değerleri tekrar artış eğilimi göstermektedir. YBS, kuru ve geleneksel dıştan soğutma yöntemlerine ait moment grafiği Şekil 8.4.'te verilmiştir.



Şekil 8.4. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerine ait kesme momenti sonuçları

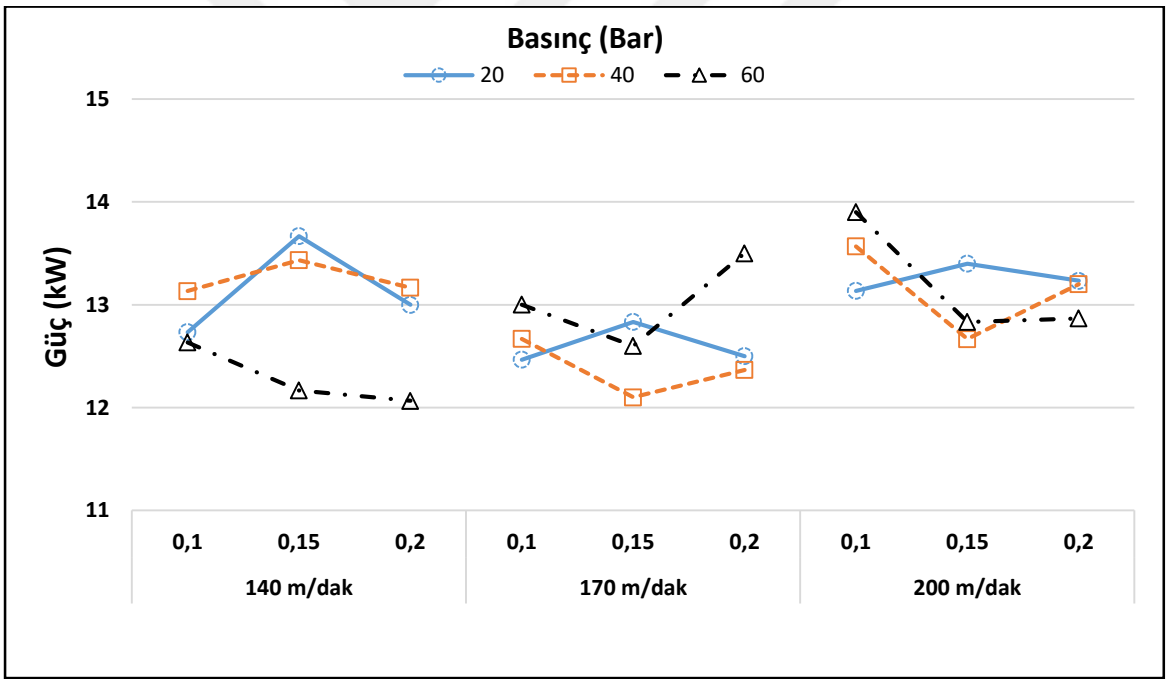
Elde edilen sonuçlara göre Mz değerleri, kesme hızı ve soğutma basıncına bağlı olarak farklı eğilimler göstermiştir. Düşük kesme hızında (140 m/dak) 40 bar YBS koşulunda momentin en düşük değere (14,24 Ncm) ulaştığı, buna karşın 20 ve 60 bar basınçta moment değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği görülmüştür. Bu durum, düşük hızlarda yüksek basınçlı soğutma uygulamasının talaş bölgesine tam olarak nüfuz etmemesi nedeniyle etkili bir soğutma sağlayamamasıyla ve dolayısıyla momentin artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Aynı hızda kuru ve geleneksel koşullarda elde edilen Mz değerleri (18,48 ve 78,12 Ncm) YBS'ye göre daha yüksek olup, özellikle geleneksel sistemde düşük basınçlı sıvının kesme bölgesine sınırlı ulaşabilmesi, sürtünme momentini artırmıştır (Dhar ve ark., 2006).

Kesme hızı 170 m/dak'ya çıkarıldığında, moment değerlerinin genel olarak arttığı, ancak 60 bar basınç altında en düşük Mz'nin (16,64 Ncm) elde edildiği görülmektedir. Bu eğilim, artan kesme hızıyla birlikte talaş hacmi ve ısıl yükün artmasına rağmen yüksek basınçlı soğutmanın talaş sıkışmasını önlemesi ve takım yüzeyinde oluşan sürtünmeyi azaltmasıyla açıklanabilir. 40 bar basınç altında momentin 116,39 Ncm seviyesine yükselmesi ise içten soğutmanın bu basınç seviyesinde kesme bölgesini yeterince soğutarak malzeme akma dayanımını artırmasına karşın yağlayıcılık/film etkisinin sınırlı kalmasıyla margin sürtünmesinin büyümesi sonucu ortaya çıkmış olabilir.

200 m/dak kesme hızında ise moment değerleri genel olarak daha yüksek seyretmiş, 40 ve 60 bar koşullarında birbirine yakın yüksek değerler (116,08-117,08 Ncm) elde edilmiştir. Bu sonuç, yüksek hızlarda jet akışının kesme bölgesine etki süresinin azalması ve sıvının talaş altına ulaşamamasıyla açıklanabilir. Buna karşın kuru (91,15 Ncm) ve geleneksel (73,54 Ncm) koşullarda ölçülen moment değerleri, jet etkisinin sınırlı kaldığı bu hızda daha düşük bulunmuştur.

8.3. Farklı Soğutma Koşullarının Güç Tüketimi Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde tezgâh üzerinden ölçülen güç değerleri incelenmiştir. Şekil 8.5.'te, YBS şartlarında elde edilen güç (kW) değerlerinin kesme hızı ve ilerleme oranına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 8.5. Güç tüketim değerleri grafiği

Grafik genel olarak, güç tüketiminin 12-14 kW aralığında seyrettiğini ve basınç, kesme hızı ile ilerleme parametrelerinin etkileşimiyle sınırlı fakat sistematik değişimler gösterdiğini ortaya koymaktadır.

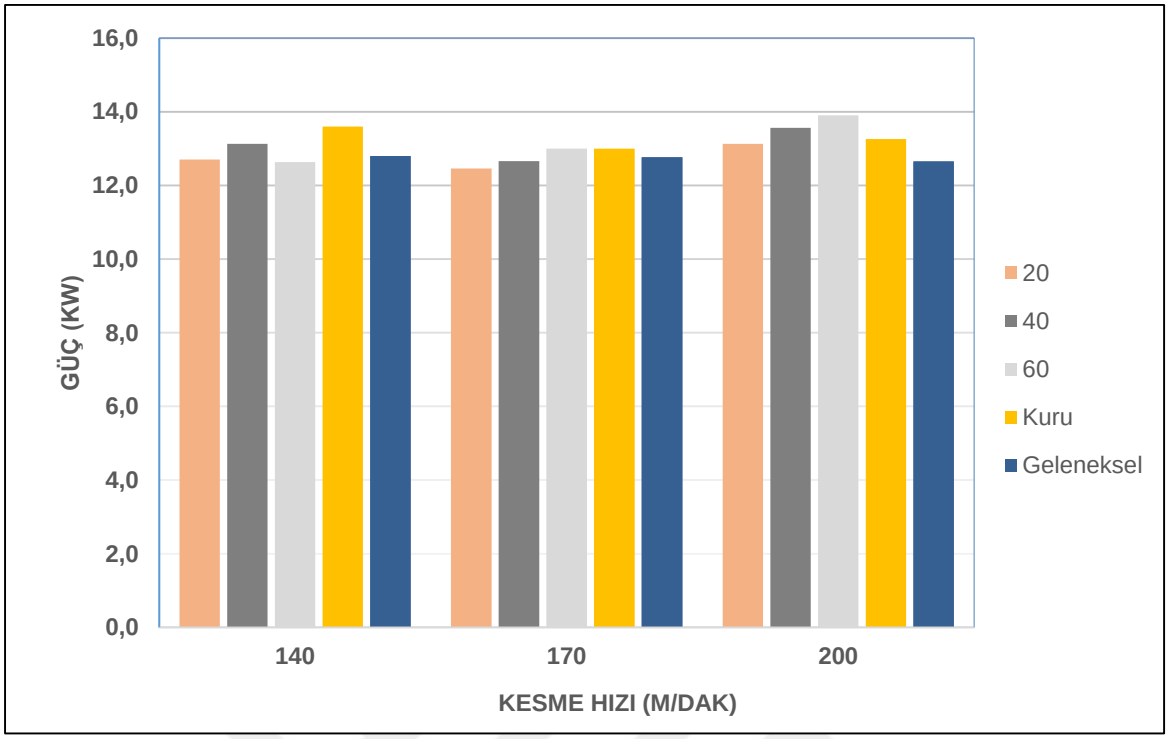
Öncelikle ilerleme oranına göre değerlendirildiğinde; 0,1 mm/dev ilerleme seviyesinde güç, basınç artışıyla belirgin şekilde değişmemekle birlikte 140 m/dak'da 12,73-13,13 kW, 200

m/dak'da ise 13,13-13,90 kW aralığında ölçülmüş; yani en yüksek hızda güç yaklaşık %10 artış göstermiştir. 0,15 mm/dev ilerleme seviyesinde güç daha stabil bir dağılım göstermiş, 140 m/dak'da 12,83-13,67 kW aralığındayken 170 m/dak'da tüm basınçlarda güç yaklaşık %5-8 azalmış, bunun nedeni bu hız seviyesinde talaş oluşumunun daha kararlı hale gelerek tork ihtiyacını azaltmasıdır. Ancak hız 200 m/dak'ya çıktığında güç tekrar %4-7 oranında artmıştır. 0,2 mm/dev ilerlemede ise talaş kesitinin büyümesi nedeniyle güç değerleri nispeten yükselmiş, özellikle 170 m/dak ve 60 bar koşullarında güç 13,50 kW'a çıkarak düşük hıza göre %11 artış göstermiştir. Bu artış, yüksek ilerleme-orta hız kombinasyonunda tork gereksiniminin yükselmesiyle ilişkilidir.

Kesme hızı açısından ele alındığında tüm ilerleme seviyelerinde benzer bir eğilim gözlenmiştir: 140 m/dak'dan 170 m/dak'ya geçişte güç çoğu durumda %3-7 oranında azalmış, ancak 170 m/dak'dan 200 m/dak'ya çıkıldığında güç yeniden %4-12 arası artmıştır. Bu çift yönlü davranış, düşük hızda artan sürtünme etkisinin 170 m/dak seviyesinde azaldığını ancak 200 m/dak'da iş mili yükünün hızla arttığını göstermektedir. Literatürde bildirilen, "orta hızlarda kesme daha kararlı olup güç gereksinimi düşerken, yüksek hızlarda enerji tüketimi tekrar yükselir" ifadesiyle uyumlu bir sonuçtur (Kramar ve Kopač, 2009).

Basınç düzeylerinin karşılaştırılmasında ise güç tüketimindeki değişimlerin sınırlı olduğu, çoğunlukla %2-6 aralığında seyrettiği görülmüştür. Düşük hızlarda (140 m/dak) 60 bar soğutma, 20 bar'a kıyasla güçte %2-4 azalma sağlamış; bu durum yüksek basıncın sürtünmeyi azaltarak mil yükünü hafifletmesiyle ilişkilendirilebilir. Buna karşın 0,1 mm/dev ilerleme değerinde, yüksek hızlarda (200 m/dak) 60 bar basınç altında güç 13,90 kW'a ulaşarak 20 bar koşuluna göre %6-11 artış göstermiştir; bunun nedeni YBS'nin yüksek hızda kesme bölgesine daha kısa temas süresine sahip olması ve soğutmanın tork azaltıcı etkisini tam olarak gösterememesidir. Fakat 0,15 ve 0,2 mm/dev ilerleme oranlarında aynı kesme hızında (200 m/dak) güç artışı gözlenmemiş; tersine 60 bar basınç altında 20 bar'a göre güç tüketimi %4-6 oranında azalmıştır.

Güç tüketimi, Fz ve Mz kadar keskin değişimler göstermese de ilerleme oranı, kesme hızı ve basınç arasındaki etkileşimle düzenli bir davranış sergilemiştir. Güç değerlerinin en düşük olduğu bölge genellikle 170 m/dak kesme hızı ve orta basınç (40-60 bar) seviyeleri olurken; en yüksek güç tüketimi 200 m/dak yüksek hız ve yüksek basınç (60 bar) koşullarında ortaya çıkmıştır.



Şekil 8.6. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin güç tüketimine etkisi

Şekil 8.6.'da soğutma yöntemlerinin güç tüketimi üzerindeki etkisi karşılaştırmalı şekilde gösterilmiştir. Düşük kesme hızında (140 m/dak), YBS uygulamaları arasında güç değerleri 12,63-13,13 kW aralığında değişirken, kuru koşulda güç 13,60 kW ile en yüksek düzeyde ölçülmüştür. Bu değer, 20 bar YBS'ye göre yaklaşık %7 artış anlamına gelmektedir. Bu durum kuru kesmede sürtünmenin artması, takım-talaş arayüzünde ısıl yükün yükselmesi ve buna bağlı olarak iş mili tork ihtiyacının artmasıyla ilişkilendirilebilir) (Sharma ve Sidhu, 2014). Geleneksel soğutma ise 12,80 kW ile YBS'ye yakın bir performans sergilemiş; soğutma akışkanının düşük basınçlı olması nedeniyle sürtünmeyi azaltma kapasitesi sınırlı kalmıştır.

Kesme hızının 170 m/dak'ya yükselmesiyle birlikte benzer bir eğilim devam etmiş, YBS sisteminde güç tüketimi 12,46-13,00 kW arasında kalırken kuru kesmede 13,13 kW ile nispeten daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Geleneksel soğutma bu hızda 12,76 kW ile YBS'ye yakın bir değer üretmiş, ancak özellikle 60 bar YBS'nin sağladığı daha düşük sürtünme etkisi sayesinde güç tüketimi bu yöntemde daha stabil bir seviyede kalmıştır.

Kesme hızının 200 m/dak olduğu koşulda ise güç tüketimindeki farklar daha belirgin hâle gelmiştir. 60 bar YBS altında güç 13,90 kW'a yükselmiş ve 20 bar YBS'ye kıyasla %6-11

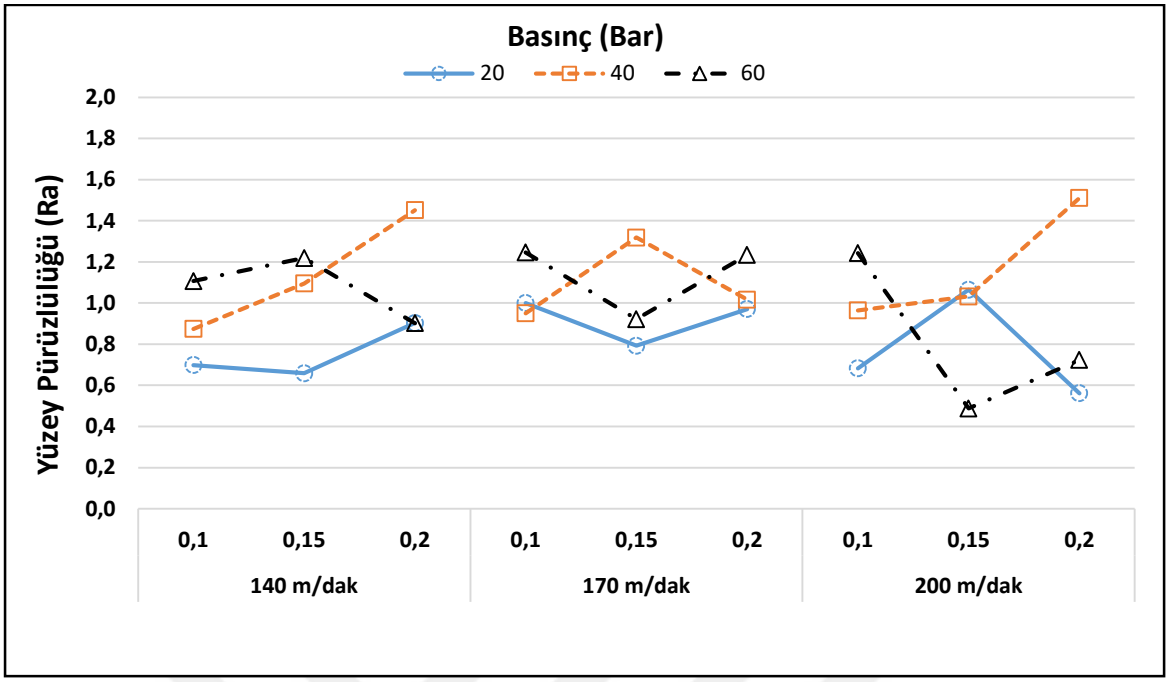
artış göstermiştir. Buna karşın kuru kesmede 13,26 kW ölçülmesi, YBS'nin bu hız–ilerleme kombinasyonunda bile tamamen olumsuz bir etki yaratmadığını, ancak tork azaltma kapasitesinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Geleneksel soğutma ise 12,65 kW ile tüm yöntemler arasında en düşük güç değerini göstermiştir; bunun nedeni yüksek hızda ince talaşların sıvı tarafından daha kolay taşınması ve sürtünmenin belirli ölçüde azalmasıdır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, YBS düşük ve orta hızlarda güç tüketimini stabilize ederken, yüksek hız-düşük ilerleme kombinasyonunda enerji tüketiminde artışa neden olabilmektedir. Kuru kesme tüm hızlarda en yüksek güç değerlerini üretmiş, bu da sürtünme ve ısıl yük kontrolünün enerji gereksinimi üzerindeki belirleyici rolünü doğrulamaktadır. Geleneksel soğutma ise düşük basıncın getirdiği sınırlamalara rağmen özellikle yüksek hızlarda enerji açısından avantaj sağlamıştır. Bu sonuçlar, literatürde bildirilen "Güç tüketiminin kesme hızına bağlı olarak arttığı ve soğutma stratejisinin tork ihtiyacını doğrudan etkilediği" bulgularıyla tutarlıdır (Sreejith, 2008).

8.4. Farklı Soğutma Koşullarının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi

Talaşlı imalat işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü (R_a), işlenen yüzeyin fonksiyonel performansını doğrudan etkileyen en kritik kalite göstergelerinden biridir. Kesme bölgesindeki sıcaklık dağılımı, talaş oluşum mekanizması, kesme kuvvetleri ve soğutma koşullarının tamamı yüzey bütünlüğünü belirleyen temel parametrelerdir. Bu nedenle yüksek basınçlı soğutma sistemlerinde basınç düzeyi, kesme hızı ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 8.7.'de sunulmuş olup, farklı basınç seviyelerinde R_a değerlerindeki değişim ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 8.7. Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) sonuç grafiği

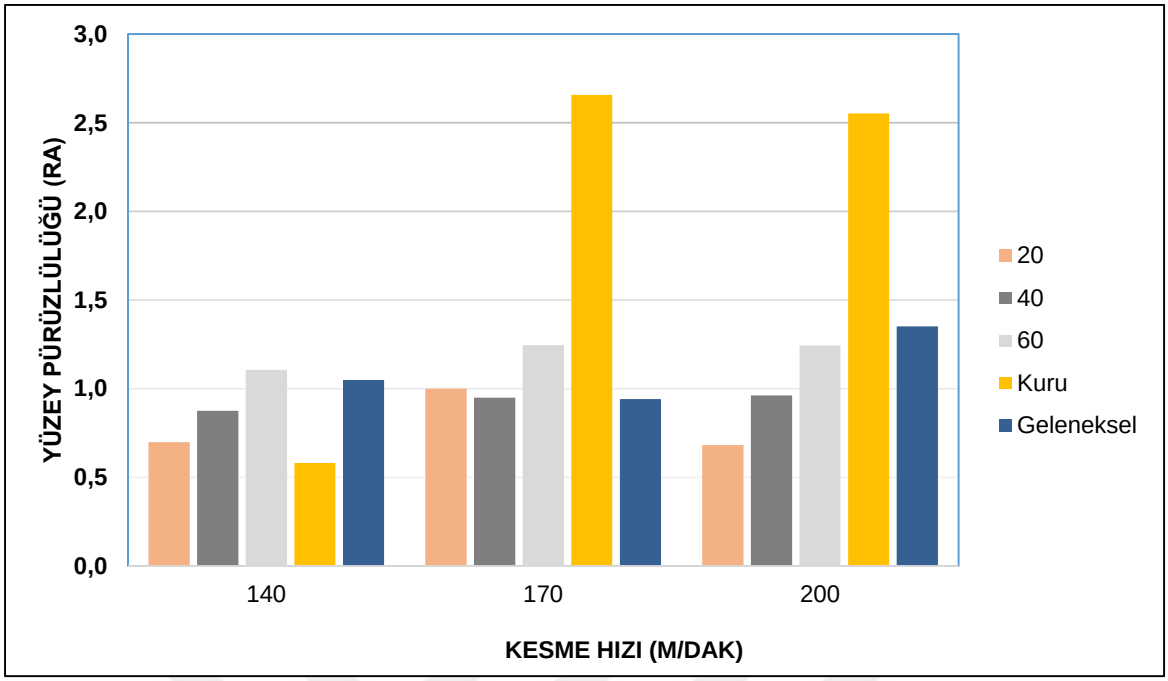
Elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları, soğutma basıncı, kesme hızı ve ilerleme oranı arasındaki etkileşimin yüzey kalitesi üzerinde belirgin bir rol oynadığını göstermektedir. Genel eğilim olarak, orta basınç düzeylerinin (40 bar) bazı hız ve ilerleme kombinasyonlarında yüzey kalitesini olumsuz etkilediği, buna karşın 20 ve 60 bar uygulamalarının çoğu durumda daha düşük R_a değerleri sağladığı görülmektedir. Düşük ilerleme ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü genel olarak 0,7-1,3 µm aralığında gerçekleşmiştir.

Düşük ilerleme (0,1 mm/dev) ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü genel olarak 0,7-1,1 µm aralığında gerçekleşmiştir. 140 m/dak kesme hızında, 20 bar basınç altında R_a değeri 0,699 µm olarak ölçülürken, 40 bar basınçta bu değer 0,875 µm'ye yükselmiş, 60 bar koşulunda ise 1,107 µm ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu sonuç, düşük kesme hızında artan basıncın talaş-takım etkileşimini olumsuz yönde etkileyerek yüzey pürüzlülüğünü artırabildiğini göstermektedir. Kesme hızı 170 m/dak'ya çıkarıldığında, 40 bar basınç altında elde edilen R_a değeri 0,950 µm ile bu ilerleme oranında en düşük yüzey pürüzlülüğünü sağlamış; 20 bar ve 60 bar basınçlarda ise R_a sırasıyla 1,000 µm ve 1,245 µm olarak ölçülmüştür. Bu durum, orta kesme hızında 40 bar basıncın talaş tahliyesi ve yüzey oluşumu açısından daha dengeli bir soğutma-yağlama koşulu sunduğunu göstermektedir. 200 m/dak kesme hızında ise 20 bar basınç altında R_a değeri 0,682 µm'ye düşerek en iyi yüzey kalitesi

elde edilmiş, 40 bar ve 60 bar basınçlarda yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 0,963 µm ve 1,243 µm seviyelerine yükselmiştir. Yüksek kesme hızında artan basıncın yüzey pürüzlülüğünü artırması, yüksek hızlı akışın talaş yönlendirme stabilitesini bozması ve yüzeyde dalgalı bir iz oluşumuna neden olmasıyla ilişkilendirilebilir (Yılmaz, 2022).

0,15 mm/dev ilerleme oranında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin basınca bağlı değişimleri daha belirgin hâle gelmiştir. 140 m/dak kesme hızında, 20 bar basınç altında R_a değeri 0,659 µm olarak ölçülürken, 40 bar uygulamasıyla yüzey pürüzlülüğü yaklaşık %66 artarak 1,095 µm'ye yükselmiş, 60 bar basınçta ise 1,219 µm ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu sonuç, düşük kesme hızında artan basıncın talaş-takım etkileşimini olumsuz yönde etkileyebildiğini göstermektedir. Kesme hızı 170 m/dak'ya çıkarıldığında, 40 bar basınç altında R_a değeri 1,318 µm ile bu ilerleme oranında en kötü yüzey kalitesini üretmiştir. Buna karşın 60 bar basınç altında yüzey pürüzlülüğü 0,922 µm'ye düşerek 40 bar'a kıyasla yaklaşık %30 oranında iyileşme sağlamıştır. Bu durum, orta kesme hızında yüksek basıncın talaş tahliyesini iyileştirerek takım-iş parçası temasındaki düzensizlikleri azalttığını göstermektedir. 200 m/dak kesme hızında ise 20 bar ve 40 bar basınçlarda R_a değerleri sırasıyla 1,065 µm ve 1,032 µm seviyelerinde ölçülmüş, 60 bar basınç altında yüzey pürüzlülüğü belirgin biçimde azalarak 0,487 µm'ye düşmüştür. Bu sonuç, yüksek hız-orta ilerleme koşullarında 60 bar basıncın talaş tahliyesini daha etkin hâle getirerek daha düzgün bir yüzey oluşumunu desteklediğini göstermektedir.

0,2 mm/dev ilerlemede ise yüzey pürüzlülüğündeki değişimler daha belirgin hâle gelmiştir. 140 m/dak hızda, basınç artışının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi oldukça sınırlıdır. 20 bar (0,903 µm) ve 60 bar (0,902 µm) arasında ihmal edilebilir düzeyde fark bulunmuştur. 40 bar basınç altında yüzey pürüzlülüğü 1,451 µm olarak ölçülmüş; 20 ve 60 bar koşuluna kıyasla yaklaşık %61 oranında daha kötü bir yüzey elde edilmiştir. 170 m/dak kesme hızında, 60 bar basınç altında yüzey pürüzlülüğü 1,234 µm ile en yüksek değer olarak ölçülmüş ve en kötü yüzeyi üretmiştir. 40 bar ise 1,017 µm ile orta seviyede kalmış, en iyi yüzey 0,971 µm R_a ile 20 bar koşulunda elde edilmiştir. 200 m/dak kesme hızında, 20 bar basınç en düşük yüzey pürüzlülüğü olan 0,562 µm değeriyle en iyi yüzey kalitesini sağlamıştır. Bu değer, 60 bar basınca göre yaklaşık %22 daha iyi, 40 bar basınca göre ise %63 oranında daha pürüzsüz bir yüzey anlamına gelmektedir. Bu kombinasyonda düşük basıncın daha stabil bir talaş akışı ve daha iyi bir yüzey bütünlüğü sağladığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8.8. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 8.8.'de, sabit ilerleme değerinde gerçekleştirilen deneylerde farklı soğutma koşullarının yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Farklı kesme hızları ve soğutma yöntemleri altında elde edilen ölçümler, yüzey kalitesinin hem uygulanan basınca hem de soğutma stratejisine duyarlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

140 m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülüğünün soğutma koşullarına göre belirgin biçimde değiştiği görülmüştür. En düşük R_a değeri kuru kesimde (0,582 µm) elde edilmiş olup, bu değer 20 bar YBS'ye kıyasla yaklaşık %17 daha iyi yüzey sağlamıştır. 20 bar YBS koşulu 0,699 µm ile kuru kesime göre daha yüksek bir R_a değeri üretirken, 40 bar ve 60 bar uygulamalarında yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 0,875 µm (%25 artış) ve 1,107 µm (%58 artış) seviyesine yükselmiştir. Bu artış, düşük hızlarda yüksek basınçlı akışın talaş bölgesinde türbülans yaratarak yüzey stabilitesini bozmasıyla ilişkilendirilebilir (Shete ve Sohani, 2020). Geleneksel soğutmada elde edilen R_a değeri (1,049 µm) ise YBS'ye kıyasla daha yüksek olup, düşük hızlarda konvansiyonel soğutmanın yeterli ısıl kontrol sağlayamaması yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir.

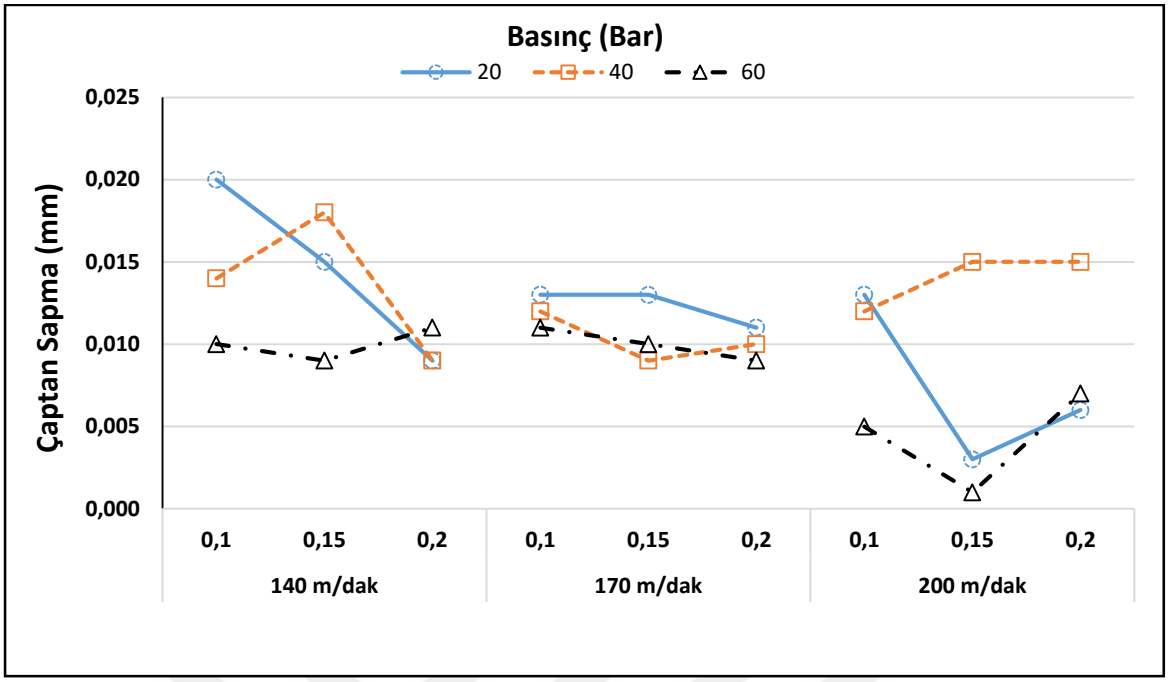
170 m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin soğutma türüne göre değişimi daha karmaşık bir davranış göstermiştir. En düşük R_a değeri 40 bar basınç altında (0,950 µm) kaydedilmiş olup, 20 bar'a göre yaklaşık %5 iyileşme sağlamıştır. 20 bar YBS koşulu

1,000 µm ile orta düzeyde bir yüzey kalitesi sunarken, 60 bar uygulamasında R_a değeri 1,245 µm seviyesine yükselmiş ve yüzey kalitesi %25 oranında kötüleşmiştir. Geleneksel sıvı ile yapılan talaşlı imalatta R_a = 0,940 µm değeri elde edilmiş olup, bu değer tüm YBS basınçlarının çoğuna göre daha düşük bir pürüzlülük sunmuştur. Buna karşın kuru kesimde R_a değerinin 2,657 µm seviyesine çıkması, ısıl yükün artışı ve talaş birikimi nedeniyle yüzey bütünlüğünün ciddi şekilde bozulduğunu göstermektedir. Literatürde de ısıl kontrolün yetersiz olduğu kuru kesimde yüzey kalitesinin belirgin biçimde kötüleştiği rapor edilmektedir (Kamruzzaman ve Dhar, 2009).

200 m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülüğünün soğutma koşullarına duyarlılığı daha belirgin hâle gelmiştir. En düşük R_a değeri yine 20 bar YBS'de (0,682 µm) elde edilmiş olup, 40 bar koşuluna göre %29, 60 bar koşuluna göre %45 daha iyi yüzey üretmiştir. 40 bar basınç altında R_a değeri 0,963 µm olarak gerçekleşmiş ve yüzey kalitesi belirgin biçimde düşmüştür. 60 bar uygulamasında R_a = 1,243 µm değerine ulaşılması, yüksek basınçlı akışın talaş yönlendirme stabilitesini bozması ve kesme bölgesinde akış kararsızlığı oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir (Shete ve Sohani, 2020). Geleneksel soğutmada elde edilen R_a = 1,351 µm değeri, tüm YBS koşullarından daha yüksek olup, yüksek hızda geleneksel soğutmanın yüzey kalitesini korumakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Kuru kesimde R_a değerinin 2,553 µm olarak ölçülmesi ise yüksek hız–kuru kesim kombinasyonunda yüzey pürüzlülüğünün en olumsuz düzeye ulaştığını göstermektedir. Bu bulgu, literatürde yüksek hızlarda kesme bölgesindeki ani sıcaklık artışının yüzey kalitesini düşürdüğü yönündeki raporlarla uyumludur (Sreejith, 2008).

8.5. Farklı Soğutma Koşullarının Delik Çapı Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde farklı kesme hızları, ilerleme oranları ve soğutma basıncı altında ölçülen çaptan sapma değerleri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 8.9.'da sunulmuştur. Çaptan sapma, işlenen deliğin nominal çaptan ne kadar uzaklaştığını göstermektedir. Özellikle hassasiyet gerektiren uygulamalarda kritik bir kalite göstergesidir. Genel olarak düşük sapma değerleri daha stabil kesme, daha düşük kesme kuvveti dalgalanmaları ve termal genleşmenin kontrol altında tutulmasıyla ilişkilidir.



Şekil 8.9. Delik çapı değişim sonuç grafiği

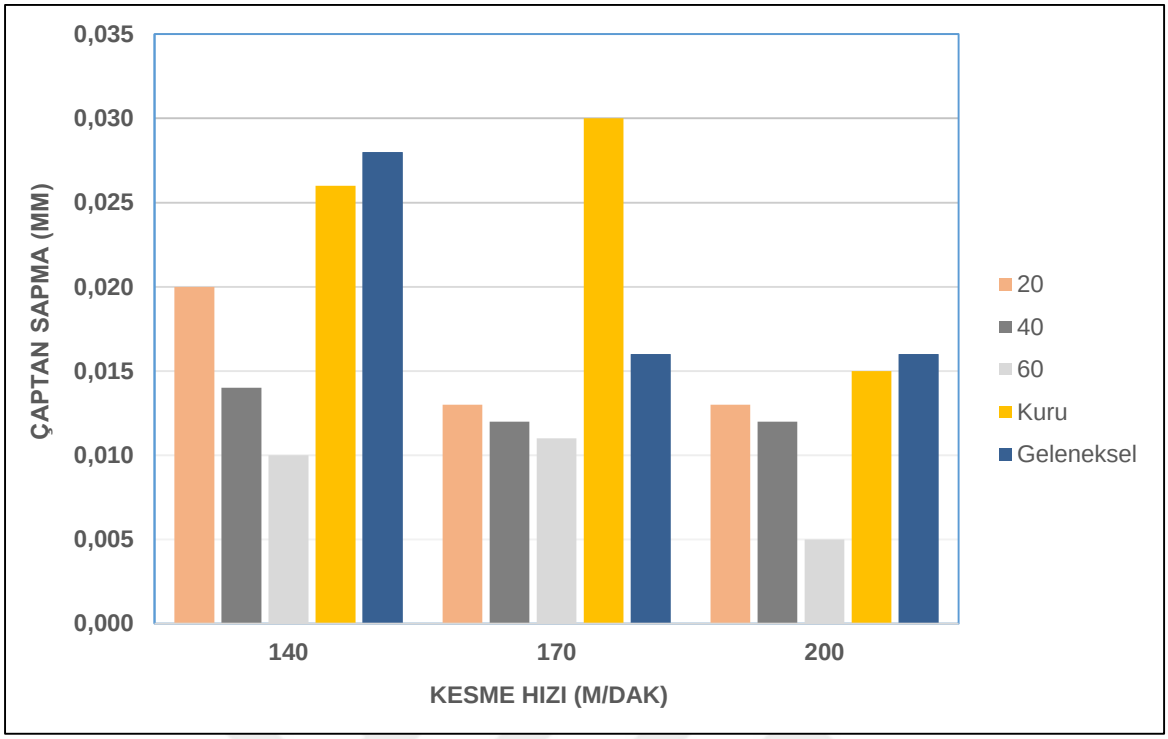
Öncelikle 0,1 mm/dev ilerleme oranında, 20 bar basınç seviyesinde sapma 140 m/dak kesme hızında 0,020 mm ile en yüksek değerine ulaşmış; hızın 170 ve 200 m/dak'ya yükselmesiyle sapmanın 0,013 mm seviyesine düşerek belirgin şekilde iyileştiği görülmüştür. Bu durum, düşük kesme hızında talaşın yapışma eğiliminin artması ve daha düzensiz talaş oluşumu nedeniyle takım-iş parçası temasının kararsız hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir (Batman, 2019). Aynı ilerleme oranında 40 bar basınç sonuçları daha dengeli olup 0,012-0,014 mm aralığında seyretmiş ve basıncın sapmayı sınırlı düzeyde iyileştirdiği görülmüştür. Buna karşın en düşük sapma değerleri 60 bar basınç altında elde edilmiş; özellikle 200 m/dak'da sapma 0,005 mm'ye kadar düşmüştür. Bu bulgu, yüksek basınçlı soğutmanın talaş sıkışmasını azaltarak takım yanal yüklerini düşürdüğünü ve delik geometrisinin daha hassas oluşmasına katkı sağladığını göstermektedir (Dhar ve ark., 2006).

0,15 mm/dev ilerleme oranında sapma davranışının daha farklı bir karakter sergilediği görülmektedir. Bu ilerleme düzeyinde 20 bar basınç altında sapma 140 m/dak'da 0,015 mm iken 200 m/dak'da 0,003 mm'ye kadar düşmüştür. Yüksek hızda elde edilen bu düşük değer, ilerlemenin artmasına rağmen kesme mekanizmasının daha kararlı hâle geldiğine işaret etmektedir. Ancak aynı koşullarda 40 bar basınçta sapma 140 m/dak'da 0,018 mm'ye yükselmiş ve bu değer ilerleme-basınç etkileşiminin hassas bir noktada olduğunu göstermiştir. Öte yandan 60 bar basınç seviyesinde sapmaların tüm hızlarda düşük kaldığı,

özellikle 200 m/dak'da 0,001 mm ile çalışmanın en iyi geometrik doğruluk değerinin elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç, yüksek basıncın talaş tahliye kapasitesi ve termal stabiliteyi belirgin biçimde iyileştirdiğini doğrulamaktadır.

0,2 mm/dev ilerleme oranı, artan talaş hacmi nedeniyle çaptan sapmanın daha belirgin hâle geldiği koşullardır. Bu ilerleme seviyesinde 20 bar basınç altında sapma değeri 140–200 m/dak arasında 0,009-0,006 mm aralığında değişmiş ve genel olarak orta düzeyde bir kararlılık sergilemiştir. 40 bar basınçta ise sapmaların dağılımı genişlemiş; özellikle 200 m/dak'da sapmanın 0,015 mm'ye yükselmesi, bu basıncın yüksek ilerleme-yüksek hız kombinasyonunda talaş akışını yeterince stabilize edemediğini göstermektedir. Buna karşılık 60 bar basınç seviyesinde sapma değerlerinin 0,011-0,007 mm aralığında kaldığı, yani tüm basınçlar arasında en tutarlı ve düşük sapmaların yüksek basınçta elde edildiği görülmüştür. Bu davranış, literatürde yüksek basınçlı soğutmanın kesme bölgesindeki talaş yükünü azalttığı ve takımın eksenel kaçınımını minimize ettiği yönündeki bulgularla tutarlıdır (Dhar ve ark., 2006).

Tüm ilerleme oranları birlikte değerlendirildiğinde, çaptan sapmanın hem basınç hem de hız ile doğrusal olmayan bir ilişki sergilediği; özellikle yüksek basınçta (60 bar) ve orta-yüksek hızlarda (170-200 m/dak) sapmanın minimuma indiği görülmektedir. Bu sonuçlar, yüksek basıncın talaş bölgesinde daha etkin bir akış sağlayarak kesme kuvveti dalgalanmalarını azalttığını ve delik geometrisini stabilize ettiğini göstermektedir.



Şekil 8.10. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin delik çap değerlerine etkisi

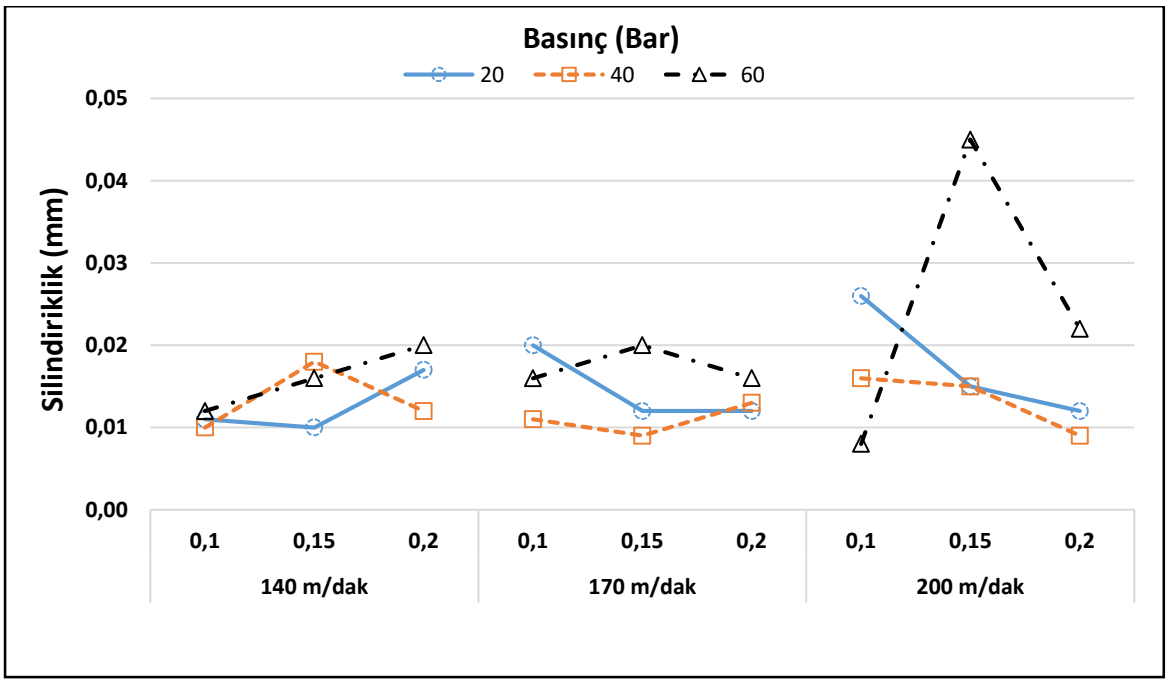
Sabit ilerleme oranında yapılan deneyler, soğutma koşullarının çaptan sapma üzerinde belirgin bir etkisi bulunduğunu göstermiştir. Yüksek basınçlı soğutma (YBS) koşullarında sapma değerleri tüm kesme hızlarında kuru ve geleneksel işleme yöntemlerine kıyasla daha düşük gerçekleşmiştir. Özellikle 60 bar YBS, 140 m/dak ve 200 m/dak hızlarında sırasıyla 0,010 mm ve 0,005 mm ile en düşük çap sapmalarını üretmiştir; bu değerler aynı hızlardaki kuru kesime göre yaklaşık %60-80 daha iyi geometrik doğruluk anlamına gelmektedir.

Kuru kesimde ise en olumsuz değerler gözlenmiş, 170 m/dak ve 200 m/dak hızlarında çap sapması sırasıyla 0,030 mm ve 0,015 mm seviyelerine ulaşmıştır. Geleneksel soğutma yöntemi kuru kesime göre daha iyi sonuçlar vermiş olsa da özellikle 140 m/dak ve 170 m/dak hızlarında YBS'ye göre yaklaşık 2-3 kat daha yüksek sapma üretmiştir. Bu fark, geleneksel soğutmanın kesme bölgesine etkin şekilde nüfuz edememesi ve ısıl kararlılığı YBS kadar iyileştirememesiyle açıklanmaktadır.

8.6. Farklı Soğutma Koşullarının Silindiriklik Değerleri Üzerindeki Etkisi

Silindiriklik, delik geometrisinin eksenden sapma miktarını ifade eden kritik bir ölçü kriteridir ve özellikle takım-iş parçası etkileşiminden kaynaklanan titreşim, ısıl etkiler, talaş

tahliyesi ve kesme kuvveti dengesizliklerine son derece duyarlıdır. Delme operasyonlarında silindiriklik hatasının artması, delik boyunca boyutsal tutarlılığın bozulmasına ve fonksiyonel uyumsuzluklara yol açabileceğinden, proses parametrelerinin bu hataya etkisinin doğru analiz edilmesi gerekmektedir. Silindiriklik değerleri Şekil 8.11.'de sunulmuştur.



Şekil 8.11. Silindiriklik değerleri sonuç grafiği

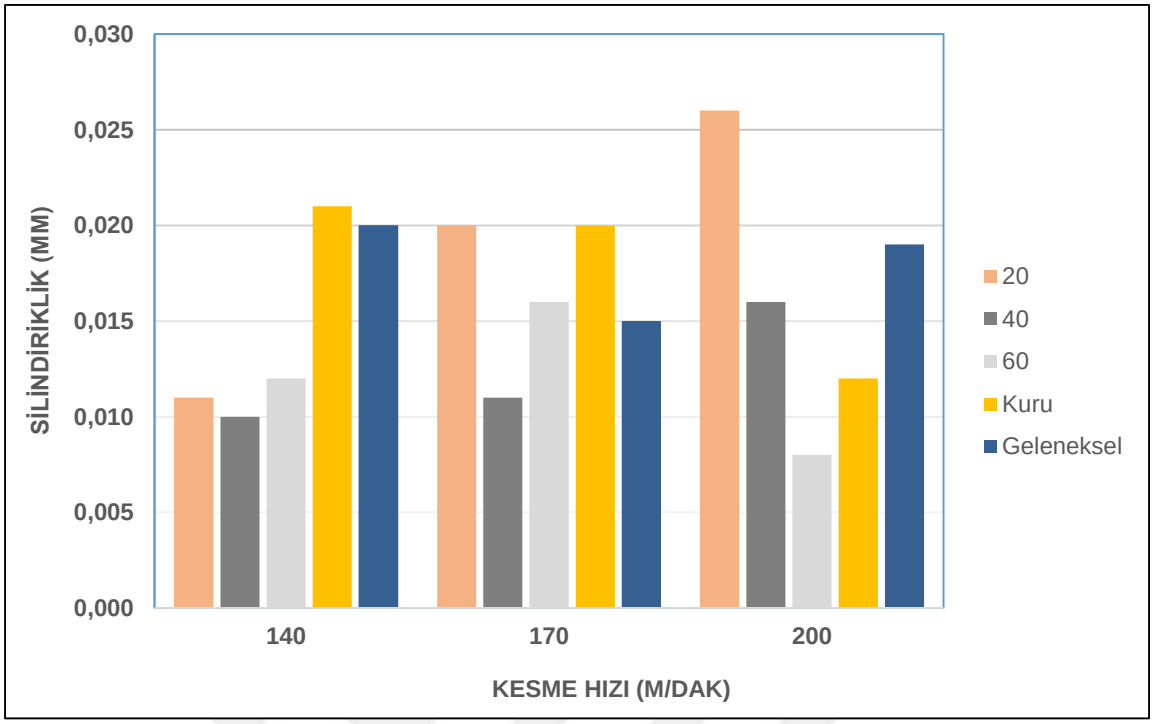
0,1 mm/dev ilerleme oranında 20 bar basınç altında silindiriklik değeri 140 m/dak hızda 0,011 mm iken 200 m/dak'da 0,026 mm'ye yükselmiştir. Bu artış, düşük basınç seviyesinin yüksek kesme hızında takım stabilitesini korumakta yetersiz kalabildiğine işaret etmektedir. Aynı ilerleme oranında 40 bar basınç en dengeli performansı sergilemiş ve değerler 0,010-0,016 mm aralığında kalmıştır. 60 bar basınç altında ise 200 m/dak hızda 0,008 mm ile tüm kombinasyonlar içerisinde en düşük silindiriklik hatası elde edilmiştir; bu durum yüksek basıncın bu hızda talaş tahliyesini iyileştirerek takım salınımını azaltabildiğini göstermektedir.

0,15 mm/dev ilerleme oranında silindiriklik davranışı basınca daha duyarlı hâle gelmiştir. 20 bar koşullarında değerler 0,010-0,015 mm arasında değişmiş ve düşük bir varyasyon göstermiştir. Buna karşın 40 bar basınç altında 170 m/dak hızda 0,009 mm ile oldukça iyi bir silindiriklik elde edilmiş olup orta basıncın takım kararlılığı açısından avantajlı olduğu

görülmektedir. 60 bar koşullarında 200 m/dak hızda silindiriklik değeri 0,045 mm'ye yükselerek belirgin bir bozulma oluşturmuştur.

0,2 mm/dev ilerleme oranında basınçların etkisi daha dengeli bir yapı göstermiştir. 20 bar basınç altında silindiriklik değerleri 0,012-0,017 mm arasında seyretmiş ve ilerleme artışına rağmen geometrik bütünlük korunmuştur. 40 bar basınçta 200 m/dak hızda 0,009 mm ile oldukça düşük bir değer ölçülmüş, bu da orta basıncın yüksek hızlarda bile delik geometrisini iyileştirebildiğini göstermektedir. 60 bar basınç altında ise silindiriklik 0,016–0,022 mm aralığında kalmış ve özellikle yüksek hızda artış eğilimi göstermiştir; bu durum yüksek basıncın delik içinde oluşturduğu hidrodinamik etkilerin takım sapmasına katkıda bulunabildiğini düşündürmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, silindiriklik hatasının ilerleme oranına sınırlı duyarlılık gösterdiği, esas olarak basınç ve kesme hızı kombinasyonlarından etkilendiği görülmektedir. Orta basınç seviyesi olan 40 bar çoğu durumda en kararlı ve düşük silindiriklik değerlerini üretmiş, 20 bar düşük basınç yüksek hızlarda geometrik doğruluğu korumakta zorlanmış, 60 bar ise bazı koşullarda iyileştirici etki gösterse de özellikle yüksek kesme hızlarında silindiriklik değerlerinde artışa sebep olmuştur. Bu bulgular, optimal delik geometrisi için basınç-hız dengesinin kritik olduğunu ve yüksek basıncın her zaman daha iyi sonuç üretmediğini göstermektedir.



Şekil 8.12. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin silindiriklik değerlerine etkisi

Sabit 0,1 mm/dev ilerleme oranında gerçekleştirilen deneylerde soğutma koşullarının silindiriklik üzerindeki etkileri incelendiğinde, kesme hızı ile birlikte soğutma stratejisinin delik geometrisi üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Şekil 8.12.'de sunulan sonuçlar, hem YBS basınç seviyeleri hem de kuru ve geleneksel koşullar arasında anlamlı farklar olduğunu ortaya koymaktadır.

140 m/dak kesme hızında en düşük silindiriklik değeri 40 bar YBS koşulunda 0,010 mm olarak elde edilmiştir. Aynı hızda 20 bar ve 60 bar basınç altında sırasıyla 0,011 mm ve 0,012 mm değerleri ölçülmüş olup, basınç artışıyla silindiriklikte belirgin bir iyileşme sağlanamamıştır. Kuru ve geleneksel koşullarda ise silindiriklik değerlerinin sırasıyla 0,021 mm ve 0,020 mm seviyelerine yükseldiği görülmüştür. Bu durum, soğutma sıvısı kullanılmayan veya geleneksel sistemlerde kesme bölgesinde oluşan ısıl genleşme ve sürtünme etkilerinin takım stabilitesini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

Kesme hızı 170 m/dak'ya çıkarıldığında, 40 bar YBS koşulunun 0,011 mm ile en düşük silindiriklik değerini sağladığı görülmektedir. 20 bar ve 60 bar basınçlarda bu değerler sırasıyla 0,020 mm ve 0,016 mm olarak ölçülmüştür. Aynı hızda kuru koşullarda silindiriklik 0,020 mm, geleneksel soğutma altında ise 0,015 mm seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu

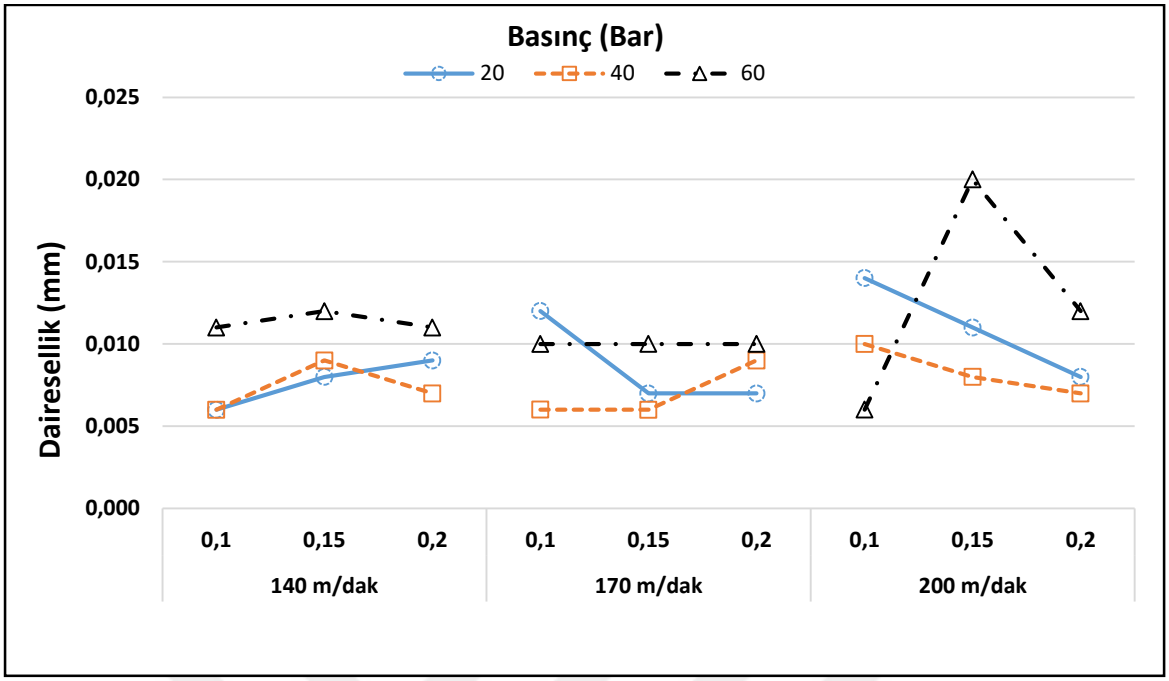
sonuçlar, orta kesme hızlarında orta basınç seviyesinin takım-iş parçası etkileşimini dengeleyerek eksenel sapmayı minimize edebildiğini göstermektedir.

200 m/dak kesme hızında soğutma koşulları arasındaki farklar daha belirgin hâle gelmiştir. 20 bar basınç altında silindiriklik değeri 0,026 mm ile en yüksek seviyeye ulaşırken, 60 bar YBS koşulunda 0,008 mm ile tüm deneyler arasında en düşük değer elde edilmiştir. 40 bar basınç altında ölçülen 0,016 mm'lik değer ise orta seviyede kalmıştır. Kuru ve geleneksel koşullarda sırasıyla 0,012 mm ve 0,019 mm silindiriklik değerleri ölçülmüş olup, özellikle yüksek hızda yüksek basınçlı soğutmanın delik geometrisini belirgin biçimde iyileştirdiği görülmektedir. Bu durum, yüksek hızlarda artan ısıl ve mekanik yüklerin ancak yeterli basınç altında etkin şekilde kontrol altına alınabildiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 0,1 mm/dev ilerleme oranında silindiriklik açısından en kararlı sonuçların çoğunlukla 40 bar YBS koşullarında elde edildiği, ancak yüksek kesme hızlarında (200 m/dak) 60 bar basıncın daha üstün bir performans sergilediği belirlenmiştir. Kuru ve geleneksel koşullar ise özellikle düşük ve orta hızlarda YBS'ye kıyasla daha yüksek silindiriklik hatalarına yol açmıştır. Bu bulgular, delme işlemlerinde soğutma koşulunun yalnızca yüzey kalitesi değil, aynı zamanda delik geometrik doğruluğu açısından da kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

8.7. Farklı Soğutma Koşullarının Dairesellik Değerleri Üzerindeki Etkisi

Dairesellik, deliğin teorik dairesel formdan sapma miktarını ifade eden ve özellikle takım eksenel kararlılığı, kesme kuvvetlerinin dengesi ve delik içi temas koşullarıyla yakından ilişkili bir geometrik toleranstır. Delme işlemlerinde dairesellik hatasının artması, delik–mil uyumu ve montaj hassasiyeti açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Dairesellik değerleri Şekil 8.13.'te sunulmuş olup, proses parametrelerinin delik geometrisi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.



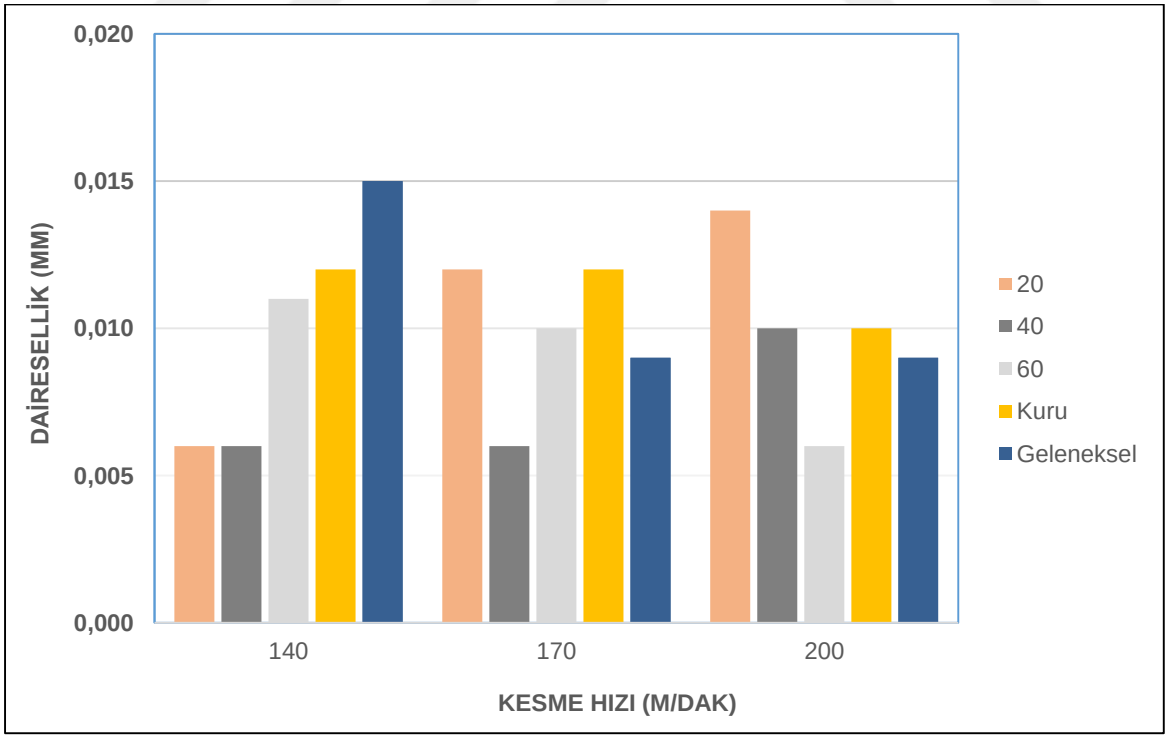
Şekil 8.13. Dairesellik değerleri sonuç grafiği

0,1 mm/dev ilerleme oranında gerçekleştirilen deneylerde, 20 bar basınç altında dairesellik değeri kesme hızının artışıyla birlikte 140 m/dak'da 0,006 mm'den 200 m/dak'da 0,014 mm'ye yükselmiştir. Bu durum, düşük basınç seviyesinde artan kesme hızıyla birlikte takım-iş parçası etkileşimindeki dinamik dengesizliklerin arttığını göstermektedir. Aynı ilerleme oranında 40 bar basınç, tüm hızlarda daha kararlı bir davranış sergilemiş ve dairesellik değerleri 0,006-0,010 mm aralığında kalmıştır. 60 bar basınç altında ise düşük ve orta hızlarda dairesellik değerleri görece yüksek seyretmiş, ancak 200 m/dak hızda 0,006 mm ile en düşük dairesellik değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, yüksek hızda yüksek basıncın delik içi talaş tahliyesini iyileştirerek takım merkezlenmesini olumlu yönde etkileyebildiğini göstermektedir.

0,15 mm/dev ilerleme oranında dairesellik değerlerinin genel olarak 0,006-0,020 mm aralığında değiştiği görülmektedir. 20 bar basınç altında dairesellik, kesme hızının artışıyla birlikte 0,008 mm'den 0,011 mm'ye yükselmiştir. 40 bar basınç, özellikle 170 m/dak hızda 0,006 mm ile en düşük dairesellik değerini üretmiş ve orta hız-orta basınç kombinasyonunun geometrik doğruluk açısından avantajlı olduğunu göstermiştir. Buna karşın 60 bar basınç altında 200 m/dak hızda dairesellik değerinin 0,020 mm'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek basıncın bu ilerleme ve hız kombinasyonunda delik içi akış koşullarını dengesizleştirerek takım üzerinde radyal sapmalara neden olabileceğini düşündürmektedir.

0,2 mm/dev ilerleme oranında ise dairesellik değerlerinin hız ve basınca bağlı olarak daha dengeli bir dağılım gösterdiği gözlenmiştir. 20 bar basınç altında dairesellik değerleri 0,007-0,009 mm aralığında kalmış ve kesme hızının etkisi sınırlı olmuştur. 40 bar basınç altında özellikle 140 ve 200 m/dak hızlarda 0,007 mm ile düşük dairesellik değerleri elde edilmiştir. 60 bar basınçta ise dairesellik değerleri 0,010-0,012 mm aralığında seyretmiş ve diğer basınç seviyelerine kıyasla daha yüksek kalmıştır. Bu sonuçlar, yüksek ilerleme oranında orta basıncın delik geometrisi açısından daha kararlı bir yapı sunduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, dairesellik hatasının ilerleme oranından ziyade kesme hızı-basınç etkileşimine daha duyarlı olduğu görülmektedir. 40 bar basınç seviyesi, çoğu ilerleme ve hız kombinasyonunda daha düşük ve kararlı dairesellik değerleri üretmiş, 20 bar düşük basınç özellikle yüksek hızlarda dairesellik hatasını artırmış, 60 bar ise bazı koşullarda iyileştirici etki gösterse de özellikle orta ilerleme-yüksek hız kombinasyonlarında geometrik doğruluğu olumsuz yönde etkilemiştir. Bu bulgular, delme işlemlerinde optimum dairesellik için basınç seviyesinin tek başına değil, kesme hızı ve ilerleme oranıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 8.14. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkisi

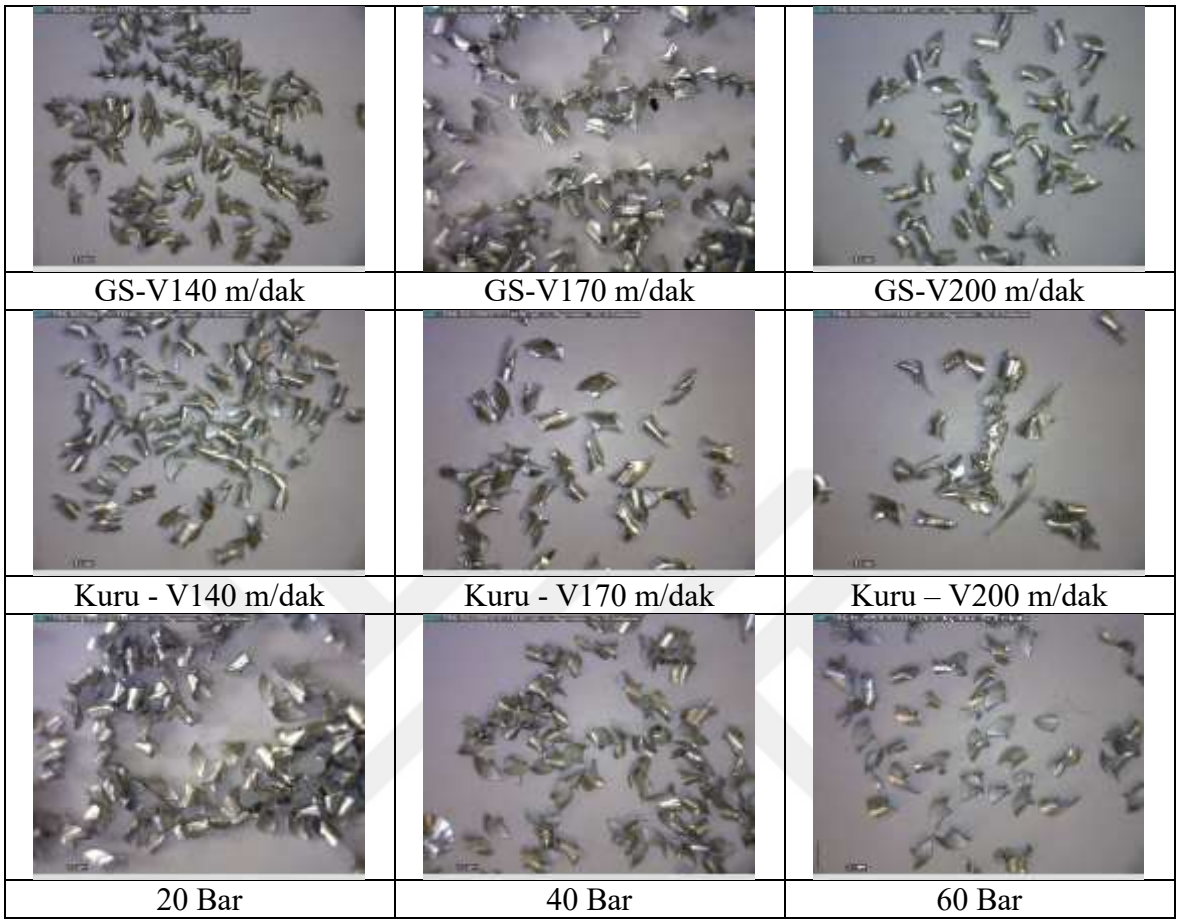
Sabit 0,1 mm/dev ilerleme oranında gerçekleştirilen deneylerde, soğutma koşullarının dairesellik üzerindeki etkileri Şekil 8.14.'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar, delik geometrisinin dairesel formdan sapmasının soğutma stratejisine bağlı olarak belirgin şekilde değiştiğini ve özellikle yüksek basınçlı soğutma koşullarının geometrik doğruluğu iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

140 m/dak kesme hızında, 20 ve 40 bar YBS koşullarında dairesellik değeri 0,006 mm olarak ölçülmüş ve bu değerler en düşük sapmayı temsil etmiştir. Aynı hızda 60 bar basınç altında dairesellik 0,011 mm'ye yükselirken, kuru ve geleneksel koşullarda sırasıyla 0,012 mm ve 0,015 mm değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, düşük kesme hızında yüksek basınç uygulanmasının dairesellik açısından ek bir avantaj sağlamadığını, buna karşın soğutma sıvısı kullanılmayan veya geleneksel sistemlerde takım merkezlenmesinin olumsuz etkilendiğini göstermektedir.

Kesme hızı 170 m/dak'ya çıkarıldığında, 40 bar YBS koşulunun 0,006 mm ile en düşük dairesellik değerini sağladığı görülmektedir. Aynı hızda 20 bar basınç altında dairesellik 0,012 mm'ye yükselmiş, 60 bar basınçta ise 0,010 mm olarak ölçülmüştür. Kuru ve geleneksel koşullarda elde edilen 0,012 mm ve 0,009 mm'lik değerler, YBS'ye kıyasla daha yüksek veya benzer seviyelerde kalmıştır. Bu durum, orta kesme hızında orta basınç seviyesinin takım-iş parçası temas koşullarını daha dengeli hâle getirerek dairesel form hatasını minimize ettiğini göstermektedir.

200 m/dak kesme hızında, 20 bar basınç altında dairesellik değeri 0,014 mm ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Buna karşılık 40 bar ve 60 bar YBS koşullarında dairesellik değerleri sırasıyla 0,010 mm ve 0,006 mm olarak ölçülmüş ve yüksek basıncın bu hızda belirgin bir iyileştirici etki sağladığı görülmüştür. Kuru ve geleneksel koşullarda ise dairesellik değerleri 0,010 mm ve 0,009 mm seviyelerinde kalmış, ancak özellikle 60 bar YBS koşulunun yüksek hızda en düşük sapmayı sağladığı dikkat çekmiştir. Bu sonuç, yüksek kesme hızlarında artan dinamik yüklerin ancak yeterli soğutma ve etkin talaş tahliyesiyle dengelenebildiğini göstermektedir.

8.8. Farklı Soğutma Koşullarının Talaş Boyutları Üzerindeki Etkisi



Resim 8.2. YBS, kuru ve geleneksel soğutma (GS) yöntemlerinin talaş boyutları üzerindeki etkisi

Resim 8.2.'de farklı soğutma koşulları ve kesme hızlarında elde edilen talaş morfolojileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görseller genel olarak değerlendirildiğinde, soğutma koşulu ve kesme hızındaki değişimin talaşların şekil, uzunluk ve kıvrılma şekli üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmektedir.

Geleneksel soğutma koşullarında elde edilen talaşlar incelendiğinde, 140 m/dak kesme hızında talaşların görece daha uzun, düzensiz kıvrımlı ve yer yer birbirine tutunma eğiliminde olduğu dikkat çekmektedir. Kesme hızının 170 m/dak ve 200 m/dak seviyelerine yükselmesiyle birlikte talaş boyutlarının kısaldığı, ancak kırılma davranışının tam olarak kararlı hâle gelmediği görülmektedir.

Kuru kesme koşullarında elde edilen talaşlar, özellikle düşük kesme hızında (140 m/dak) daha uzun, sürekli ve keskin kıvrımlı bir yapı sergilemiştir. Kesme hızının 170 ve 200 m/dak'ya çıkarılmasıyla talaşlar daha kısa parçalara ayrılmış olsa da talaş boyut dağılımının düzensiz olduğu ve kırılmanın kontrolsüz gerçekleştiği gözlenmektedir. Bu durum, kuru kesmede kesme bölgesinde artan sıcaklık ve yumuşayan malzeme davranışının, talaşın plastik deformasyonunu artırarak stabil talaş kırılmasını zorlaştırmasıyla ilişkilendirilebilir (Dahnel ve diğerleri, 2022). Nitekim kuru kesme koşullarında gözlenen bu düzensiz talaş yapısı, önceki bölümlerde rapor edilen yüksek yüzey pürüzlülüğü ve geometrik tolerans sapmalarıyla da uyumludur.

Yüksek basınçlı soğutma koşullarında elde edilen talaşlar incelendiğinde, talaş boyutlarının genel olarak daha kısa, kırık ve homojen dağılım gösterdiği görülmektedir. 20 bar basınç altında talaşların büyük ölçüde kırılmış olduğu, ancak bazı koşullarda boyut dağılımının tam olarak uniform olmadığı gözlenmiştir. Basınç seviyesinin 40 bar'a çıkarılmasıyla birlikte talaşların daha düzenli, küçük ve kontrollü parçalara ayrıldığı; 60 bar basınçta ise talaşların en kısa ve en düzenli forma ulaştığı, talaş uzunluklarının belirgin biçimde azaldığı ve talaşların birbirine tutunma eğiliminin minimum seviyeye indiği tespit edilmiştir.

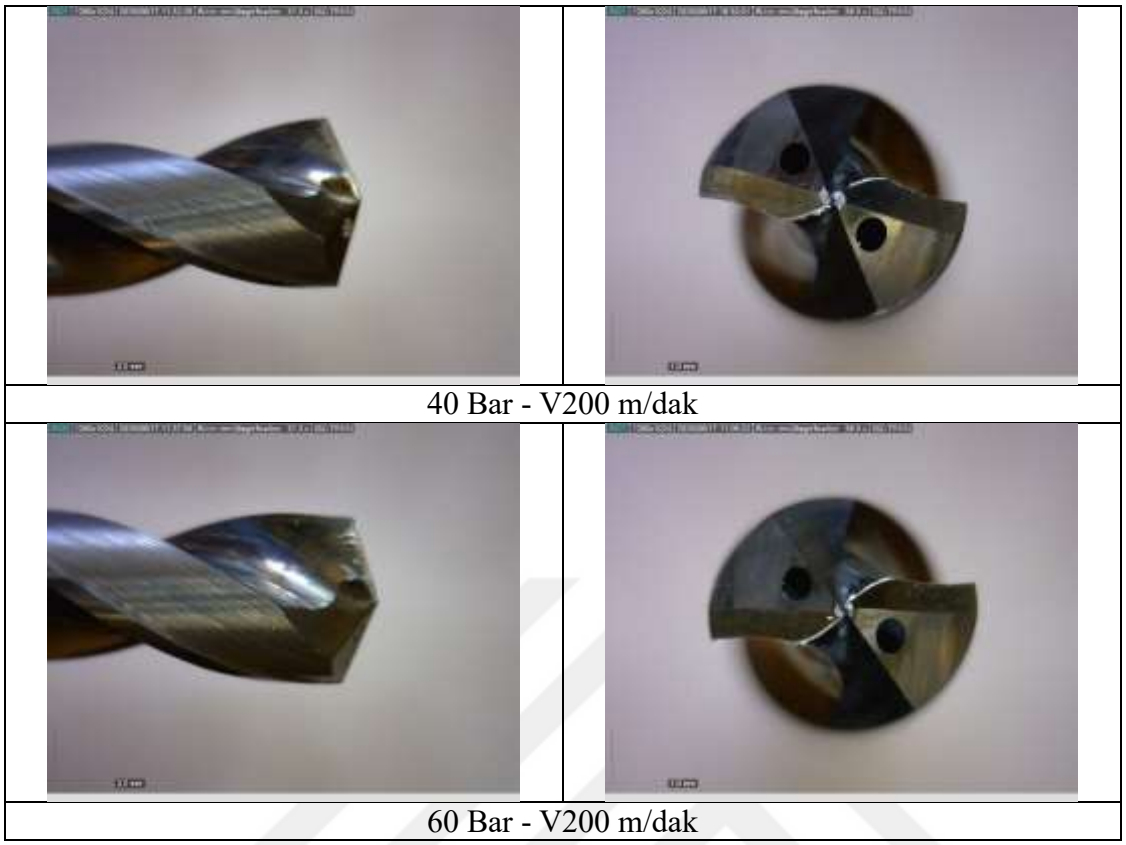
Genel olarak değerlendirildiğinde, talaş morfolojisi açısından en kararlı ve kontrollü yapının yüksek basınçlı soğutma koşullarında elde edildiği; kuru ve geleneksel soğutma koşullarında ise özellikle düşük kesme hızlarında talaş kontrolünün zayıfladığı görülmüştür. Bu durum, yüksek basınçlı soğutmanın yalnızca termal bir etki yaratmadığını, aynı zamanda talaş oluşum ve kırılma mekanizmasını da olumlu yönde etkileyerek işleme kararlılığını artırdığını göstermektedir.

8.9. Farklı Soğutma Koşullarının Kesici Takım Üzerindeki Etkisi

Resim 8.3.'te ilerleme oranının 0,1 mm/dev eşliğinde farklı soğutma koşulları ve kesme hızlarıyla yapılan deneylere ait takım görselleri sunulmuştur.



Resim 8.3. YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerine ait deneylerde kullanılan takım görselleri



Resim 8.3. (devam) YBS, kuru ve geleneksel soğutma yöntemlerine ait deneylerde kullanılan takım görselleri

Takım yüzeylerine ait optik görüntüler incelendiğinde, farklı soğutma koşulları altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda kesici takım üzerinde makroskopik ölçekte belirgin bir aşınma, yapışma veya uç kırılması oluşmadığı görülmektedir. Sıfır takım ile karşılaştırıldığında; kuru, geleneksel ve yüksek basınçlı soğutma (20-40-60 bar) koşullarında kullanılan matkapların ana kesici kenarları ve merkez bölgeleri geometrik bütünlüğünü büyük ölçüde korumuştur. Bu durum, Al 7075-T6 alaşımının yüksek işlenebilirliğe sahip olması, deneylerin sınırlı ilerleme oranları ve kontrollü kesme hızları altında gerçekleştirilmesi ve içten soğutmalı matkabın ısıl yükleri etkin şekilde sınırlandırmasıyla açıklanabilir. Kuru koşullarda kesici kenar yakınında yüzey parlaklığının nispeten azalması ve çok hafif yapışma izleri gözlenebilse de bu durum ölçülebilir düzeyde bir takım hasarına dönüşmemiştir. Yüksek basınçlı soğutma uygulanan koşullarda ise kesici yüzeylerin daha homojen bir görünüm sergilediği, bu durumun önceki bölümlerde rapor edilen daha düşük itme kuvveti, moment ve geometrik sapma değerleriyle tutarlılık gösterdiği değerlendirilmiştir. 40 ve 60 bar basınç seviyeleri arasında takım yüzeyi açısından belirgin bir fark gözlenmemesi, bu çalışmada yüksek basınçlı soğutmanın takım

aşınmasından ziyade kesme bölgesindeki ısıl ve mekanik etkileşimleri düzenleyerek proses kararlılığına katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

9. GRİ İLİŞKİ ANALİZİ VE İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRME

9.1. Gri İlişki Analizi

Bu çalışmada çoklu performans kriterlerinin birlikte değerlendirilmesi amacıyla Gri İlişki Analizi (GİA) uygulanmıştır. İtme kuvveti (Fz), kesme momenti (Mz), güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, silindiriklik ve dairesellik parametreleri analizde performans kriterleri olarak ele alınmıştır.

Öncelikle, YBS koşullarında gerçekleştirilen 27 deneyden elde edilen performans çıktıları GİA yöntemi ile bütüncül olarak değerlendirilmiştir. Gri ilişki analizinde kullanılan deneylere ait girdi ve çıktı parametreleri Çizelge 9.1.'de verilmiştir. Farklı ölçü birimlerine sahip performans kriterlerinin karşılaştırılabilir hâle getirilmesi amacıyla gerçekleştirilen normalizasyon işleminin sonuçları Çizelge 9.2.'de sunulmuştur. Normalizasyon sonrası elde edilen referans seri ile deneysel seriler arasındaki mutlak farklara dayalı olarak oluşturulan uzaklık matrisi sonuçları Çizelge 9.3.'te verilmiştir. Uzaklık matrisinden hesaplanan gri ilişki katsayıları Çizelge 9.4.'te, her bir deney koşulu için hesaplanan gri ilişki dereceleri ve performans sıralaması ise Çizelge 9.5.'te ve Şekil 9.1.'de gösterilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, farklı soğutma stratejileri ve kesme koşullarının delme performansı üzerindeki toplam etkisi tek bir performans indeksi altında değerlendirilmiş, optimum delme koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 9.1. YBS deneylerine ait GİA'da kullanılan girdi ve çıktı parametreleri

Deney No	İlerleme Oranı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Soğutma Şartı (Bar)	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	0,1	140	20	259,57	79,00	12,733	0,699	0,020	0,011	0,006
2	0,15	140	20	379,14	116,81	13,667	0,659	0,015	0,010	0,008
3	0,2	140	20	442,43	45,06	13,000	0,903	0,009	0,017	0,009
4	0,1	170	20	311,39	51,92	12,467	1,000	0,013	0,020	0,012
5	0,15	170	20	434,03	132,88	12,833	0,793	0,013	0,012	0,007
6	0,2	170	20	519,9	77,14	12,500	0,971	0,011	0,012	0,007
7	0,1	200	20	275,6	52,3	13,133	0,682	0,013	0,026	0,014
8	0,15	200	20	273,05	123,96	13,400	1,065	0,003	0,015	0,011
9	0,2	200	20	295,78	78,51	13,233	0,562	0,006	0,012	0,008
10	0,1	140	40	215,56	14,24	13,133	0,875	0,014	0,010	0,006
11	0,15	140	40	294,45	109,73	13,433	1,095	0,018	0,018	0,009
12	0,2	140	40	355,26	57,15	13,167	1,451	0,009	0,012	0,007
13	0,1	170	40	293,87	116,39	12,667	0,950	0,012	0,011	0,006
14	0,15	170	40	378,35	146,48	12,100	1,318	0,009	0,009	0,006
15	0,2	170	40	428,71	75,60	12,367	1,017	0,010	0,013	0,009
16	0,1	200	40	300,57	116,08	13,567	0,963	0,012	0,016	0,010

Çizelge 9.1. (devam) YBS deneylerine ait GİA'da kullanılan girdi ve çıktı parametreleri

17	0,15	200	40	364,52	93,47	12,667	1,032	0,015	0,015	0,008
18	0,2	200	40	468,91	129,71	13,200	1,511	0,015	0,009	0,007
19	0,1	140	60	262,19	77,61	12,633	1,107	0,010	0,012	0,011
20	0,15	140	60	383,02	83,9	12,167	1,219	0,009	0,016	0,012
21	0,2	140	60	470,23	92,24	12,067	0,902	0,011	0,020	0,011
22	0,1	170	60	255,22	16,64	13,000	1,245	0,011	0,016	0,010
23	0,15	170	60	365,91	76,9	12,600	0,922	0,010	0,020	0,010
24	0,2	170	60	478,69	148,98	13,500	1,234	0,009	0,016	0,010
25	0,1	200	60	283,9	117,08	13,900	1,243	0,005	0,008	0,006
26	0,15	200	60	347,75	123,32	12,833	0,487	0,001	0,045	0,020
27	0,2	200	60	404,07	165,94	12,867	0,723	0,007	0,022	0,012

Çizelge 9.2. YBS deneylerine ait normalizasyon sonuçları

Deney No	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	0,8554	0,5731	0,6364	0,7935	0,0000	0,9189	1,0000
2	0,4625	0,3239	0,1273	0,8324	0,2632	0,9459	0,8571
3	0,2546	0,7968	0,4909	0,5937	0,5789	0,7568	0,7857
4	0,6851	0,7516	0,7818	0,4987	0,3684	0,6757	0,5714
5	0,2822	0,2179	0,5818	0,7017	0,3684	0,8919	0,9286
6	0,0000	0,5854	0,7636	0,5275	0,4737	0,8919	0,9286
7	0,8027	0,7491	0,4182	0,8099	0,3684	0,5135	0,4286
8	0,8111	0,2767	0,2727	0,4359	0,8947	0,8108	0,6429
9	0,7364	0,5763	0,3636	0,9274	0,7368	0,8919	0,8571
10	1,0000	1,0000	0,4182	0,6215	0,3158	0,9459	1,0000
11	0,7408	0,3705	0,2545	0,4058	0,1053	0,7297	0,7857
12	0,5410	0,7171	0,4000	0,0579	0,5789	0,8919	0,9286
13	0,7427	0,3266	0,6727	0,5483	0,4211	0,9189	1,0000
14	0,4651	0,1283	0,9818	0,1881	0,5789	0,9730	1,0000
15	0,2996	0,5955	0,8364	0,4825	0,5263	0,8649	0,7857
16	0,7207	0,3287	0,1818	0,5348	0,4211	0,7838	0,7143
17	0,5105	0,4777	0,6727	0,4679	0,2632	0,8108	0,8571
18	0,1675	0,2388	0,3818	0,0000	0,2632	0,9730	0,9286
19	0,8468	0,5823	0,6909	0,3943	0,5263	0,8919	0,6429
20	0,4498	0,5408	0,9455	0,2849	0,5789	0,7838	0,5714
21	0,1632	0,4858	1,0000	0,5947	0,4737	0,6757	0,6429
22	0,8697	0,9842	0,4909	0,2595	0,4737	0,7838	0,7143
23	0,5060	0,5869	0,7091	0,5756	0,5263	0,6757	0,7143
24	0,1354	0,1118	0,2182	0,2705	0,5789	0,7838	0,7143
25	0,7754	0,3221	0,0000	0,2617	0,7895	1,0000	1,0000
26	0,5657	0,2809	0,5818	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000
27	0,3806	0,0000	0,5636	0,7696	0,6842	0,6216	0,5714

Çizelge 9.3. YBS deneylerine ait uzaklık matrisi sonuçları

Deney No	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	0,1446	0,4269	0,3636	0,2065	1,0000	0,0811	0,0000
2	0,5375	0,6761	0,8727	0,1676	0,7368	0,0541	0,1429
3	0,7454	0,2032	0,5091	0,4063	0,4211	0,2432	0,2143
4	0,3149	0,2484	0,2182	0,5013	0,6316	0,3243	0,4286
5	0,7178	0,7821	0,4182	0,2983	0,6316	0,1081	0,0714
6	1,0000	0,4146	0,2364	0,4725	0,5263	0,1081	0,0714
7	0,1973	0,2509	0,5818	0,1901	0,6316	0,4865	0,5714
8	0,1889	0,7233	0,7273	0,5641	0,1053	0,1892	0,3571
9	0,2636	0,4237	0,6364	0,0726	0,2632	0,1081	0,1429
10	0,0000	0,0000	0,5818	0,3785	0,6842	0,0541	0,0000

Çizelge 9.3. (devam) YBS deneylerine ait uzaklık matrisi sonuçları

11	0,2592	0,6295	0,7455	0,5942	0,8947	0,2703	0,2143
12	0,4590	0,2829	0,6000	0,9421	0,4211	0,1081	0,0714
13	0,2573	0,6734	0,3273	0,4517	0,5789	0,0811	0,0000
14	0,5349	0,8717	0,0182	0,8119	0,4211	0,0270	0,0000
15	0,7004	0,4045	0,1636	0,5175	0,4737	0,1351	0,2143
16	0,2793	0,6713	0,8182	0,4652	0,5789	0,2162	0,2857
17	0,4895	0,5223	0,3273	0,5321	0,7368	0,1892	0,1429
18	0,8325	0,7612	0,6182	1,0000	0,7368	0,0270	0,0714
19	0,1532	0,4177	0,3091	0,6057	0,4737	0,1081	0,3571
20	0,5502	0,4592	0,0545	0,7151	0,4211	0,2162	0,4286
21	0,8368	0,5142	0,0000	0,4053	0,5263	0,3243	0,3571
22	0,1303	0,0158	0,5091	0,7405	0,5263	0,2162	0,2857
23	0,4940	0,4131	0,2909	0,4244	0,4737	0,3243	0,2857
24	0,8646	0,8882	0,7818	0,7295	0,4211	0,2162	0,2857
25	0,2246	0,6779	1,0000	0,7383	0,2105	0,0000	0,0000
26	0,4343	0,7191	0,4182	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000
27	0,6194	1,0000	0,4364	0,2304	0,3158	0,3784	0,4286

Çizelge 9.4. YBS deneylerine ait gri ilişki katsayısı

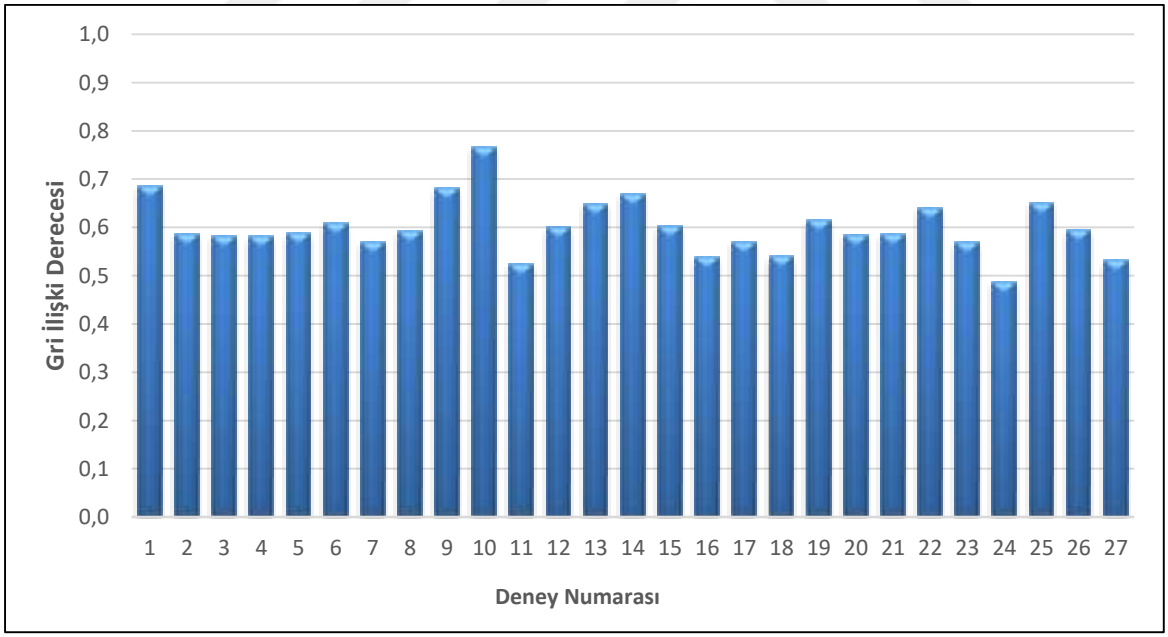
Deney No	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	0,7757	0,5394	0,5789	0,7078	0,3333	0,8605	1,0000
2	0,4819	0,4251	0,3642	0,7489	0,4043	0,9024	0,7778
3	0,4015	0,7111	0,4955	0,5517	0,5429	0,6727	0,7000
4	0,6136	0,6681	0,6962	0,4993	0,4419	0,6066	0,5385
5	0,4106	0,3900	0,5446	0,6263	0,4419	0,8222	0,8750
6	0,3333	0,5467	0,6790	0,5141	0,4872	0,8222	0,8750
7	0,7171	0,6659	0,4622	0,7246	0,4419	0,5068	0,4667
8	0,7258	0,4087	0,4074	0,4699	0,8261	0,7255	0,5833
9	0,6548	0,5413	0,4400	0,8733	0,6552	0,8222	0,7778
10	1,0000	1,0000	0,4622	0,5692	0,4222	0,9024	1,0000
11	0,6586	0,4427	0,4015	0,4570	0,3585	0,6491	0,7000
12	0,5214	0,6387	0,4545	0,3467	0,5429	0,8222	0,8750
13	0,6602	0,4261	0,6044	0,5253	0,4634	0,8605	1,0000
14	0,4831	0,3645	0,9649	0,3811	0,5429	0,9487	1,0000
15	0,4165	0,5528	0,7534	0,4914	0,5135	0,7872	0,7000
16	0,6416	0,4269	0,3793	0,5180	0,4634	0,6981	0,6364
17	0,5053	0,4891	0,6044	0,4844	0,4043	0,7255	0,7778
18	0,3752	0,3965	0,4472	0,3333	0,4043	0,9487	0,8750
19	0,7654	0,5448	0,6180	0,4522	0,5135	0,8222	0,5833
20	0,4761	0,5213	0,9016	0,4115	0,5429	0,6981	0,5385
21	0,3740	0,4930	1,0000	0,5523	0,4872	0,6066	0,5833
22	0,7933	0,9693	0,4955	0,4031	0,4872	0,6981	0,6364
23	0,5030	0,5476	0,6322	0,5409	0,5135	0,6066	0,6364
24	0,3664	0,3602	0,3901	0,4067	0,5429	0,6981	0,6364
25	0,6901	0,4245	0,3333	0,4038	0,7037	1,0000	1,0000
26	0,5351	0,4102	0,5446	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333
27	0,4467	0,3333	0,5340	0,6846	0,6129	0,5692	0,5385

Çizelge 9.5. YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi ve sıralama

Deney No	Gri İlişki Derecesi	Sıralama
1	0,685	2
2	0,586	15
3	0,582	18
4	0,581	19
5	0,587	14

Çizelge 9.5. (devam) YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi ve sıralama

6	0,608	9
7	0,569	21
8	0,592	13
9	0,681	3
10	0,765	1
11	0,524	26
12	0,600	11
13	0,649	6
14	0,669	4
15	0,602	10
16	0,538	24
17	0,570	20
18	0,540	23
19	0,614	8
20	0,584	17
21	0,585	16
22	0,640	7
23	0,569	22
24	0,486	27
25	0,651	5
26	0,594	12
27	0,531	25



Şekil 9.1. YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi grafiği

Gri ilişki dereceleri incelendiğinde, en yüksek gri ilişki derecesi 0,765 değeriyle 10 numaralı deney koşulunda elde edilmiştir. Bu deney, 0,1 mm/dev ilerleme oranı, 140 m/dak kesme hızı ve 40 bar içten soğutmalı yüksek basınçlı soğutma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu sonuç, söz konusu parametre kombinasyonunun; itme kuvveti, kesme

momenti, güç tüketimi ve delik kalitesi göstergeleri (yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, silindiriklik ve dairesellik) açısından en dengeli ve optimum performansı sağladığını göstermektedir. Özellikle orta basınç seviyesinde uygulanan YBS'nin, kesme bölgesinde etkin ısıl kontrol ve yeterli yağlayıcılık sağlayarak çoklu performans kriterlerini aynı anda iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

En düşük gri ilişki derecesi ise 0,486 değeriyle 24 numaralı deneyde elde edilmiştir. Bu deney, 0,2 mm/dev ilerleme oranı ve 170 m/dak kesme hızı ve 60 bar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda özellikle yüksek itme kuvveti, kesme momenti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artması, genel performansın olumsuz etkilenmesine neden olmuştur. Sonuçlar, yüksek ilerleme oranı ile birlikte artan mekanik yüklerin ve yüksek basınç koşullarının her durumda işleme performansını iyileştirmediğini göstermektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ilerleme oranı 0,1 mm/dev olarak sabit tutulmuş; yüksek basınçlı soğutma, geleneksel soğutma ve kuru işleme koşulları altında gerçekleştirilen toplam 15 deney karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneylerden elde edilen itme kuvveti, kesme momenti, güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü ve geometrik tolerans sonuçları üzerinde GİA uygulanmıştır. Gri ilişki analizinde kullanılan deneylere ait girdi ve çıktı parametreleri Çizelge 9.6.'da verilmiştir. Farklı ölçü birimlerine sahip performans kriterlerinin karşılaştırılabilir hâle getirilmesi amacıyla gerçekleştirilen normalizasyon işleminin sonuçları Çizelge 9.7.'de sunulmuştur. Normalizasyon sonrası elde edilen referans seri ile deneysel seriler arasındaki mutlak farklara dayalı olarak oluşturulan uzaklık matrisi sonuçları Çizelge 9.8.'de verilmiştir. Uzaklık matrisinden hesaplanan gri ilişki katsayıları Çizelge 9.9.'da, her bir deney koşulu için hesaplanan gri ilişki dereceleri ve performans sıralaması ise Çizelge 9.10.'da ve Şekil 9.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 9.6. GİA'da kullanılan deney girdi ve çıktı parametreleri

Deney No	Kesme Hızı (m/dak)	Soğutma Şartı	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	140	20 Bar	259,57	79	12,7	0,699	0,020	0,011	0,006
2	140	40 Bar	215,56	14,24	13,13	0,875	0,014	0,010	0,006
3	140	60 Bar	262,19	77,61	12,63	1,107	0,010	0,012	0,011
4	140	Kuru	241,77	18,48	13,6	0,582	0,026	0,021	0,012
5	140	Geleneksel	266,63	78,12	12,8	1,049	0,028	0,020	0,015
6	170	20 Bar	311,39	51,92	12,46	1,000	0,013	0,020	0,012
7	170	40 Bar	293,87	116,39	12,66	0,950	0,012	0,011	0,006
8	170	60 Bar	255,22	16,64	13	1,245	0,011	0,016	0,010
9	170	Kuru	254,55	51,17	13	2,657	0,030	0,020	0,012
10	170	Geleneksel	269,35	105,17	12,76	0,940	0,016	0,015	0,009

Çizelge 9.6. (devam) GİA'da kullanılan deney girdi ve çıktı parametreleri

11	200	20 Bar	275,6	52,3	13,13	0,682	0,013	0,026	0,014
12	200	40 Bar	300,57	116,08	13,56	0,963	0,012	0,016	0,010
13	200	60 Bar	283,9	117,08	13,9	1,243	0,005	0,008	0,006
14	200	Kuru	258,05	91,15	13,26	2,553	0,015	0,012	0,010
15	200	Geleneksel	253,11	73,54	12,65	1,351	0,016	0,019	0,009

Çizelge 9.7. Normalizasyon sonuçları

Deney No	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	0,5407	0,3703	0,8333	0,9436	0,4000	0,8333	1,0000
2	1,0000	1,0000	0,5347	0,8588	0,6400	0,8889	1,0000
3	0,5134	0,3838	0,8819	0,7470	0,8000	0,7778	0,4444
4	0,7265	0,9588	0,2083	1,0000	0,1600	0,2778	0,3333
5	0,4671	0,3788	0,7639	0,7749	0,0800	0,3333	0,0000
6	0,0000	0,6336	1,0000	0,7986	0,6800	0,3333	0,3333
7	0,1828	0,0067	0,8611	0,8227	0,7200	0,8333	1,0000
8	0,5861	0,9767	0,6250	0,6805	0,7600	0,5556	0,5556
9	0,5931	0,6409	0,6250	0,0000	0,0000	0,3333	0,3333
10	0,4387	0,1158	0,7917	0,8275	0,5600	0,6111	0,6667
11	0,3735	0,6299	0,5347	0,9518	0,6800	0,0000	0,1111
12	0,1129	0,0097	0,2361	0,8164	0,7200	0,5556	0,5556
13	0,2869	0,0000	0,0000	0,6814	1,0000	1,0000	1,0000
14	0,5566	0,2521	0,4444	0,0501	0,6000	0,7778	0,5556
15	0,6082	0,4234	0,8681	0,6294	0,5600	0,3889	0,6667

Çizelge 9.8. Uzaklık Matrisi sonuçları

Deney No	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	0,4593	0,6297	0,1667	0,0564	0,6000	0,1667	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,4653	0,1412	0,3600	0,1111	0,0000
3	0,4866	0,6162	0,1181	0,2530	0,2000	0,2222	0,5556
4	0,2735	0,0412	0,7917	0,0000	0,8400	0,7222	0,6667
5	0,5329	0,6212	0,2361	0,2251	0,9200	0,6667	1,0000
6	1,0000	0,3664	0,0000	0,2014	0,3200	0,6667	0,6667
7	0,8172	0,9933	0,1389	0,1773	0,2800	0,1667	0,0000
8	0,4139	0,0233	0,3750	0,3195	0,2400	0,4444	0,4444
9	0,4069	0,3591	0,3750	1,0000	1,0000	0,6667	0,6667
10	0,5613	0,8842	0,2083	0,1725	0,4400	0,3889	0,3333
11	0,6265	0,3701	0,4653	0,0482	0,3200	1,0000	0,8889
12	0,8871	0,9903	0,7639	0,1836	0,2800	0,4444	0,4444
13	0,7131	1,0000	1,0000	0,3186	0,0000	0,0000	0,0000
14	0,4434	0,7479	0,5556	0,9499	0,4000	0,2222	0,4444
15	0,3918	0,5766	0,1319	0,3706	0,4400	0,6111	0,3333

Çizelge 9.9. Gri İlişki Katsayısı

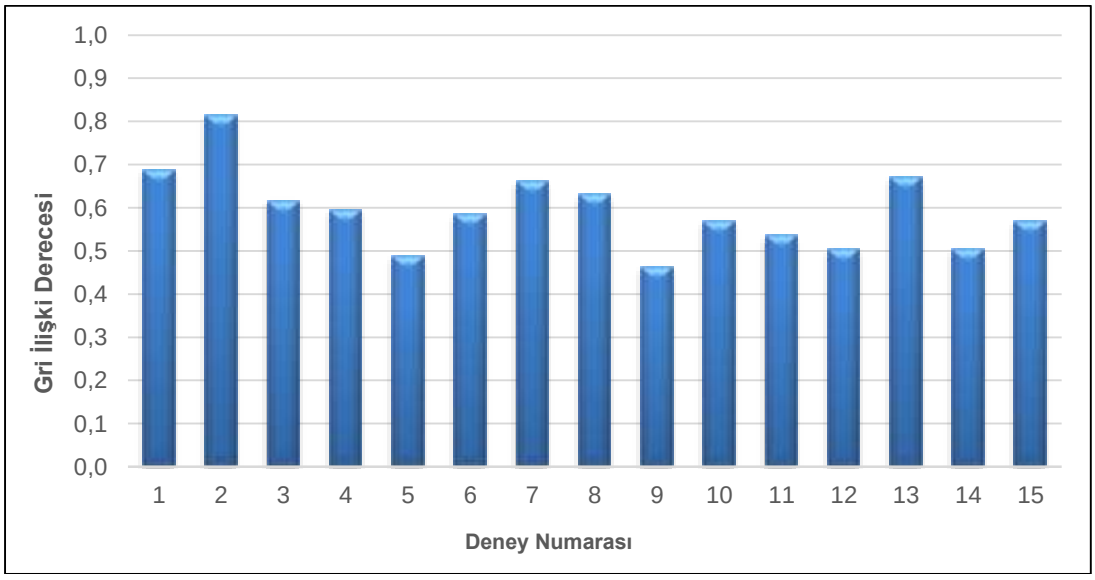
Deney No	Fz	Mz	Güç (kW)	Ra	Çaptan Sapma	Silindiriklik	Dairellik
1	0,5212	0,4426	0,7500	0,8987	0,4545	0,7500	1,0000
2	1,0000	1,0000	0,5180	0,7798	0,5814	0,8182	1,0000
3	0,5068	0,4479	0,8090	0,6640	0,7143	0,6923	0,4737
4	0,6464	0,9238	0,3871	1,0000	0,3731	0,4091	0,4286
5	0,4841	0,4460	0,6792	0,6896	0,3521	0,4286	0,3333
6	0,3333	0,5771	1,0000	0,7128	0,6098	0,4286	0,4286
7	0,3796	0,3348	0,7826	0,7382	0,6410	0,7500	1,0000

Çizelge 9.9. (devam) Gri İlişki Katsayısı

8	0,5471	0,9554	0,5714	0,6101	0,6757	0,5294	0,5294
9	0,5513	0,5820	0,5714	0,3333	0,3333	0,4286	0,4286
10	0,4711	0,3612	0,7059	0,7435	0,5319	0,5625	0,6000
11	0,4438	0,5747	0,5180	0,9121	0,6098	0,3333	0,3600
12	0,3605	0,3355	0,3956	0,7314	0,6410	0,5294	0,5294
13	0,4122	0,3333	0,3333	0,6108	1,0000	1,0000	1,0000
14	0,5300	0,4007	0,4737	0,3449	0,5556	0,6923	0,5294
15	0,5606	0,4644	0,7912	0,5743	0,5319	0,4500	0,6000

Çizelge 9.10. Gri İlişki Derecesi ve Sıralama

Deney No	Gri İlişki Derecesi	Sıralama
1	0,688	2
2	0,814	1
3	0,615	6
4	0,595	7
5	0,488	14
6	0,584	8
7	0,661	4
8	0,631	5
9	0,461	15
10	0,568	9
11	0,536	11
12	0,503	13
13	0,670	3
14	0,504	12
15	0,567	10



Şekil 9.2. Gri ilişki derecesi grafiği

Gri ilişki dereceleri incelendiğinde, en yüksek gri ilişki derecesi 0,814 değeriyle 2 numaralı deney koşulunda elde edilmiştir. Bu deney, 0,1 mm/dev ilerleme oranı, 140 m/dak kesme

hızı ve 40 bar içten soğutmalı yüksek basınçlı soğutma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu sonuç, söz konusu parametre kombinasyonunun; itme kuvveti, kesme momenti, güç tüketimi ve delik kalitesi göstergeleri (yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, silindiriklik ve dairesellik) açısından en dengeli ve optimum performansı sağladığını göstermektedir. Özellikle orta basınç seviyesinde uygulanan YBS'nin, kesme bölgesinde etkin ısıl kontrol ve yeterli yağlayıcılık sağlayarak çoklu performans kriterlerini aynı anda iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

En düşük gri ilişki derecesi ise 0,461 değeriyle 9 numaralı deneyde elde edilmiştir. Bu deney, 0,1 mm/dev ilerleme oranı ve 170 m/dak kesme hızı altında kuru kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu durum, çoklu performans kriterleri açısından kuru kesme koşullarının, yüksek basınçlı ve geleneksel soğutma yöntemlerine kıyasla en dezavantajlı çalışma koşullarını sunduğunu açıkça göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Gri İlişki Analizi sonuçları; düşük-orta kesme hızı ve orta basınç seviyelerinde uygulanan içten soğutmalı yüksek basınçlı soğutma sistemlerinin, Al 7075-T6 alaşımının delinmesinde çoklu performans kriterleri açısından en uygun çalışma koşullarını sağladığını ortaya koymaktadır.

9.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Gri ilişki derecesi değerleri üzerinde ilerleme, kesme hızı ve soğutma şartının istatistiksel etkisini incelemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Çizelge 9.11.'de analiz sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 9.11. YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için ANOVA sonuçları

Faktör	Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Toplamı (SS)	Katkı Oranı	Ortalama Kare (MS)	F Değeri	p-değeri
İlerleme Oranı	2	0,00699	%32,45	0,00349	4,77	0,020
Kesme Hızı	2	0,00032	%1,48	0,00016	0,22	0,807
Soğutma Basıncı	2	0,00159	%7,39	0,00080	1,09	0,356
Hata	20	0,01465	%58,68	0,00073	-	-
Toplam	26	0,02355	%100,00	-	-	-

Gri İlişki Dereceleri üzerine uygulanan ANOVA sonuçları incelendiğinde, genel işleme performansı üzerinde en etkili parametrenin %32,45 katkı oranı ile ilerleme oranı olduğu belirlenmiştir. İlerleme oranına ait p-değerinin 0,05'ten küçük olması, bu parametrenin gri ilişki derecesi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, ilerleme oranındaki değişimin; kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi, geometrik toleranslar ve güç tüketimi gibi performans kriterlerini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Soğutma basıncının katkı oranı %7,39 olarak hesaplanırken, kesme hızının katkı oranı %1,48 seviyesinde kalmıştır. Her iki parametrenin de gri ilişki derecesi üzerindeki etkisinin ilerleme oranına kıyasla daha sınırlı olduğu görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde, çoklu performans kriterlerinin birlikte ele alındığı gri ilişki analizinde, optimum işleme performansının belirlenmesinde en belirleyici parametrenin ilerleme oranı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

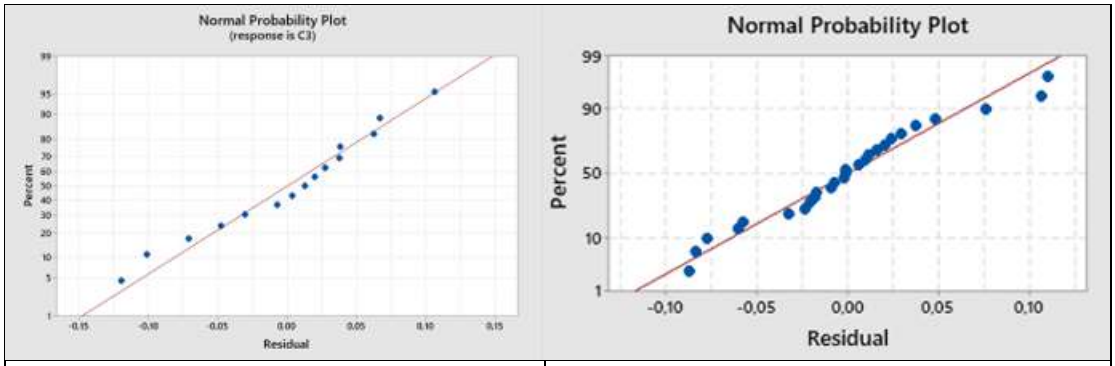
Çalışmanın ikinci aşamasında, ilerleme oranı 0,1 mm/dev olarak sabit tutulmuş; kesme hızı ve soğutma şartının genel işleme performansı üzerindeki etkileri, kuru, geleneksel ve yüksek basınçlı soğutma koşullarını içeren 15 deney üzerinden elde edilen Gri İlişki Analiz sonuçlarına ANOVA uygulanmıştır. Çizelge 9.12.'de sonuçlar yer almaktadır.

Çizelge 9.12. Gri İlişki Derecesi için ANOVA Sonuçları

Faktör	Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Toplamı (SS)	Katkı Oranı	Ortalama Kare (MS)	F Değeri	p-değeri
Kesme Hızı	2	0,01860	%15,57	0,009301	1,30	0,323
Soğutma Şartı	4	0,04383	%36,69	0,010957	1,54	0,280
Hata	8	0,05702	%47,73	0,007127	-	-
Toplam	14	0,11944	%100,00	-	-	-

Elde edilen sonuçlara göre, kesme hızının ($p = 0,323$) ve soğutma şartının ($p = 0,280$) gri ilişki derecesi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir ($p > 0,05$). Bu durum, gri ilişki analizinde elde edilen optimum performansın tek bir parametrenin baskın etkisinden ziyade, kesme hızı ve soğutma şartının birlikte oluşturduğu çoklu etkileşimler sonucunda ortaya çıktığını göstermektedir. Dolayısıyla, Gri İlişki Analizi'nin çoklu performans kriterlerini bütüncül olarak değerlendirme yeteneği, bu çalışmada parametrelerin göreli etkilerinin belirlenmesinde etkin bir yaklaşım sunmuştur. Bununla

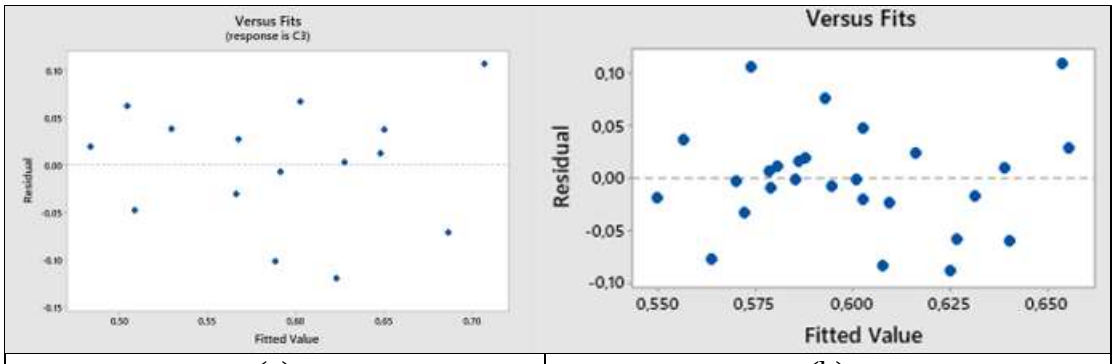
birlikte, katkı oranları incelendiğinde soğutma şartının (%36,69) kesme hızına (%15,57) kıyasla gri ilişki derecesi üzerinde daha yüksek bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 9.3. (a) Yüksek basınçlı soğutma (YBS) deneylerine ait artıkların normal olasılık grafiği (b) Kuru, geleneksel ve YBS işleme koşullarını içeren 15 deney için artıkların normal olasılık grafiği

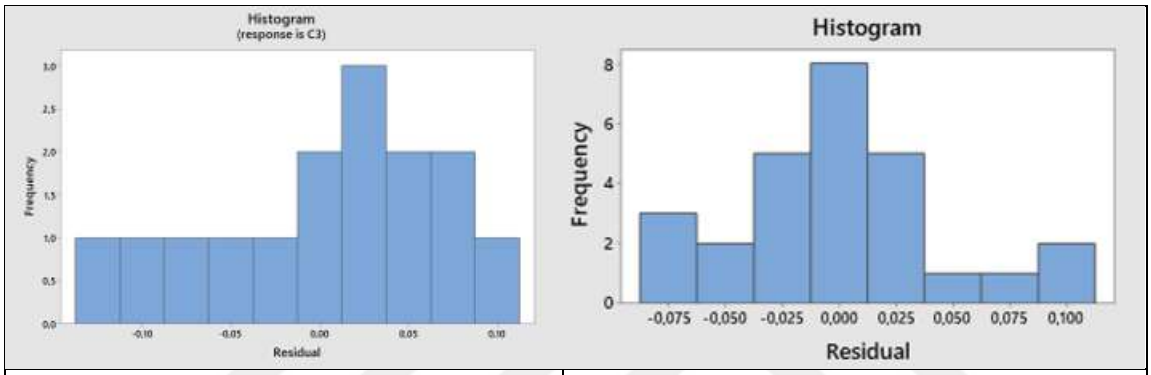
Şekil 9.3.'te, gri ilişki derecesi için elde edilen ANOVA modeline ait artıkların (residuals) normal olasılık grafiği verilmiştir. Grafikte artık değerlerin büyük ölçüde referans doğrusu etrafında toplandığı ve belirgin bir sistematik sapma göstermediği görülmektedir. Bu durum, artıkların yaklaşık olarak normal dağıldığını ve modelin normallik varsayımını sağladığını göstermektedir. Ayrıca grafikte uç değer (outlier) niteliğinde, modeli bozabilecek aşırı sapmaların bulunmaması, kurulan ANOVA modelinin istatistiksel açıdan güvenilir olduğunu teyit etmektedir. Dolayısıyla, gri ilişki derecesi üzerinde kesme hızı ve soğutma şartının etkilerinin incelenmesinde kullanılan varyans analizinin sonuçları geçerli ve yorumlanabilir kabul edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 9.4. (a) YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için artıkların tahmin edilen değerlere göre dağılımı (b) Kuru, geleneksel ve YBS koşullarını içeren 15 deneye ait gri ilişki derecesi için artıkların tahmin edilen değerlere göre dağılımı

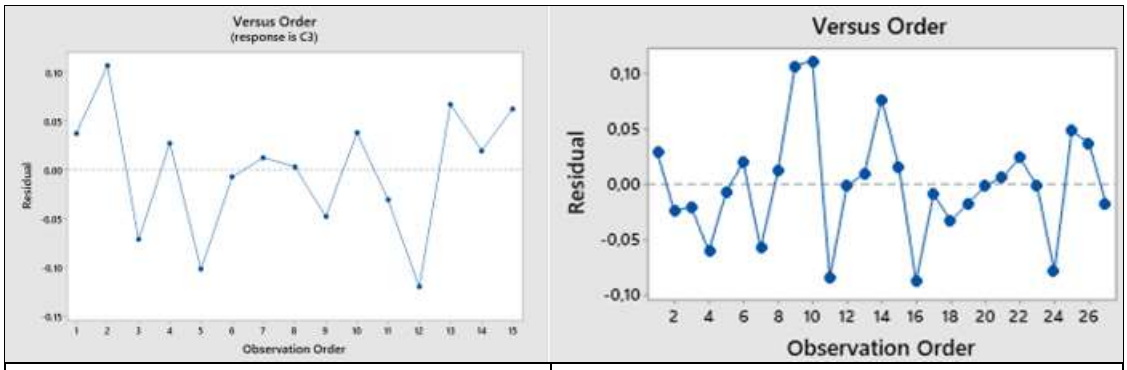
Şekil 9.4.'de gri ilişki derecesi için kurulan ANOVA modeline ait artıkların, tahmin edilen (fitted) değerlere göre dağılımı verilmiştir. Grafikte artıkların sıfır referans çizgisi etrafında rastgele bir şekilde dağıldığı, belirgin bir desen, eğilim veya sistematik yapı göstermediği görülmektedir. Bu durum, modelde varyansın sabit olduğu (homojenlik varsayımı) ve modelin doğrusal yapısının uygun olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca artıkların pozitif ve negatif değerler arasında dengeli bir dağılım sergilemesi, modelde eksik değişken bulunmadığını ve kurulan varyans analizinin gri ilişki derecesini yeterli düzeyde temsil ettiğini göstermektedir.



(a) (b)

Şekil 9.5. (a) YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için artıkların histogramı (b) Kuru, geleneksel ve YBS koşullarını içeren 15 deneye ait gri ilişki derecesi için artıkların histogramı

Şekil 9.5.'te gri ilişki derecesi için kurulan ANOVA modeline ait artıkların histogramı verilmiştir. Histogram incelendiğinde, artıkların sıfır etrafında simetrik bir dağılım sergilediği ve aşırı uç (outlier) değerler içermediği görülmektedir. Artıkların büyük bir kısmının küçük değerler etrafında yoğunlaşması, model hatalarının rastgele dağıldığını ve sistematik bir sapma içermediğini göstermektedir.



(a) (b)

Şekil 9.6. (a) YBS deneylerine ait gri ilişki derecesi için artıkların deney sırasına göre dağılımı (b) Kuru, geleneksel ve YBS koşullarını içeren 15 deneye ait gri ilişki derecesi için artıkların deney sırasına göre dağılımı

Şekil 9.6.'da gri ilişki derecesi için kurulan ANOVA modeline ait artıkların deney sırasına göre dağılımı gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, artıkların sıfır etrafında rastgele dağıldığı, deney sırası boyunca belirgin bir artış, azalış veya periyodik bir eğilim sergilemediği görülmektedir. Bu durum, deneylerin gerçekleştirilme sırasına bağlı olarak sistematik bir hata veya zaman etkisinin bulunmadığını göstermektedir. Ayrıca artıkların deney sırasına göre kümelenme veya ardışık bağımlılık (otokorelasyon) göstermemesi, deney koşullarının birbirinden bağımsız olarak yürütüldüğünü ve ANOVA modelinde kullanılan bağımsızlık varsayımının sağlandığını teyit etmektedir. Dolayısıyla, elde edilen varyans analizi sonuçlarının güvenilirliği desteklenmiştir.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Al 7075-T6 malzemesinin delik delme işlemlerinde yüksek basınçlı soğutma (YBS), kuru ve geleneksel soğutma koşullarının; itme kuvveti (Fz), kesme momenti (Mz), güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal ve geometrik toleranslar ile talaş oluşumu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, farklı kesme hızları, ilerleme oranları ve YBS basınç seviyeleri altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney ve analiz sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Düşük ve orta kesme hızlarında YBS uygulamasının itme kuvveti üzerinde önemli avantajlar sağladığı görülmüştür. 140 m/dak kesme hızında ve 0,1 mm/dev ilerleme oranında, 40 bar YBS uygulaması, 20 bar koşuluna kıyasla itme kuvvetini yaklaşık %17 oranında azaltmıştır. Benzer şekilde 170 m/dak kesme hızında 60 bar basınç altında elde edilen Fz değeri, 20 bar koşuluna göre yaklaşık %13 daha düşük ölçülmüştür. Buna karşılık 200 m/dak kesme hızında, özellikle düşük ilerleme oranlarında, yüksek basınç uygulaması itme kuvvetinde %5-10 aralığında artışlara neden olmuş ve YBS'nin bu hızlarda sınırlı bir avantaj sunduğu görülmüştür.
- İtme momenti (Mz) sonuçları da benzer bir eğilim sergilemiştir. Düşük kesme hızında (140 m/dak), 40 bar YBS uygulaması, 20 bar koşuluna göre moment değerini yaklaşık %75 oranında azaltarak en düşük değerin elde edilmesini sağlamıştır. Orta kesme hızında (170 m/dak) uygun basınç seçimiyle moment değerlerinde %40–50 seviyelerine varan düşüşler elde edilmiştir. Yüksek kesme hızında (200 m/dak), bazı yüksek basınç-yüksek ilerleme kombinasyonlarında moment değerlerinde %40'ın üzerinde artışlar gözlenmiş ve bu durum yüksek hızlarda basınç artışının her zaman olumlu sonuç vermediğini ortaya koymuştur.
- Tüm deney koşullarında ölçülen güç değerlerinin dar bir bantta (yaklaşık 12-14 kW) değiştiği belirlenmiştir. Düşük kesme hızlarında (140 m/dak) 60 bar YBS uygulaması, 20 bar koşuluna göre güç tüketimini %2-4 oranında azaltmıştır. Buna karşın 200 m/dak kesme hızında ve 0,1 mm/dev ilerleme oranında, 60 bar basınç altında güç tüketimi yaklaşık %6-11 oranında artmıştır. Bu artışın yalnızca düşük ilerleme oranında belirgin olduğu; 0,15 ve 0,2 mm/dev ilerleme değerlerinde ise yüksek basıncın güç tüketimini %3-7 oranında azalttığı görülmüştür. Bu sonuçlar, güç tüketiminin esas olarak kesme hızı ve ilerleme oranına bağlı olduğunu, soğutma basıncının ise ikincil bir parametre olarak etkili olduğunu göstermektedir.

- Yüzey pürüzlülüğü sonuçları incelendiğinde, uygun YBS basınçlarının yüzey kalitesini belirgin biçimde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Düşük kesme hızlarında YBS uygulaması, kuru kesmeye kıyasla yüzey pürüzlülüğünü %30-60 oranında azaltmıştır. Ancak yüksek ilerleme oranlarında (0,2 mm/dev), bazı yüksek basınç koşullarında yüzey pürüzlülüğünde %20-45'e varan artışlar gözlenmiş; bu durum basınç artışının her parametre kombinasyonunda yüzey kalitesini iyileştirmediğini göstermiştir.
- CMM ölçümleriyle elde edilen çaptan sapma, silindiriklik ve dairesellik sonuçları, YBS'nin geometrik doğruluk üzerinde de olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuştur. Uygun basınç seviyelerinde YBS uygulaması, çaptan sapmayı kuru kesmeye kıyasla %50-80 oranında azaltmıştır. Benzer şekilde silindiriklik ve dairesellik değerlerinde %30-60 aralığında iyileşmeler sağlanmıştır.
- YBS koşullarında daha kısa, düzenli ve kontrollü talaş yapılarının elde edildiği; kuru kesme koşullarında ise özellikle yüksek kesme hızlarında daha düzensiz ve uzun talaşların oluştuğu gözlenmiştir.
- Gri ilişki dereceleri üzerinde ilerleme oranı, kesme hızı ve soğutma basıncının etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre, ilerleme oranının ($p = 0,020$) gri ilişki derecesi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir ($p < 0,05$). Katkı oranları incelendiğinde, genel işleme performansı üzerinde en etkili parametrenin %32,45 katkı oranı ile ilerleme oranı olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, çoklu performans kriterlerinin birlikte değerlendirildiği Gri İlişki Analizi yaklaşımında, optimum performansın belirlenmesinde ilerleme oranının temel belirleyici parametre olduğunu göstermektedir.
- Gri ilişki dereceleri üzerinde kesme hızı ve soğutma şartının etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre, kesme hızının ($p = 0,323$) ve soğutma şartının ($p = 0,280$) gri ilişki derecesi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir ($p > 0,05$). Bu bulgu, çoklu performans kriterlerinin birlikte değerlendirildiği GİA yaklaşımında, optimum performansın tek bir parametrenin baskın etkisinden ziyade, kesme hızı ve soğutma şartının birlikte oluşturduğu etkileşimler sonucunda ortaya çıktığını göstermektedir.
- Gri İlişki Analizi ve ANOVA birlikte değerlendirildiğinde; yüksek basınçlı soğutma destekli, düşük–orta kesme hızı kombinasyonlarının, Al 7075-T6 alaşımının delinmesinde hem operasyonel performans hem de delik kalitesi açısından daha uygun koşullar sunduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, sürdürülebilir imalat hedefleri

doğrultusunda, yüksek basınçlı soğutma sistemlerinin uygun parametrelerle kullanılması durumunda, çoklu performans kriterlerinin eş zamanlı olarak optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Yapılan bu çalışma sonunda elde edilen veriler, çalışma esnasında yapılan gözlem ve deneyimler doğrultusunda ilerleyen süreçte yapılacak çalışmalara yön vermek için aşağıdaki öneriler paylaşılmıştır.

- Benzer çalışmalar, farklı alüminyum alaşımları veya farklı malzeme grupları kullanılarak gerçekleştirilerek elde edilen sonuçların genellenebilirliği artırılabilir.
- Çalışmada kullanılan kesici takıma ek olarak, farklı takım geometrileri ve kaplama türleriyle yapılacak deneyler, soğutma koşullarının takım davranışı üzerindeki etkilerini daha kapsamlı biçimde ortaya koyabilir.

KAYNAKLAR

Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Vafadar, A. (2020). A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12484-12500.

Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Ud Din, I., Hanif, M. I., Kuklu, U., Ikhlaq, M. (2021). Effect of cutting parameters and tool geometry on the performance analysis of one-shot drilling process of AA2024-T3. *Metals*, 11(6), 854.

Abdalla, H.S., Baines, W., McIntyre, G., Slade, C., (2007). Development of novel sus tainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. *Part 1. Formulation development. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34, 21-33.

Abdalla, H.S., Patel, S., (2006). The performance and oxidation stability of sustainable metal working fluid derived from vegetable extracts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(12), 2027-2040.

Akdemir, N. (2024). *Alüminyum Alaşımlarının Frezelenmesinde Takım Geometrisinin İşlenebilirliğe Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 78.

Anton, S., Andreas, S., Friedrich, B. (2015). Heat dissipation in turning operations by means of internal cooling. *Procedia Engineering*, 100, 1116-1123.

Aslan, E. (2022). *Alüminyum 7050 Alaşımının Delinmesinde Uç Açısının Etkilerinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 64.

Atak, Ş., Yağmur, S. (2024). *Alüminyum 7075 Alaşımının delinmesinde kesici takım malzemesi ve kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin araştırılması.* 14. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (ICAR), 414-423.

Avuncan, G. (1998). *Talaş kaldırma ekonomisi ve kesici takımlar*. Makine Takım Endüstrisi A.Ş., İstanbul, 195-249.

Ayed, Y., Germain, G., Ammar, A., Furet, B. (2015). Tool wear analysis and improvement of cutting conditions using the high-pressure water-jet assistance when machining the Ti17 titanium alloy. *Precision Engineering*, 42, 294-301.

Baradie, M. E. (1996). Cutting fluids: part I. characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*, 56(1), 786-797.

Batman, Ö. (2019). *2011-T6 Alüminyum Alaşımının Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Delik Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 64.

Bayraktar, Ş., Siyambaş, Y., Turgut, Y. (2017). Delik delme prosesi: bir araştırma. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 120-130.

Brockhoff, T., Walter, A. (1998). Fluid minimization in cutting and grinding. *Abrasives*, 10, 38-42.

Çağan, S. Ç., Uğurlu, M., Buldum, B. B., Sevim, İ. (6-8 Nisan 2017). *Alüminyum ve alaşımlarının asker araçlarda kullanımı.* II. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, 402-406.

Çakır, A., (2015). *AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum Malzemelerine Delik Delinmesinde Soğutma Yöntemlerinin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 196.

Çakır, A., Kavak, N., Şeker, U. (2017). Sürdürülebilir üretim için talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının geri dönüşümü. *Mühendis ve Makina,* 58(684), 15-30.

Çakır, A., Nalbant, M., Duran, A., Ulaş, H. (2012, 4-5 Ekim). *AA 7075 ve AA 6013 alüminyum malzemelere delik delme operasyonu sürecinde kesme parametrelerinin incelenmesi*. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara, 9, 18.

Çakır, A., Yıldırım, F., Şeker, U. (23-25 Ekim 2014) *AA7075 alüminyum alaşımının delinmesinde farklı soğutma şartları ve kesme parametrelerinin yüzey kalitesine etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. 5. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, Bursa.

Çakır, M.C. (2000). *Modern talaşlı imalat yöntemleri*. Vipaş A.Ş, Bursa, 219-346.

Çaydaş, U., Çelik, M. (2017). AA 7075-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı ve ilerleme kuvvetine etkilerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 419-425.

Chetan, Narasimhulu, A., Ghosh, S., Rao, P.V. (2014). Study of tool wear mechanisms and mathematical modeling of flank wear during machining of Ti Alloy (Ti-6Al-4V). *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*., 96(3), 279-285.

Cica, D., Kramar, D. (2023). Machinability investigation and sustainability analysis of high-pressure coolant assisted turning of the nickel-based superalloy Inconel 718. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 237(1-2), 43-54.

Cuesta, M., Aristimuño, P., Garay, A., Arrazola, P. J. (2016). Heat transferred to the workpiece based on temperature measurements by IR technique in dry and lubricated drilling of Inconel 718. *Applied Thermal Engineering*, 104, 309-318.

D'Addona, D. M., Raykar, S. J. (2019). Thermal modeling of tool temperature distribution during high pressure coolant assisted turning of Inconel 718. *Materials*, 12(3), 408.

Dahnel, A. N., Fauzi, M. H., Raof, N. A., Mokhtar, S., Khairussaleh, N. K. M. (2022). Tool wear and burr formation during drilling of aluminum alloy 7075 in dry and with cutting fluid. *Materials Today: Proceedings*, 59, 808-813.

Davim, J. P. (2017). *Sustainable machining*. (1. Edition). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 82.

Debnath, S., Reddy, M. M., Yi, Q. S. (2014). Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of cleaner production*, 83, 33-47.

Demir, Z., Adıyaman, O., Yakut, R. (2017). A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde ön-delik çap ve derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne, kovanın geometrik boyutlarına etkisinin araştırılması. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 228-240.

Dhar, N. R., Rashid, M. H., Siddiqui, A. T. (2006). Effect of high pressure coolant on chip, roundness deviation and tool wear in drilling AISI-4340 steel. *ARPN Journal of Engineering Applied Sciences*, 1(8), 52-59.

Dixit US., Sarma DAK., Davim JP., (2012). (1. Edition). *Environmentally friendly machining*. New York: Springer, 85.

Dornfeld, D., Min, S. (2009, 2-3 April). *A review of burr formation in machining. In Burrs-Analysis, Control and Removal:* Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, University of Kaiserslautern, German, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 3-11.

Ezugwu, E. O., Bonney, J. (2004). Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. *Journal of materials processing technology*, 153, 1045-1050.

Ezugwu, E. O., Bonney, J., Fadare, D. A., Sales, W. F. (2005). Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures. *Journal of materials processing technology*, 162, 609-614.

Ezugwu, E. O., Da Silva, R. B., Bonney, J., Machado, A. R. (2005). Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti–6Al–4V alloy with high pressure coolant supplies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), 1009-1014.

F. Mendi, (1996). *Takım tezgahları teori ve hesapları*, (1. Baskı). Ankara: Gazi Kitabevi, 5-40.

Ghani, J. A., Rizal, M., Haron, C. H. C. (2014). Performance of green machining: a comparative study of turning ductile cast iron FCD700. *Journal of cleaner production*, 85, 289-292.

Ghosh, S., Rao, P. V. (2015). Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production*, 100, 17-34.

Goindi GS., Sarkar P. (2017). Dry machining: A step towards sustainable machining - challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1557-1571.

Gracia-Martinez E., Miguel V., Martinez-Martinez A., Manjabacas MC., Coello J. (2019). Sustainable lubrication methods for the machining of titanium alloys: an overview. *Materials*, 12(23), 3852.

Groover, M. P. (2021). *Modern imalatın prensipleri*. (2. Baskı). Ankara: Nobel Yayıncılık, 4, 1002.

Grupta, K. (2020). A review on green machining techniques. *Procedia manufacturing*, 51, 1730-1736.

Gunay M, Yucel E. (2013). An evaluation on machining processes for sustainable manufacturing. *Gazi University Journal of Sciences*, 26(2), 241-252.

Haapala, K.R., Zhao, F., Camelio, J., Sutherland, J.W., Skerlos, S.J., Dornfeld, D.A., Jawahir, I.S, Zhang, H.C., Clarens, A.F. (2013) A review of engineering research in sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Sciences Engineering*, 135*(*4), 16.

Hannu, T., Suuronen, K., Aalto-Korte, K., Alanko, K., Luukkonen, R., Jarvela, M., Jolanki, R., Jaakkola, M., (2013). Occupational respiratory and skin diseases among finnish machinists: findings of a large clinical study. *International Archives of Occupational and Environmental Health,* 86, 189-197.

Hong, S. Y., Broomer, M. (2000). Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Clean Products and Processes*, 2(3), 157-166.

İnternet: Astakhov, V. P. (2001). Cutting fluids (coolants) and their application in deep-hole machining. URL-1: http://viktorastakhov. tripod. com/DH/coolant. pdf] accessed on October, 23, 2015, 1-17, Son Erişim Tarihi:19.09.2025

İnternet: Guhring, Takım Kataloğu. URL-2: https://guehring.com/tr/products/drilling tools/, Son Erişim Tarihi:19.09.2025

İnternet: Sürdürülebilir imalat yaklaşımının döngüsel yapısı. (2025). URL-3: https://gokcelsavunma.com.tr/surdurulebilirlik/ Son Erişim Tarihi: 16.04.2026

İnternet: Talaşlı imalatta kesme sıvısı uygulaması. (2025). URL-4: https://www.mfkpetrol.com/noi-aqua-hsf-51-yari-sentetik-bor-yagi-ve-kesme-sivisi Son Erişim Tarihi: 17.09.2025

İnternet: CKT Çelik Kesici takımlar. (2025). URL-5: https://www.celikkesicitakimlar.com/ Son Erişim Tarihi: 28.08.2025

Internet: Wedco takım kataloğu (2026). URL-6: https://milmak.com.tr/wp-content/uploads/2022/12/Cutting-Tools-Premium.pdf Son Erişim Tarihi: 16.05.2026

İnternet: Shunk takim tutucu (2026). URL-7: https://schunk.com/us/en/tool-clamping-technology/toolholders/tendo-hydraulic-expansion-toolholder/tendo-e-compact/tendo-ec-jis-bt-40-20x72-5/p/000000000000206436. Son Erişim Tarihi: 16.05.2026

Jawahir, I. S., Attia, H., Biermann, D., Duflou, J., Klocke, F., Meyer, D., Umbrello, D. (2016). Cryogenic manufacturing processes. *CIRP annals*, 65(2), 713-736.

Kaminski, J., Alvelid, B. (2000). Temperature reduction in the cutting zone in water-jet assisted turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 68-73.

Kamruzzaman, M., Dhar, N. (2009). Effect of high-pressure coolant on temperature, chip, force, tool wear, tool life and surface roughness in turning AISI 1060 steel. *Gazi University Journal of Science*, 22(4), 359-370.

Kovacevic, R., Cherukuthota, C., Mazurkiewicz, M. (1995). High pressure waterjet cooling/lubrication to improve machining efficiency in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(10), 1459-1473.

Kramar, D., Kopac, J. (2009). High pressure cooling in the machining of hard-to-machine materials. *Journal of Mechanical Engineering*, 55(11), 685-694.

Kutlu, L. (2009). *Al 2024-T4 Alüminyumun Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplanmış Matkaplarla Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi ve Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 83.

Lo´pez de Lacalle, L.N., Angulo, C., Lamikiz, A., J.A. Sa´nchez, (2006). Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high-speed milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 11–15.

Lakner, T., Splettstoesser, A., Schraknepper, D., Bergs, T. (2021). Economic and ecological evaluation of high-pressure cutting fluid supply in milling of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP*, 101, 362-365.

Landon, Y., Lacombe, A., Souop, L. A. K., Daidié, A., Paredes, M., Chirol, C., Benaben, A. (2022). Impact of the drilling process on the surface integrity and residual fatigue strength of 2024-T351 aluminum parts. *Procedia CIRP*, 108, 459-464.

Lastnosti, V. P. P. I. M., Vrtanju, H. P. P. S. (2012). Influence of the process parameters and the mechanical properties of aluminum alloys on the burr height and the surface roughness in dry drilling. *Materiali in tehnologije*, 46(2), 103-108.

Lawal, S.A., Choudhury, I.A., Nukman, Y., (2012). Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals -a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 52, 1-12.

Li, X. (1996). Study of the jet-flow rate of cooling in machining Part 1. Theoretical analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 62(1-3), 149-156.

López de Lacalle, L. N., Pérez-Bilbatua, J., Sánchez, J. A., Llorente, J. I., Gutierrez, A., Albóniga, J. (2000). Using high pressure coolant in the drilling and turning of low machinability alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 85-91.

Lu, Z., Zhang, D., Zhang, X., Peng, Z. (2020). Effects of high-pressure coolant on cutting performance of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 279, 1-13.

M. El Baradie, (1996). Cutting fluids: Part I. Characterisation, *Journal of Materials Processing Technology*, 56, 786-797.

Makhesana, M., Patel, K., Mevada, Y., Jain, K., Patel, A., Sankhla, A. (2024). Experimental investigations and sustainability analysis on the performance of vegetable oil-based MQL drilling of SS316L. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-13.

Mamidi, V. K., Xavior, M. A. (2014). A review on selection of cutting fluids. *Journal of Research in Science and Technology*, 1(5), 1-19.

Marksberry, P.W., (2007). Micro-flood (MF) technology for sustainable manufacturing operations that are coolant less and occupationally friendly. *Journal of Cleaner Production*, 15(10), 958-971.

Meral, G. (2010). *AISI 1050 Malzemenin Delinmesinde Delme Parametrelerinin Kesme Kuvvetleri ve Delik Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 95.

Mia, M., Khan, M. A., Dhar, N. R. (2017). High-pressure coolant on flank and rake surfaces of tool in turning of Ti-6Al-4V: investigations on surface roughness and tool wear. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 1825-1834.

Najiha, M. S., Rahman, M. M., Yusoff, A. R. (2016). Environmental impacts and hazards associated with metal working fluids and recent advances in the sustainable systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1008-1031.

Nandy, A. K., Gowrishankar, M. C., Paul, S. (2009). Some studies on high-pressure cooling in turning of Ti–6Al–4V. *International journal of machine tools and manufacture*, 49(2), 182-198.

Oberg E., Jones F.D., Horton H.L., Ryffel H.H., (2004). *Machinery's handbook* and *guide to machinery's handbook*, Industrial Press, 27, 1143-1146.

Obi, S.C., (2013). *Introduction to Manufacturing Systems*, First ed. AuthorHouse, Bloomington, USA, 361.

Oezkaya, E., Biermann, D. (2018). Experimental and simulative investigation of the oil distribution during a deep-hole drilling process and comparing of the RANS kw-SST and RANS hybrid SAS-SST turbulence model. *Thermal Science and Engineering*, 1(4), 874.

Patil, R. A., Shinde, V. D. (2013). Performance of high pressure coolant on tool wear. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2, 61-65.

Pereira, O., Celaya, A., Urbikaín, G., Rodríguez, A., Fernández-Valdivielso, A., de Lacalle, L. N. L. (2020). CO2 cryogenic milling of Inconel 718: cutting forces and tool wear. *Journal of materials research and technology*, 9(4), 8459-8468.

Pilný, L., De Chiffre, L., Píška, M., Villumsen, M. F. (2012). Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(2), 102-107.

Pusavec F, Krajnik P, Kopac J. (2010). Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), 174-184.

Pusavec, F., Krajnik, P., Kopac, J., (2010a). Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner production*, 18(2), 174-184.

Ravi, S., Gurusamy, P., Mohanavel, V. (2021). A review and assessment of effect of cutting fluids. *Materials Today: Proceedings*, 37, 220-222.

Rotella, G., Dillon Jr., O.W., Umbrello, D., Settineri, L., Jawahir, I.S., (2014). The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1), 47-55.

S. Sivarajan,, R. Padmanabhan. (2014). Green machining and forming by the use of surface coated tools. *Procedia Engineering*, 97, 15-21.

Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A., Ezugwu, E. O. (2016). Machining of aluminum alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 3067-3080.

Satyanarayana, P., Anitha, B., Kumar, Y. A. (2017). Effect of high-pressure coolant jet (YBSj) in drilling AISI 4340 steel. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 4(9), 1-14.

Schultheiss, F., Zhou, J., Gröntoft, E., Ståhl, J.-E., (2013). Sustainable machining through increasing the cutting tool utilization. *Journal of Cleaner Production*, 59, 298-307.

Şeker, U. (1997). *Takım tasarımı ders notları*, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 5-11.

Senthil Kumar, A., Rahman, M., Ng, S. L. (2002). Effect of high-pressure coolant on machining performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 83-91.

Sharma, J., Sidhu, B.S., (2014). Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil. *Journal of Cleaner Production*, 66, 619-623.

Sharma, V. S., Dogra, M., Suri, N. M. (2009). Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(6), 435-453.

Sharma, V.S., Dogra, M., Suri, N.M., (2009). Cooling techniques for improved productivity in turning. *Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 435-453.

Shaw, M. C., (2005). *Metal cutting principles*, (2. Edition). New York: Oxford university press, 2(3), 651.

Shete, H. V., Sohani, M. S. (2020). Effect of process parameters on surface roughness in HPC drilling of AISI 1055 steel. *Journal of Mechanical Engineering*, 17(1), 1823-5514.

Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T. (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, 83-101.

Skerlos SJ, Hayes KF, Clarens AF, Zhao F. (2008). Current advances in sustainable metalworking fluids research. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(1-2), 180-202.

Sreejith, P. S. (2008). Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions. *Materials Letters*, 62(2), 276-278.

Trent, E. M., Wright, P. K. (2000). *Metal cutting*. (4. Edition). Boston: Butterworth-Heinemann, 4, 439.

Tsao, C. C. (2007). An experiment study of hard coating and cutting fluid effect in milling aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(9), 885-891.

Uçak, N., Çiçek, A. (29-30 Eylül 2017). *Talaşlı imalat süreçlerinde kriyojenik soğutma uygulamaları üzerine bir araştırma.* In 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, (ISITES2017 Baku-Azerbaijan), 7-10.

Uzun, G. (2013). Ti-6Al-4V *Titanyum Alaşımında Kılavuz ile Vida Açma Problemlerinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 110.

Astakhov, V.P. (2006). *Tribology of metal cutting*, (2. Edition). New York: Elsevier Science, 52, 426.

W. Grzesik, (2008). *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*, (1. Edition). New York: Elsevier Science, Oxford, 435.

Werthem, R., Rotberg, J. (1992). Influence of high pressure flushing through the rake face of the tool. *Annals CIRP*, 41(1), 101-106.

Yağmur, S., (2011). *Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 109.

Yağmur, S., Çakıroğlu, R., Acır, A., Şeker, U. (2017). AISI 1050 çeliğinin delinmesinde itme kuvvetinin taguchi metodu ile optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part-C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 241-246.

Yaşar, N. (2019). Thrust force modelling and surface roughness optimization in drilling of AA-7075: FEM and GRA. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33, 4771-4781.

Yildiz, Y., Nalbant, M. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(9), 947-964.

Yılmaz, B. (2022). *Ti-6Al-4V Malzemesinin Delinmesinde Farklı Soğutma Yöntemlerinin Etkileri ve YSA ile Modellenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 185.

Zhao, H., Barber, G.C., Zou, Q., (2002). A study of flank wear in orthogonal cutting with internal cooling. *Wear*, 253, 957-962.

Zhong, W., Zhao, D., Wang, X. (2010). A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling based on vibration signals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(12), 1057-1064.

EKLER

EK-1. Uygunluk sertifikası

AVAS METAL SAN. ve TİC. A.Ş.

ISO 9001

UYGUNLUK SERTİFİKASI
(CERTIFICATE OF CONFORMITY)

Sertifika No (Certificate Number)	23037008	**Tarih** (Date)	08.03.2023

GENEL BİLGİ (GENERAL INFORMATION)

Forma (Form)	Plaka (Plate)	Lot No (Lot No)	84801
Ölçü (Dimension)	20x1250x2500 mm	Net ağırlık (Net weight)	2860 kg
Alaşım (Alloy)	7075	Adet (Piece)	1
Temper (Temper)	T6	Standart (Standard)	EN 573-3, EN 485-1, -2, -3

KİMYASAL BİLEŞİM (CHEMICAL COMPOSITION %)

Değerler (Values)	Elementler (Elements)										
Standard (Standard)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Impurities Each	Impurities Total	Al
Min.			1.20		2.10	5.10		0.18			
Max.	0.40	0.50	2.00	0.30	2.90	6.10	0.20	0.28	0.05	0.15	remainder
Test Sonuçları (Test Results)											
84801	0.2	0.43	1.5	0.16	2.7	5.7	0.03	0.21	<0.05	<0.15	remainder

MEKANİK ÖZELLİKLER (MECHANICAL PROPERTIES)

Standard (Standard)	Çekme Dayanımı (Mpa) (Ultimate Strength)	Akma Dayanımı (Mpa) (Yield Strength)	Uzama (%) (Elongation)	Sertlik (HB) (Hardness)
Min.	495	420	4	
Max.				
Test Sonuçları (Test Results)				
84801	534	456	9	

ULTRASONİK MUAYENE (ULTRASONIC INSPECTION)

Uygulandı (Done)	Uygulandı ise, standardı (If Done, Standarts)	Uygulanmadı (Not Done)	X

ONAY (APPROVAL)

- Avas Metal bu uygunluk sertifikası ile, müşteriye teslim edilen ve yukarıda özellikleri tanımlanan ürünlerin; müşteri sipariş şartlarını sağladığını, rapor üzerinde belirtilen teknik değerlerin doğruluğunu ve uluslararası standart şartlarına uygunluğunu beyan ve taahhüt eder. Bu uygunluk sertifikası, EN 10204 standardının 3.1 formatına uygun olarak hazırlanmıştır.
- Avas Metal with this conformity certificate, the products delivered to the customer and defined above features; customer order conditions, the accuracy of technical values stated on the report and compliance with international standard requirements.This conformity of certificate was prepared in format 3.1 in accordance with EN 10204 standard.



Gazili olmak ayrıcalıktır