



**Ti6Al4V MALZEMESİNİN DELİNMESİNDE FARKLI SOĞUTMA
YÖNTEMLERİNİN ETKİLERİ VE YSA İLE MODELLENMESİ**

Bahattin YILMAZ

DOKTORA TEZİ

İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2022

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Bahattin YILMAZ

08/08/2022

Ti6Al4V MALZEMESİNİN DELİNMESİNDE FARKLI SOĞUTMA YÖNTEMLERİNİN ETKİLERİ VE YSA İLE MODELLENMESİ

(Doktora Tezi)

Bahattin YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2022

ÖZET

Delme işlemi sıklıkla kullanılan ve en zorlu talaş kaldırma yöntemidir. İşlemin kapalı bir bölgede gerçekleşmesi, zayıf talaş tahliyesi, takıma ve iş parçasına geçen yüksek ısı gibi nedenler delme işlemini zorlaştırmaktadır. İşlenebilirliği düşük malzemelerin şekillendirilmesi esnasında delme işleminin mevcut zorlukları katlanarak artmaktadır. Ti6Al4V; sahip olduğu düşük termal iletkenliği ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle şekillendirilmesini zor bir malzemedir. Yine bu üstün özellikler malzemenin birçok sanayi alanında (uzay, havacılık, savunma, medikal, enerji vb.) tercih edilmesine neden olmuştur. Söz konusu sanayi alanları yüksek kalitede ve dar tolerans aralığında ürünlere gereksinim duymaktadır. Bu durum Ti6Al4V malzemenin yüksek hassasiyetle işlenmesini ve özellikle delinmesini gerekli kılmıştır. Talaşlı imalat yöntemlerinde verimliliği ve ürün kalitesini artırmak için soğutma uygulamaları kullanılmaktadır. Bu çerçevede Ti6Al4V malzemenin delinmesi işleminde soğutma yöntemlerinin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada Ti6Al4V malzemenin delinmesi sırasında farklı kesme parametrelerinin operasyon çıktılarına (ilerleme kuvveti, kesme momentleri, sıcaklık ve takım performansı) ve delik kalitesine (yüzey pürüzlülüğü, delik çapındaki değişim sapma, dairesellik ve silindirik değerleri) etkileri araştırılmıştır. Çalışmada dört farklı kesme hızı (20, 30, 45 ve 60 m/dak) ve dört farklı ilerleme oranı (0,050; 0,073; 0,100 ve 0,150 mm/dev) kullanılmıştır. Elde edilen veriler operasyon maliyetleri ve ürün (delik) kalitesi dikkate alınarak yapay sinir ağları ile başarılı bir şekilde modellenmiştir. Farklı soğutma yöntemleri geleneksel soğutma, kuru hava ile soğutma, vortex soğutma, minimum miktarda yağlama ile soğutma ve kriyojenik soğutma kullanılmış olup, bu yöntemlerin operasyon ve ürün çıktılarına etkileri incelenmiştir. Geleneksel soğutma ve kuru hava ile soğutma işlemleri hem takım içinden hem de takım dışından uygulanarak farklı soğutma tekniklerinin etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda takım içinden soğutmanın daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. En iyi ürün ve operasyon çıktıları takım içinden yapılan geleneksel soğutma yönteminde elde edilmiştir. Bu soğutma yönteminde değişen soğutucu akışkan basıncının (10, 20, 40 ve 60 bar) delme operasyonuna etkileri de incelenmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Ti6Al4V, Delme işlemi, Soğutma Yöntemleri, Soğutucu basıncı, YSA ile modelleme
Sayfa Adedi : 185
Danışman : Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

EFFECTS OF DIFFERENT COOLING METHODS ON DRILLING PROCESS OF
Ti6Al4V MATERIAL AND MODELLING VIA ANN

(Ph. D. Thesis)

Bahattin YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2022

ABSTRACT

Drilling is the most frequently used and most difficult machining method. Reasons such as performing the operation in a closed area, poor chip evacuation, high heat transfer to the tool and workpiece make drilling difficult. The existing difficulties of drilling increase exponentially when forming materials with low machinability. Ti6Al4V is a difficult material to shape due to its low thermal conductivity and high mechanical properties. And these superior properties have caused the material to be preferred by many industries (especially space and aerospace, defense, medical, energy). These industries require high quality and low tolerance products. This situation necessitated high precision machining and especially drilling of Ti6Al4V material. Cooling applications are used to increase productivity and product quality in machining methods. In this context, it is of great importance to use cooling methods in the drilling of Ti6Al4V material. In this study, the effects of different cutting parameters on the operation outputs (driving force, moments, temperature and tool performance) and hole quality (surface roughness, deviation from diameter, deviation from circularity and deviation from cylindricity) during drilling of Ti6Al4V material were investigated. Four different cutting speeds (20, 30, 45 and 60 m/min) and feed rates (0.050; 0.073; 0.100 and 0.150 mm/rev) were used in the study. The obtained data has been successfully modeled with artificial neural networks, taking into account the operation costs and the product (hole) quality. The effects of different cooling methods (conventional cooling, dry air cooling, vortex cooling, cooling with minimum amount of lubrication and cryogenic cooling) on operation and product output were investigated. Different cooling techniques were investigated by applying conventional cooling and cooling with dry air both inside and outside the tool. As a result of the studies, it has been determined that cooling through the tool is more advantageous. The best product and operational outputs were determined by the conventional in-kit cooling method. The contribution of the changing refrigerant pressure (10, 20, 40 and 60 bar) to the operation in this cooling method was also investigated in this research.

Science Code : 91438

Key Words : Ti6Al4V, drilling process, cooling methods, coolant pressure, modeling with ANN

Page Number : 185

Supervisor : Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

TEŞEKKÜR

Bu zorlu çalışma sürecinde engin tecrübesi ve bilgi birikimi ile her adımda bana rehberlik eden ve beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ'ye şükranlarımı sunarım.

Çalışma kapsamının ve içeriğinin belirlenmesinde yardım ve katkılarını esirgemeyen Tez İzleme Kurulu üyeleri Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ ve Prof. Dr. İhsan KORKUT'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında emeği geçen ve katkı sunan Doç. Dr. Gültekin UZUN, Doç. Dr. Yakup TURGUT, Doç. Dr. Fırat KAFKAS ve Dr. Öğrt. Üyesi Selçuk YAĞMUR'a ve bir şekilde emeği geçen İmalat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine de teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında ilgi alanlarına göre destek sağlayan kıymetli mesai arkadaşlarım araştırma görevlileri Dr. Ömer BAYRAKTAR, Saltuk Alper YAŞAR, Duygu GÜRKAN ve M. Okan KABAKÇI' ya ayrıca, bölümümüz diğer Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca 07/2019-32 nolu proje ile araştırmamıza maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına teşekkür ederim.

Son olarak, bu aşamaya kadar üzerimde paha biçilmez emekleri olan değerli annem ve babama; her konuda bana destek ve dayanak olan kıymetli eşim Elmas Nur ve kardeşim Yılmaz'a sevgi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK	7
2.1. Talaşlı İmalat.....	8
2.1.1. Talaş kaldırma mekaniği.....	14
2.1.2. Talaş oluşumu	17
2.1.3. Talaş tipleri.....	19
2.2. İşlenebilirlik	23
3. DELME İŞLEMİ	25
3.1. Matkaplar.....	28
3.2. Delme İşleminde Kuvvet Oluşumu	30
3.2.1. Kesme kuvveti (Fc)	31
3.2.2. İlerleme kuvveti (Ff).....	32
3.3. Delme İşleminde Delik Kalitesi	33
3.3.1. Deliğin yüzey kalitesi	34
3.3.2. Deliğin ölçü (boyut) toleransı.....	36

	Sayfa
3.3.3. Deliğin şekil ve konum toleransı	37
4. TALAŞLI İMALATTA SOĞUTMA	39
5. TİTANYUM MALZEMESİ.....	45
6. YAPAY SİNİR AĞLARI	49
6.1. Yapay Sinir Ağı Hücresi ve Elemanları	49
6.2. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı	51
6.3. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi	52
6.4. Normalizasyon İşlemi.....	53
7. LİTERATÜR TARAMASI.....	55
8. MALZEME VE METOT	75
8.1. Malzeme	76
8.2. Takım Tezgâhı.....	77
8.3. Tezgâh Soğutma Sistemi	77
8.4. Kesici Takım ve Takım Tutucu	79
8.5. Deney Tasarımı.....	80
8.6. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi	82
8.7. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi.....	83
8.8. Şekil ve Konum Toleranslarının Ölçülmesi	84
8.9. Sıcaklık Değerlerinin Ölçülmesi.....	85
8.10. Deneylerde Kullanılan Soğutma Yöntemleri	85
8.10.1. Geleneksel soğutmanın uygulanması	86
8.10.2. Kuru hava ile soğutma uygulaması	87
8.10.3. Vortex tüp ile soğutma uygulaması.....	88
8.10.4. MQL ile soğutma uygulaması	89

	Sayfa
8.10.5. Kriyojenik soğutma uygulaması.....	90
8.11. Deneysel Verilerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi.....	91
9. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	93
9.1. Kuru Kesme Şartları Altında Yapılan Deneyler.....	94
9.1.1. Kesme parametrelerinin ilerleme kuvvetlerine etkisi	94
9.1.2. Kesme parametrelerinin kesme momentlerine etkisi	97
9.1.3. Kesme parametrelerinin sıcaklık değişimine etkisi.....	99
9.1.4. Kesme parametrelerinin takım ömrüne etkisi	101
9.1.5. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi.....	110
9.1.6. Kesme parametrelerinin delik çapına etkisi	112
9.1.7. Kesme parametrelerinin dairesellik değerlerine etkisi	114
9.1.8. Kesme parametrelerinin silindiriklik değerlerine etkisi	116
9.2. Deneysel Verilerin YSA ile Modellenmesi	117
9.2.1. Operasyon maliyetleri için YSA modeli.....	118
9.2.2. Ürün (delik) kalitesi için YSA modeli	120
9.3. Farklı Soğutma Yöntemleri Eşliğinde Yapılan Deneyler.....	122
9.3.1. Soğutma yöntemlerinin ilerleme kuvvetine etkisi	122
9.3.2. Soğutma yöntemlerinin kesme momentlerine etkisi.....	126
9.3.3. Soğutma yöntemlerinin sıcaklık değişimine etkisi	129
9.3.4. Soğutma yöntemlerinin takım ömrüne etkisi.....	132
9.3.5. Soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülük değerine etkisi.....	139
9.3.6. Soğutma yöntemlerinin delik çapı ölçüsüne etkisi	141
9.3.7. Soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkisi.....	143
9.3.8. Soğutma yöntemlerinin silindiriklik değerlerine etkisi.....	145

	Sayfa
9.3.9. Soğutma yöntemlerinin değerlendirilmesi.....	147
9.4. Değişen Soğutucu Basıncı Eşliğinde Yapılan Deneyler.....	148
9.4.1. Soğutucu basıncının ilerleme kuvvetlerine etkisi	148
9.4.2. Soğutucu basıncının kesme momentlerine etkisi	149
9.4.3. Soğutucu basıncının sıcaklık değişimine etkisi.....	151
9.4.4. Soğutucu basıncının yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi.....	152
9.4.5. Soğutucu basıncının delik çapı ölçüsüne etkisi.....	153
9.4.6. Soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkisi.....	153
9.4.7. Soğutma yöntemlerinin Silindiriklik değerlerine etkisi	154
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	157
KAYNAKLAR	163
EKLER.....	177
ÖZGEÇMİŞ	183

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.1. İş parçasının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri.....	76
Çizelge 8.2. CNC tezgâha ait teknik özellikler	77
Çizelge 8.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kesici takımların özellikleri	80
Çizelge 8.4. Deney parametreleri.....	81
Çizelge 8.5. Yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri.....	84
Çizelge 8.6. Kesme yağı özellikleri	90
Çizelge 9.1. Operasyon maliyetleri için geliştirilen ağ modeli verileri	119
Çizelge 9.2. Operasyon maliyetleri için geliştirilen modele ait doğruluk göstergeleri ..	120
Çizelge 9.3. Ürün (delik) kalitesi için geliştirilen ağ modeli verileri	121
Çizelge 9.4. Ürün (delik) kalitesi için geliştirilen modele ait doğruluk göstergeleri.....	122

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ortogonal kesme modeli.....	16
Şekil 2.2. Talaşlı imalatta deformasyon bölgeleri	17
Şekil 2.3. Talaş tipleri	20
Şekil 2.4. Talaşın kendi kendine, takıma çarparak ve iş parçasına çarparak kırılması...	21
Şekil 3.1. Matkap bölümleri.....	29
Şekil 3.2. Delme operasyonu sırasında oluşan kuvvet bileşenleri	31
Şekil 3.3. Yüzey kalitesinin operasyon maliyetlerine etkisi	35
Şekil 5.1. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	46
Şekil 6.1. Yapay sinir ağları hücresinin elemanları	50
Şekil 6.2. Yapay sinir ağları katmanları.....	52
Şekil 8.1. Deney numunelerinde kullanılan delik yerleşim planı	76
Şekil 8.2. Kuru deneyler için hazırlanan deney düzeneği.....	82
Şekil 8.3. Soğutma sistemleri eşliğinde yapılacak deneyler için kurulan deney düzeneği	82
Şekil 8.4. Kuvvet ölçüm seti şeması	83
Şekil 9.1. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının ilerleme kuvvetlerine etkisi	94
Şekil 9.2. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının kesme momentlerine etkisi.....	97
Şekil 9.3. Talaş yapışmasının momentler üzerine etkisi.....	99
Şekil 9.4. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının sıcaklık değişimine etkisi	100
Şekil 9.5. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının takımın aldığı yol değerlerine etkisi.....	102
Şekil 9.6. Ek numuneler üzerinden yapılan nihai takımın aldığı yol değerleri.....	103
Şekil 9.7. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkisi	111
Şekil 9.8. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının delik çapındaki değişime etkisi	113

Şekil	Sayfa
Şekil 9.9. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının dairesellik değerlerine etkisi	115
Şekil 9.10. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının silindiriklik değerlerine etkisi	116
Şekil 9.11. Operasyon maliyetleri için geliştirilen ağ yapısı	118
Şekil 9.12. Ürün (delik) kalitesi için geliştirilen ağ yapısı	120
Şekil 9.13. Farklı soğutma yöntemlerinin ilerleme kuvvetine etkisi	123
Şekil 9.14. Farklı soğutma yöntemlerinin kesme momentlerine etkisi.....	127
Şekil 9.15. Farklı soğutma yöntemlerinin sıcaklık değerlerine etkisi.....	130
Şekil 9.16. Farklı soğutma yöntemlerinin takım ömrüne etkisi.....	133
Şekil 9.17. Farklı soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri.....	139
Şekil 9.18. Farklı soğutma yöntemlerinin delik çapı ölçüsüne etkisi	142
Şekil 9.19. Farklı soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkileri.....	144
Şekil 9.20. Farklı soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri	139
Şekil 9.21. Değişen soğutucu basıncının ilerleme kuvvetleri üzerinde etkileri.....	149
Şekil 9.22. Değişen soğutucu basıncının kesme momentlerine etkisi	150
Şekil 9.23. Değişen soğutucu basıncının sıcaklık değerleri üzerinde etkileri.....	151
Şekil 9.24. Değişen soğutucu basıncının yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde etkileri .	152
Şekil 9.25. Değişen soğutucu basıncının delik çapı üzerinde etkileri.....	153
Şekil 9.26. Değişen soğutucu basıncının dairesellik değerleri üzerinde etkileri	154
Şekil 9.27. Değişen soğutucu basıncının silindiriklik değerleri üzerinde etkileri	155

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 8.1. Takım içinden hava ile soğutma sistemi	78
Resim 8.2. Çalışma kapsamında geliştirilen takım içinden soğutma basınç ayar sistemi	79
Resim 8.3. Takım içinden ve takım dışından uygulanan geleneksel soğutma.....	87
Resim 8.4. Kuru hava ile soğutma deney düzeneği	88
Resim 8.5. Vortex ile soğutma deney düzeneği.....	89
Resim 8.6. MQL ile soğutma deney düzeneği.....	90
Resim 8.7. Kriyojenik soğutma işleminde kullanılan deney düzeneği.....	91
Resim 9.1. Takım-talaş görselleri (a; 16 nolu deneye, b; 4 nolu deneye ait görseller)	96
Resim 9.2. Artan kesme hızı ile değişen matkap ucu görselleri	97
Resim 9.3. Talaş yapışması sonucunda takımda görülen hasar	104
Resim 9.4. Takım SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 8 nolu, (b); 11 nolu ve (c); 16 nolu deneylere ait takımlar.....	105
Resim 9.5. Talaş SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 8 nolu, (b); 11 nolu ve (c); 16 nolu deneylere ait talaşlar.....	108
Resim 9.6. Takım içinden yapılan soğutmanın talaş boyutlarına etkisi	124
Resim 9.7. Takım SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 24 nolu ve (b); 25 nolu deneylere ait takımlar.....	136
Resim 9.8. Talaş SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 24 nolu ve (b); 25 nolu deneylere ait talaşlar	138
Resim 9.9. Artan soğutucu basıncı ((a): 10 bar, (b): 20 bar, (c): 40 bar, (d): 60 bar) ile değişen talaş görselleri.....	151

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

bar	Basınç
°C	Derece Santigrat
cm³	Santimetre küp
dak	Dakika
dev	Devir
g	Gram
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü

Kısaltmalar

Açıklamalar

ARGE	Araştırma Geliştirme
BUE	Built Up Edge (Yığıntı Talaş)
CMM	Koordinat Ölçme Makinesi
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
GS	Geleneksel Soğutma
HMK	Hacim Merkezli Kübik Yapı
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KHS	Kuru Hava ile Soğutma
KRYJ	Kriyojenik Soğutma
ML	Minimum Miktarda Yağlama

Kısaltmalar**Açıklamalar****PVD**

Fiziksel Buhar Biriktirme

SEM

Tarama Elektron Mikroskobu

TD

Takım Dışından Soğutma

Tİ

Takım İçinden Soğutma

TSE

Türk Standartlar Enstitüsü

TY

Takımın Aldığı Yol

VRTX

Vortex Soğutma

YSA

Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Makine-İmalat sektörü farklı üretim prensiplerini bünyesinde barındıran önemli sanayi alanlarının başında gelmektedir. Herhangi bir iş parçasının üretilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de talaşlı imalat yöntemidir. Talaşlı imalat yöntemi; ham iş parçası üzerinde arzu edilen şeklin istenilen boyut, tolerans ve kalitede elde edilebilmesi için ölçü fazlası kısımların talaş kaldırılarak kesilmesi prensibine dayanır. Talaşlı imalat yönteminin farklı malzemelere kolayca uygulanabilmesi, ölçü tamlığına yakın toleranslarda üretim yapabilmesi, çeşitlenmiş takım-tezgâh donanımları ile farklı geometrileri kolayca işleyebilmesi gibi üstün özellikleri, diğer imalat yöntemlerine göre avantaj sağlamıştır [1].

Talaşlı imalat yönteminin yüksek verim ile gerçekleşmesi ürün maliyetleri ve performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Operasyon sırasında tüketilen enerji ve kesici takım ömrü gibi maliyet kalemlerinin düşük seviyelerde olması, yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk gibi ürün özelliklerinin de üst seviyelerde olması arzu edilmektedir. Talaşlı imalatta yüksek verim elde etmek için kesilen malzemeye göre kesme ve takım parametrelerinin doğru belirlenmesi ve uygun tezgâh seçimi gerekir. İşlenebilirlik bir malzemenin talaşlı imalat yöntemi ile şekillendirilmesinin kolaylık ya da zorluk seviyesini ifade etmektedir. Bir başka açıdan işlenebilirlik; iş parçasının işlenebilme, şekillendirilme kabiliyetini ifade etmektedir. İş parçasının kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, mikro yapısı gibi değişkenler işlenebilirliği etkilemektedir. İşlenebilirliğin kötü olması operasyon verimliliğini de olumsuz etkileyecektir [2, 3].

Talaşlı imalat yöntemi; farklı kesme prensipleri, özelleşmiş takım-tezgâh donanımları ile alt başlıklara ayrılmıştır. Bu yöntemler; iş parçasına farklı boyutlar ve özellikler kazandırmak amacıyla tornalama, frezeleme, delme, raybalama, vargelleme, tıg çekme, planyalama gibi işlemler şeklinde uygulanmıştır. Bu talaşlı imalat yöntemleri arasında delme uygulamaları büyük öneme sahiptir. Makine parçalarının montajını sağlayan birçok bağlama elemanının (vida, pim, perçin vb.) kullanımı için iş parçasına delik açılması zorunludur. Bu nedenle delme uygulamaları en çok başvurulan talaşlı imalat yöntemlerinin başında gelmektedir. Delme uygulamaları talaşlı imalat işlemlerinin yaklaşık %33'üne karşılık gelmektedir. Delme uygulamaları bu kadar önemli olmasına rağmen diğer talaşlı imalat yöntemlerine göre bazı zorlukları da bünyesinde barındırmaktadır [4]. Delme işleminin kapalı bir bölgede

gerçekleşmesi bu operasyonu güçleştiren durumların başında gelmektedir. Ayrıca talaş tahliyesinin kesici takımın helis kanalları üzerinden yapılması, ısının diğer yöntemlere göre kolay transfer edilememesi, talaşın iş parçası ve takım arasına sıkışması gibi nedenler delme uygulamalarını zorlaştırmaktadır. Tüm bunlara ek olarak deliklerin genellikle eş çalışan parçalar tarafından ve montaj ekipmanlarınca kullanılması delik kalitesinin önemini artırmaktadır. Delme uygulamaları; söz konusu zorluklara rağmen yüksek kalitede ürünlerin (deliklerin) elde edilmesini gerektiren bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu durum delme uygulamalarının ek operasyonlar ile desteklenmesine (raybalama vb.) yol açmıştır. Ancak, ek operasyonlar işlem sürelerini ve maliyetlerini artırmıştır. Yüksek verimlilik için delik uygulamalarının tüm zorluklara rağmen yüksek kalitede ve tek seferde gerçekleştirilmesi gerekmektedir [5, 6].

Talaşlı imalat yöntemlerinde verimi artırmak ve karşılaşılan problemleri çözmek için soğutma uygulamalarının kullanılması yaygın bir uygulamadır. Talaşlı imalat kapsamında soğutma uygulamaları 19. Yüzyılın ortalarından beri kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sırasında açığa çıkan yüksek ısı başta kesici takım performansı olmak üzere operasyon güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Kesme sırasında oluşan bu yüksek ısının etkili bir şekilde kesme bölgesinden uzaklaştırılması yine etkili bir soğutma uygulaması ile mümkündür. Etkili bir soğutma kesme bölgesinde oluşan ısıyı uzaklaştırır, talaş tahliyesini hızlandırır, takım – talaş arasında film tabakası oluşturarak yağlama yapar ve sürtünmeleri azaltır. Tüm bu katkıları ile soğutma uygulaması takım ömrünü ve operasyon verimliliğini artırmaktadır [7]. Ancak kimyasal bazlı soğutma sıvılarının kullanımı beraberinde insan sağlığına zarar verme ve çevre kirliliği sorunlarını getirmektedir. Kimyasal bazlı soğutma sıvılarının atık yönetimi etkili bir şekilde yapılmadığı takdirde çevreye büyük zarar vermektedir. Bununla birlikte uzun süreler bu soğutuculara maruz kalındığı takdirde başta cilt sağlığı olmak üzere önemli sağlık sorunları da görülmektedir [8]. Bu durum soğutma uygulamalarında çevreci yaklaşımları ve düşük miktarda soğutucu kullanımı ile yüksek verimlilik elde etmeye yönelik araştırmaları önemli kılmaktadır. Bu yaklaşımlar ve talaşlı imalat yöntemlerinin ihtiyaçları farklı tiplerde soğutma uygulamalarının oluşmasına neden olmuştur. İmalat sırasında karşılaşılan problemleri kolay bir şekilde çözmek için kullanılan soğutma sıvıları ve soğutma uygulamaları farklılık göstermektedir. Takım- talaş temasının yüksek olduğu ve yüksek basınçların açığa çıktığı operasyonlarda saf kesme yağları yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme parametrelerine bağlı olarak görülen yüksek sıcaklıkların olduğu operasyonlarda su bazlı soğutucular tercih edilmektedir. Soğutucu akışkanın kesme

bölgesine daha etkili nüfuz etmesi için gaz veya gaz destekli soğutucular kullanılmaktadır. Operasyon ihtiyaçları dikkate alınarak geleneksel soğutma, minimum miktarda yağlama, kriyojenik soğutma gibi farklı soğutma yöntemleri çeşitlenmiştir [9].

Delme uygulamalarında görülen sorunlar; zorlu talaş tahliyesi, talaş sıkışmasına bağlı takım hasarları, düşük ısı transferi ve iş parçası ile kesici takıma geçen yüksek ısı gelmektedir. Soğutma uygulamaları talaş tahliyesini hızlandırarak, kesme bölgesinde oluşan yüksek ısıyı başarılı bir şekilde uzaklaştırarak talaşlı imalat operasyonlarına önemli katkılar sağlamıştır. Delme uygulamalarında görülen sorunların çözümünde de soğutma yöntemlerinin kullanılması büyük önem kazanmıştır. Özellikle işlenebilirliği düşük malzemelerin delme yöntemi ile şekillendirilmesinde karşılaşılan sorunların, soğutma uygulamaları sayesinde aşılmaktadır.

Titanyum alaşımları; yüksek korozyon direnci, mekanik ve termal özellikleri, yüksek dayanım-ağırlık oranları ve düşük özgül ağırlığı ile tercih edilen malzemeler arasında üst sıralarda yer almaktadır. Ayrıca titanyum alaşımlarının bu üstün özelliklerini yüksek sıcaklıklar altında koruyor olması malzemeye olan ilgiyi daha da artırmaktadır. Titanyum alaşımları başta uzay ve havacılık olmak üzere medikal, otomotiv, elektronik, petrokimya ve nükleer gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir malzeme olmuştur. Titanyum alaşımları arasında Ti6Al4V en çok kullanılan alaşımdır. Tüm bunlara rağmen titanyum alaşımlarının bu üstün özellikleri malzemenin şekillendirilmesini güçleştirmekte ve işlenebilirliği düşük malzemeler sınıfında yer almasına sebep olmaktadır. Titanyum alaşımlarının sahip oldukları düşük ısı iletkenliği ($15 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$) kesme sırasında açığa çıkan ısıнын transferini zorlaştırmaktadır [10]. Kesme bölgesinde kalan yüksek ısı titanyum alaşımının mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmezken, kesici takım performansını olumsuz etkilemektedir. Kesme sırasında oluşan mekanik yükler ve bu olumsuz termal koşullar takım aşınması mekanizmalarının devreye girmesine neden olmaktadır. Mevcut şartlar altında devam eden kesme işlemi, kesici takım ve titanyum alaşımları arasındaki kimyasal ilgi nedeni ile talaşın takım üzerine yapışması ve takımın işleme ömrünü tamamlaması ile sonuçlanmaktadır. Titanyum alaşımlarının talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilmesinde ideal kesme şartlarının belirlenmesi ve uygun kesme koşullarının oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Titanyum alaşımlarının şekillendirilmesi sırasında soğutma ve yağlama uygulamasının kullanılması operasyon verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır [11, 12].

Tüm bu bilgiler ışığında bu çalışmada Ti6Al4V malzemenin farklı kesme parametreleri ve soğutma uygulamaları eşliğinde delinmesine yönelik bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırma ile başta yüzey pürüzlülüğü olmak üzere delik çapındaki değişim (çaptan sapma), dairesellikteki değişim (dairesellikten sapma) ve silindiriklikteki değişim (silindiriklikten sapma) değerleri gibi önemli kalite ölçütleri için optimum kesme parametrelerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Talaşlı imalatla yüksek verimlilik ürün kalitesinden ödün vermeden maliyetlerin düşürülmesi ile mümkündür. Bu nedenle takım maliyetleri, enerji tüketimi ve soğutma maliyetlerinin düşük seviyede tutulması gerekmektedir. Operasyon maliyetleri açısından uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi bu çalışmanın hedefleri arasında yer almaktadır. Kesme işlemleri sırasında kullanılan soğutucu sıvıların, operasyon maliyetine etkilerinin yanı sıra çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri de bilinmektedir. Farklı soğutma sistemleri ve soğutucu basınçlarının delme işlemine katkıları araştırılarak, ideal soğutma yöntemi ve soğutucu basıncının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Düşük işlenebilirliği olan Ti6Al4V malzemesinin zorlu delme operasyonu ile şekillendirilmesi sırasında uygun kesme parametrelerinin ve soğutma yönteminin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu araştırmanın, uygun kesme parametreleri ve soğutma yöntemini tespit ederek Ti6Al4V malzemenin delinmesi sırasında azami oranda kalite ve verimin elde edilebilmesi için yol gösterici bir çalışma olması hedeflenmiştir. Bu çerçevede kuru şartlar altında dört farklı kesme hızı (20, 30, 45 ve 60 m/dak) ve ilerleme oranı (0,050; 0,073; 0,100 ve 0,150 mm/dev) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Kuru şartlar altında yapılan bu deneyler sonucunda kesme parametrelerinin Ti6Al4V malzemenin şekillendirilmesine katkıları araştırılmıştır. Araştırma çıktıları olarak ilerleme kuvvetleri, kesme momentleri, takımın ömür performansı, sıcaklıklar, yüzey pürüzlülüğü, delik çap ölçüsü, dairesellik ve silindiriklik ölçülmüş ve kıyaslanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çıktıların parametrelere bağlı değişimi ve delme sürecinin nasıl şekillendiği yorumlanmıştır.

Soğutma uygulamalarının delme sürecine katkılarının araştırıldığı deneysel çalışmalar çalışmanın diğer safhasını oluşturmaktadır. Kuru şartlarda yapılan deneyler sonucunda takım performansına bağlı olarak belirlenen sabit kesme parametreleri (kesme hızı; 45 m/dak ve ilerleme oranı 0,100 mm/dev) eşliğinde farklı soğutma yöntemlerinin çıktılar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında geleneksel soğutma, kuru hava ile soğutma, minimum miktarda yağlama ile soğutma, vortex tüp ile soğutma ve kriyojenik soğutma yöntemlerine yer verilmiştir. Bu soğutma yöntemlerinden geleneksel soğutma ve kuru hava

ile soğutma uygulamalarında, soğutma işlemi hem takım içinden hem de takım dışından uygulanarak, farklı soğutma tekniklerinin de katkıları araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların son kısmında soğutucu akışkan basıncının işleme sürecine katkıları incelenmiştir. Bu çerçevede takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yöntemi dört farklı soğutucu basıncı (10, 20, 40 ve 60 bar) kullanılarak uygulanmıştır.

Son olarak kuru kesme koşulları ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler yapay sinir ağları yardımı ile modellenmiştir. Bu çalışma ile operasyon maliyetlerini ve ürün kalitesini dikkate alan iki farklı matematiksel model ortaya konulmuştur. Ti6Al4V malzemesinin delinmesi için uygun çalışma parametreleri ve soğutma yöntemi belirlenmiştir. Uygun soğutma tekniklerinin ve soğutucu basınçlarının delme işlemine etkileri irdelenmiş olup, endüstriyel uygulamalara ve sonraki akademik araştırmalara önemli sonuçlar sunulmuştur.



2. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

Nesnelerin bir hedef gözetilerek şekillendirilmesi, insanlık tarihi boyunca en önemli faaliyetlerden biri olmuştur. Tüm bu faaliyetler imalat operasyonları olarak ifade edilmektedir. İmalatın felsefi temelinde, ham madde ya da yarı mamul bir malzemeye işlev kazandırılması veya işlevini artırmak için şekillendirilmesi vardır. Tarihsel süreç incelendiğinde imalat uygulamaları için insan veya hayvan gücü kullanılırken, operasyonun kalitesini de el becerisi belirlemekteydi. Ancak 19. Yüzyılda gerçekleşen sanayi devrimiyle önce buhar makinesinin ardından devam eden süreçte elektrik enerjisinin bulunması ile insan / hayvan gücünün yerini mekanik güç almıştır. El becerisi ise zamanla yerini sayısal denetimli tezgâhlara bırakmıştır. Bu durum imalatın yüksek kaliteyle gerçekleşmesinin temelini oluşturmuştur. İmalatın kolaylaşması ve sistematikleşmesi birçok sanayi dalının (tarım, tekstil, gıda vb.) gelişimini tetiklemiş, ülke kalkınması ve ekonominin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Tüm bu etkileri ve önemi “imalat” konusunu önemli çalışma alanlarından biri haline getirmiştir [13].

Bir çalışma alanı olarak imalat ele alındığında iki önemli tanım karşımıza çıkmaktadır. Ekonomik açıdan imalat; bir veya birden fazla operasyon ve montaj işlemi uygulanarak bir ürünü katma değeri daha yüksek başka bir ürüne dönüştürme sürecidir. Bir ürünün satış fiyatını etkileyen en önemli başlık imalat maliyetleridir. İmalat maliyetleri satış fiyatını %40'lara varan bir oranla etkilemektedir. İmalat maliyetlerini de %50'lik bir oranla malzeme girdileri oluşturmaktadır. İmalatın düşük maliyetle, yüksek kalitede ve arzulanan zaman içerisinde gerçekleştirilmesi ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır [1, 14]. İmalatın ikinci tanımı ise teknolojik açıdan yapılmaktadır. Teknolojik olarak imalat; ham madde ya da yarı mamulün geometrisinin, özelliklerinin, boyutlarının veya görünümünün değiştirilmesi için fiziksel, kimyasal ve mekanik işlemlerin uygulanmasıdır. Bu yaklaşım takım, tezgâh, işçilik ve güç gibi imalatı etkileyen unsurları da kapsar.

İmalat yöntemlerinin sınıflandırılması, operasyonları daha rahat analiz edebilmek açısından büyük öneme sahiptir. İmalat yöntemlerini oluşturan işlemlerin gruplandırılması ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sınıflandırmada imalat; işleme yöntemleri ve montaj işlemleri olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Montaj işlemleri, kalıcı birleştirme işlemleri ve mekanik birleştirme olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmiştir [1]. İşleme yöntemleri

ise şekillendirme işlemleri, özellik geliştirici işlemler ve yüzey işlemleri olarak üç ana başlık altında toplanmıştır. Şekillendirme yöntemleri; mekanik yöntemler ve fiziksel-kimyasal yöntemler olmak üzere iki grupta incelenmiştir [15]. Fiziksel – kimyasal işleme yöntemleri arasında elektro erozyon, su jeti, lazer, plazma, tel erozyon ve diğer kimyasal, elektrokimyasal ve elektron işlemler yer almaktadır. Bu yöntemler modern imalat yöntemlerini oluşturmaktadır. Ancak en önemli imalat yöntemi başlığını mekanik yöntemler oluşturmaktadır. Mekanik imalat yöntemleri talaşlı ve talaşsız olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. Talaşsız imalat yöntemleriyle ürünü şekillendirirken malzeme üzerinden talaş kaldırılmaz, bu yöntemler tozların sinterlenmesi, malzemenin ergiyik halinin kalıba dökülmesi ya da belirli bir yük altında malzemenin plastik şekillendirilmesini kapsamaktadır. Talaşsız imalat yöntemleri üretim süreleri kısa olmasına rağmen, yüzey ve boyut toleransları arzu edilen kalitede elde edilememektedir [9].

Talaşlı imalat yöntemleri; istenmeyen fazla malzemeyi talaş olarak uzaklaştırarak arzu edilen boyut ve toleranslarda ürünün elde edilmesi işlemlerini kapsar [1, 16]. Talaşlı imalat birçok alt operasyonu bünyesinde barındırır. Frezeleme, tornalama, delik açma, vargelleme, planyalama, honlama, taşlama, vb. birçok operasyon talaşlı imalatı oluşturmaktadır. Talaşlı imalatın yapılabilmesi için bu operasyonlara özgü kesici takımlar ve takım tezgâhları geliştirilmiştir. Talaşlı imalat uygulamaları hemen hemen her malzemeye rahatlıkla uygulanması, başta silindirik, prizmatik olmak üzere düz ve karmaşık geometrileri kolayca oluşturması ve hem yüzey hem de boyut toleranslarının yüksek hassasiyetle kazandırılması nedeni ile diğer imalat yöntemlerine göre tercih edilmektedir. Ayrıca farklı geometrilere ve farklı özelliklerde ürünlere yönelik özel takımlar ve işlemlerin geliştirilmesi talaşlı imalat ile daha kolaydır [17].

2.1. Talaşlı İmalat

Talaşlı imalat; metallerin şekillendirilmesinde temel imalat yöntemi olup makine imalat sanayinde en çok başvuru alan şekillendirme yöntemidir. Ürünün şekillendirme aşamalarında ilk olarak talaşlı imalat ya da başka imalat yöntemleri (döküm, haddeleme, ekstrüzyon vb.) kullanılsa da genellikle son işlem talaşlı imalat olmaktadır.

Talaşlı imalat operasyonlarında temel amaç iş parçasına istenilen geometriyi kazandırmaktır. Bu amaç doğrultusunda ham madde ya da yarı mamul, uygun takım tezgâhları ve kesici

takımlar aracılığı ile şekillendirilerek üzerindeki fazlalıklardan arındırılır [18]. Talaşlı imalat kesici takım ve iş parçasının birbirine göre izafi hareketleri ile gerçekleşir. Bu hareketler operasyon özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Bu hareketler esas kesme hareketi, ilerleme hareketi ve yardımcı hareketler olarak ifade edilir. Kesme hareketi talaş kaldırmayı sağlayan ana harekettir. İlerleme hareketleri ise parçanın uzunluğu, genişliği ve derinliği boyunca takımın hareketini mümkün kılan ve operasyonun sürekliliğini sağlayan hareketlerdir. Yardımcı hareketler ise takımın iş parçasına yaklaşması, uzaklaşması ve pozisyon alması gibi ayar hareketlerini içerir. Talaş kaldırma operasyonlarında esas kesme hareketini dönme ve doğrusal hareketler oluştururken ilerleme ve yardımcı hareketler genellikle doğrusal hareketler ile gerçekleştirilir. Bu farklı hareket kombinasyonları talaşlı üretim yöntemlerinin çeşitlenmesini sağlamıştır [15]. Talaşlı imalat uygulamalarında takımın kesme hareketinin şekline göre üç farklı kesme çeşidi belirtilmiştir. Vargelleme – planyalama ve tığ çekme (broşlama) gibi kesme işlemlerinde takım doğrusal hareketler yapar ve bu kesme hareketi neticesinde doğrusal kesme oluşur. Takım tarafından dairesel kesme hareketinin uygulandığı frezeleme gibi işlemler ise dönel kesme olarak tanımlanır. Matkap ile delme işleminde olduğu gibi hem dairesel hem doğrusal hareketin takım tarafından gerçekleştirildiği uygulamalarda bileşik kesme ya da helisel kesme olarak ifade edilir [14].

Talaşlı imalatla söz konusu bu bağıl hareketler sayesinde iş parçasının kesici takım önünde kalan bölümü plastik deformasyona uğrar. Deformasyona uğrayan bu bölüm talaş olarak nitelendirilir ve iş parçasından uzaklaştırılır [19].

Talaşlı imalat yöntemleri; farklı geometrilerdeki iş parçalarının işlenebilmesi amacıyla çeşitlendirilmiştir. İş parçası ve kesici takımın farklı izafi hareketleri, operasyon özelliklerine göre değişen kesici takım geometrileri ve takım tezgâhları bu çeşitliliği oluşturmuştur. Talaşlı imalat yöntemleri; tornalama, frezeleme, delik açma, taşlama, planyalama-vargelleme gibi farklı uygulamalar ile farklı geometrik özellikleri iş parçasına kazandırabilmektedir. Ayrıca bu yöntemleri destekler nitelikte olan vida açma, diş açma, kılavuz çekme, honlama gibi ek operasyonlar da mevcuttur.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri tornalama, frezeleme ve delme işlemleridir. Tornalama uygulamalarında, genellikle silindirik iş parçaları şekillendirilmektedir. Tezgâha bağlı iş parçası dönerek esas kesme hareketini, kesici takımın

doğrusal hareketleri ise ilerleme ve yardımcı hareketleri oluşturur. İş parçasının dönmesi ile sağlanan esas kesme hareketi silindirik formların elde edilmesine imkân sağlar. Tüm bu hareketler sonucunda iş parçası talaş kaldırılarak şekillendirilir ve istenen form malzemeye kazandırılır. Frezeleme uygulamalarında, ise genellikle prizmatik parçalar şekillendirilir. Bu operasyonda kesici takım döner ve böylece esas kesme hareketi sağlanmış olur. İş parçasının doğrusal hareketleriyle ilerleme hareketleri ve yardımcı hareketler elde edilir. Talaş kaldırma bu şekilde sağlanır ve malzemeye istenilen şekil kazandırılır. Delik açma işleminde ise bazı durumlarda takım (sütunlu matkap veya freze tezgâhlarında) bazı durumlarda ise parça (torna tezgâhlarında) dönerek kesme işlemi gerçekleşir. Genel anlamda delik delme operasyonları için esas kesme hareketi takımın dönme hareketi olarak tanımlanabilir. Delik açma uygulamaları ile boydan boya, kör ya da kademeli delikler iş parçasına kazandırılır. Bunlar haricinde talaşlı imalat yöntemleri ile farklı takım tezgâhları ve kesici takımlar geliştirilerek iş parçalarına farklı özellikler kolaylıkla kazandırılabilir [15, 17].

Üretim süreçleri; bir ürünün şekil ya da boyut olarak şekillendirilmesinin yanında onun verimli bir şekilde çalışabilmesi için gerekli toleransları da sağlar. Talaşlı imalat sürecinde ürünün fonksiyonlarını arzu edildiği gibi yerine getirebilmesi için gerekli toleransların sağlanmasına özen gösterilir. Talaşlı imalat yöntemleri boyutsal kalite, geometrik kalite ve yüzey kalitesi gibi ürünün işlevini ve ömrünü belirleyen önemli toleransları küçük hassasiyetlerde sağlayabilmektedir. Bu hassas toleranslara ulaşılması için tek bir işlem ya da ardışık talaşlı imalat işlemleri kullanılmaktadır [20].

Talaşlı imalat yöntemleri gelişen takım tezgâhları ve kesici takım teknolojisi sayesinde hemen hemen tüm malzemelere kolaylıkla uygulanmaktadır. Talaşlı imalat uygulamaları polimer esaslı malzemelerden uzay ve havacılık alanının en özel malzemelerine kadar çok geniş bir yelpazeye hitap etmektedir.

Genel olarak talaşlı imalat yöntemlerinin diğer imalat yöntemlerine göre daha çok tercih edilmesinin sebepleri ve avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Genel olarak tüm malzemeler ve özellikle metaller kolaylıkla şekillendirilebilmektedir.
- Farklı geometrik özellikler ve karmaşık yapılar talaşlı imalatın farklı operasyonları ile rahatlıkla elde edilmektedir. Talaşlı imalat yöntemleri sırasıyla uygulanarak operasyon çeşitliliği ve buna bağlı olarak farklı geometrilerin kolayca elde edilmesine imkân

sağlamaktadır.

- Talaşlı imalat yöntemleri ile diğer yöntemlerin ulaşamadığı dar toleranslar elde edilebilmektedir.
- Talaşlı imalat uygulamalarına özel kesici takımlar, aparatlar ve takım tezgâhları eklenerek işlem çeşitliliği artırılabilir. Bu durum, üretim sırasında karşılaşılabilecek sorunlara önemli bir çözüm sunmaktadır.
- Talaşlı imalat ile üstün yüzey kalitelerine sahip malzemeler üretilebilir.

Talaşlı imalat yöntemleri geniş avantajlara sahip olmasının yanında bazı dezavantajları da bünyesinde taşımaktadır. Talaşlı imalat yöntemlerinin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Operasyon sırasında iş parçası üzerinden kaldırılan talaş malzeme kaybına neden olmaktadır. Özellikle uzay ve havacılık alanı gibi özel malzemelerin kullanıldığı sektörlerde talaş olarak atılan malzeme önemli bir maddi kayba ve israfa neden olmaktadır.
- Talaşlı imalat yöntemleri sonucu açığa çıkan atık malzeme niteliğindeki talaşların geri dönüşümü ek maliyetlere neden olmaktadır.
- Soğutma ve yağlama uygulamaları nedeni ile bazı durumlarda çevreci değildir. Kimyasal bazlı sentetik ve yarı sentetik soğutucuların kullanımı depolanması ve arıtılması ek maliyetleri doğurmaktadır.
- Talaşlı imalat sırasında talaş kontrolü büyük önem taşımaktadır. Kontrolsüzce uzayan talaş; operatör güvenliği, tezgâh güvenliği ve iş parçası kalitesinin düşmesi gibi önemli tehlikeleri beraberinde getirmektedir.
- Tüm imalat süreçlerinde olduğu gibi talaşlı imalat da iş sağlığı ve güvenliği açısından önemli tedbirlerin alınmasını gerektirmektedir.

Talaşlı imalatın yüksek verimlilikte gerçekleşmesi için kesme koşulları çok iyi ayarlanmalıdır. Kesme işlemini etkileyecek birçok faktör mevcuttur. Tüm bu faktörlerin optimum düzeylerde tutulması işleme kalitesini önemli ölçüde artıracaktır. Talaş kaldırma uygulamalarını etkileyen önemli faktörlerin başında kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği gelmektedir. Bu faktörlere ek olarak tezgâh özellikleri, takım özellikleri, iş parçası özellikleri, talaş oluşumu, kesme kuvvetleri, kesme sırasında oluşan ısı, takım aşınması, kesme sıvıları gibi birçok faktör talaşlı imalatı doğrudan etkilemektedir. Ancak operasyon

öncesinde doğru belirlenmemiş kesme koşulları, diğer faktörlerin de olumsuz seyretmesine neden olacaktır. Talaş kaldırma sürecinde kesme parametrelerinin ideal seviyelerde tutulmaması kesme kuvvetleri, ısı, takım aşınması, titreşim gibi diğer faktörleri de olumsuz etkilemektedir[21].

Kesme işlemi, yukarıda da bahsedildiği gibi takım ve iş parçası arasındaki izafi hareketlerin bir sonucudur. Söz konusu bu hareketlerin hızları operasyon açısından büyük önem taşımaktadır.

Kesme hızı; kesici takımın kesme yönü doğrultusunda yaptığı hareketin hızını ifade eder. İş parçası ve kesici takım malzemeleri ve özellikleri kesme hızları üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Kesme hızları farklı kesme şartları için deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda belirlenmektedir. Bu hız takımın dakikada metre cinsinden aldığı yolu belirtir. Bu açıdan kesme hızı operasyon süreleri ve işleme maliyetleri açısından büyük önem taşımaktadır [15]. Yine kesme hızları takım aşınması açısından da büyük öneme sahiptir. Yüksek kesme hızları takım aşınmalarının artmasına neden olmakta bu durum ise, operasyon maliyetlerini artırmaktadır. Bu iki husus dikkate alınarak kesme hızlarının ideal şartlarda belirlenmesi gerekmektedir [13].

Esas kesme hareketinin dairesel olduğu talaşlı imalat uygulamalarında, operasyon türüne göre iş parçası ya da kesici takım devrinin kesme hızı ile doğrudan bir ilişkisi vardır. Kesme hızı ve devir sayısı arasındaki ilişki;

$$V = \frac{\pi d N}{1000} \quad (2.1)$$

Eş 2.1 ile belirlenir. Burada V ; kesme hızını, d ; iş parçası ya da kesici takım çapını, N ; iş parçası ya da kesici takım devrini (dev/dak) ifade etmektedir [1]. Kesme hızının birimi m/dak 'dır. Formülde verilen çap ölçüsü milimetre (mm) cinsinden ifade edildiği için eşitlik 1000'e bölünmüştür.

Talaş kaldırma esnasında esas kesme hareketinin genellikle dairesel oluşu sebebiyle, kesme işlemi operasyon türüne göre iş parçasının ya da kesici takımın çevresinde gerçekleşmektedir. İşlem sırasında kesme doğrultusu boyunca hareket eden takım bir tam

turunu tamamladığında tornalama operasyonlarında iş parçasının, frezeleme ve delme gibi operasyonlarda ise kendisinin çevresi kadar yol almış olur. Bir dakikada yapılan tur sayısı ise, iş parçası ya da kesici takımın devri (N) olarak tanımlanmaktadır [14].

İlerleme hızı; kesici takımın kesme doğrultusuna dik bir şekilde yaptığı hareketin hızını ifade eder. İlerleme hızı talaş kaldırma işleminin sürekliliğini sağlamaktadır. İş parçası ve kesici takım malzemesi özellikleri yanında ürün kalitesi ve tezgâh kapasitesi de ilerleme hızının belirlenmesinde etkilidir. İlerleme hızı takımın bir dakikada milimetre cinsinden aldığı yol (mm/dak) ile tanımlanmaktadır. İlerleme oranı ise takımın iş parçası üzerinde bir devirde aldığı yol (mm/dev) olarak ifade edilir. Bu açıdan operasyon sürelerinde ilerleme hızı da etkilidir. Yüksek ilerleme hızları, operasyon sürelerini kısaltarak birim zamanda daha fazla iş yapılmasını sağlar ve maliyetleri de azaltır. Ancak artan ilerleme hızı ile birlikte talaş kesitinin artması hem kesme kuvvetlerini hem de güç gereksinimlerini artırır. Bu durum ise enerji maliyetlerinin artmasına neden olur. Ayrıca yüksek ilerleme hızları ürünün yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Talaşlı imalat işlemlerinde ilerleme hızları; kaba pasolar için operasyon şartlarının el verdiği en yüksek hız olarak belirlenmeli, son talaş kaldırma işleminde ise hedeflenen yüzey kalitesi için hesaplanan ilerleme hızı kullanılmalıdır.

İlerleme hızı talaşlı imalat operasyonlarında genellikle doğrusal hareketlerin hızını belirtir. Bu hız özellikle yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Artan ilerleme hızı ile iş parçası üzerinde oluşan hem ilerleme izi işaretleri artacak hem de yüzey pürüzlülüğü artacaktır. İlerleme hızının bu etkisinden dolayı yüzey pürüzlülüğü ve ilerleme hızı arasında deneysel formüller geliştirilmiştir. Torna ve frezeleme işlemleri için bu formül;

$$Ra = \frac{f^2}{32r} \quad (2.2)$$

Eş 2.2 ile ifade edilmektedir. Bu bağıntıda Ra ; ortalama yüzey pürüzlülüğünü (μm), f ; devir başı ilerleme oranını (mm/dev), ve r ; kesici takım uç yarıçapını (mm) sembolize etmektedir. İlerleme hızının operasyonel bazda daha rahat kullanılabilmesi için ilerleme hızı çeşitlendirilmiştir. Tornalama operasyonlarında her bir devir için alınan yol ilerleme oranı (mm/dev) olarak ifade edilmektedir. Tornalama operasyonlarında ilerleme oranı;

$$f = f_d N \quad (2.3)$$

Eş 2.3 ile tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte f ; ilerleme hızını (mm/dak), f_d ; ilerleme oranını (mm/dev) ve N ; devir sayısını (dev/dak) ifade etmektedir. Frezeleme operasyonlarında ise kesici takımın her bir ağız sayısı için yine takımın aldığı yol diş başı ilerleme oranı olarak tanımlanmıştır. Frezeleme operasyonlarında diş başı ilerleme oranı,

$$f_t = \frac{f_d}{Z} \quad (2.4)$$

$$f_t = \frac{f}{NZ} \quad (2.5)$$

ile tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte f_t ; diş başı ilerleme oranını (mm/diş), Z kesici takım diş sayısını ifade etmektedir.

Kesme derinliği; kesici takımın iş parçası içine batma ya da dalma mesafesini belirler. Kesme derinliği yardımcı hareketler sonucunda oluşturulmaktadır. Kesme derinliğinin yüksek tutulması hedeflenen ürünün daha hızlı elde edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte yüksek kesme derinlikleri yüksek ilerleme hızlarında olduğu gibi talaş kesitini artırarak yüksek güç gereksinimlerine neden olmaktadır. Buna ek olarak bağlama şartları ve titreşim gibi bazı olumsuzluklar da yüksek kesme derinliklerini sınırlandırmaktadır. Kesme derinlikleri kesme hızlarında olduğu gibi deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda belirlenmektedir. İdeal çalışma şartları için kesme derinliğinin de ideal şartlarda tutulması gerekmektedir. İlerleme hızlarında olduğu gibi kesme derinlikleri de kaba pasolarda yüksek (2 - 4 mm), ince pasolarda ise daha düşük (0,5 - 2 mm), çok ince işlemlerde ise daha da düşük seviyelerde (0,1; 0,4 mm) belirlenmelidir.

Talaşlı imalat operasyonunu daha iyi anlaşılır kılmak için talaş kaldırma mekaniği ve talaş oluşumunu daha detaylı irdelemek gerekmektedir.

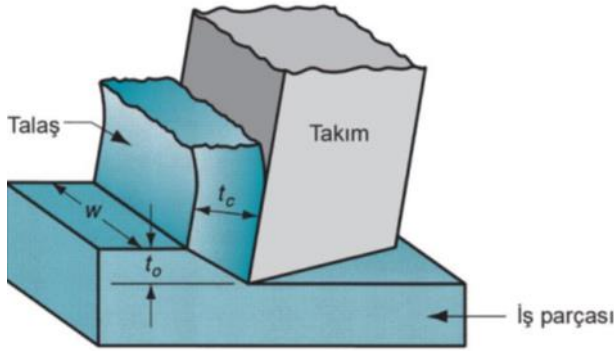
2.1.1. Talaş kaldırma mekaniği

Talaşlı imalat operasyonları birçok faktörün etkilediği zorlu ve karmaşık operasyonlardır. Talaşlı imalatın çeşitliliği, operasyonların karmaşıklığı ve zorluğu talaş kaldırma sürecinin

anlaşılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenlerle üniversiteler ve talaşlı imalat sektörünün tüm paydaşları bu sürecin anlaşılmasına yönelik araştırmalar gerçekleştirilmektedir [22]. Talaşlı imalat hakkında doğru bir yaklaşım geliştirebilmek için sürecin iyi bilinmesi ve takip edilmesi gerekmektedir.

Talaşlı imalat, özünde bir kesme işleminden oluşmaktadır. Söz konusu kesme işlemi, kesici takım ve iş parçasının teması ile başlamaktadır. Söz konusu temas, iş parçası üzerinde küçük bir bölgenin deformasyona uğramasına neden olur, talaş bu küçük deformasyon bölgesinde oluşmaya başlar. Takımın malzemeyi kesmeye zorladığı bu deformasyon bölgesinde, takımın hemen önünde bir kayma düzlemi oluşur. Kayma düzlemi; iş parçası ve kesici takım teması sonucunda iş parçasının kayma gerilmesinin aşılmasıyla talaş oluşumunun gerçekleştiği bölgeyi ifade eder. Plastik deformasyon sonucu oluşan talaş, kayma düzleminin hemen üzerinde oluşur ve takımın üst yüzeyine temas ederek kesme bölgesinden uzaklaşır. Kesme hızı ile talaş akış hızı arasında bir ilişki mevcuttur. Talaş akış hızı, talaşın kesme bölgesinden uzaklaşmasını sağlamaktadır. Talaşın uzaklaşması devam ederken takımın kesme hızı ile ilerlemesi, kayma düzlemi önünde yüksek plastik deformasyona maruz kalan bir bölgenin oluşmasına ve devamında onun da önünde elastik deformasyonun biriktiği bir başka bölgenin oluşmasına neden olur. Yüksek plastik deformasyona bağlı olarak gerçekleşen dislokasyon yığılmalarının bir sonucu olarak kesme bölgesinde deformasyon sertleşmesi oluşur. Plastik deformasyonun en yüksek seviyelere ulaştığı anda, deformasyon sertleşmesinin de etkisi ile talaş iş parçasından ayrılır. Bu sürecin operasyon boyunca tekrarlanması ile ince tabakalar halinde talaş oluşumu gerçekleşir [14].

Talaşlı imalat yukarıda da açıklandığı gibi birçok olayın neden-sonuç ilişkisine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Talaşlı imalat operasyonlarının tüm bu karmaşıklığı ve işlemin üç boyutlu gerçekleşmesi operasyonların modellenmesini zorlaştırmaktadır. Talaş kaldırma mekanizmasının daha kolay bir şekilde anlaşılması için iki boyutlu ortogonal/dik kesme modeli geliştirilmiştir. Ortogonal kesme modeli talaş kaldırma işlemini çok daha anlaşılır kılmakla birlikte operasyon aşamalarını büyük bir doğrulukla tanımlamaktadır [1]. Bu kesme modeli, talaşlı imalatın analizinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu kesme modelinde takımın keskin kenarı ile iş parçası yan yüzeyi arasında 90° 'lik bir açı bulunmaktadır, bu nedenle söz konusu kesme modeli dik kesme modeli olarak da adlandırılmaktadır.

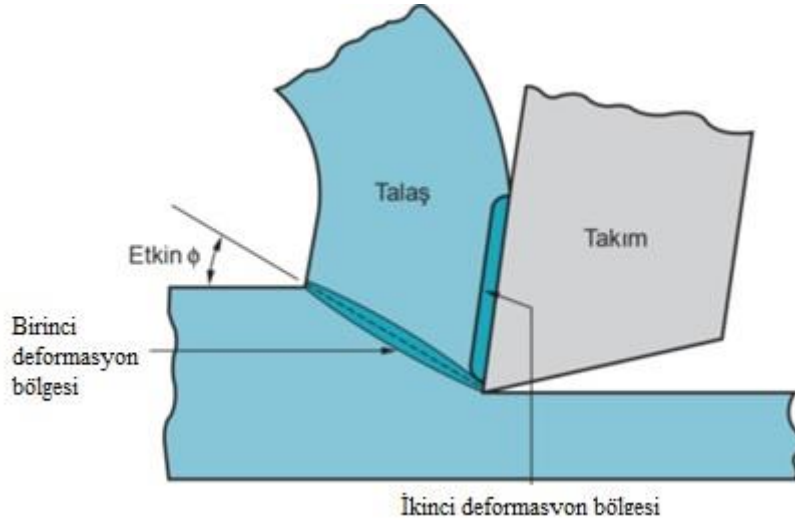


Şekil 2.1. Ortogonal kesme modeli

Ortogonal kesme modelinde kesici takımın iş parçası içinde kesme hızı ile ilerlemesiyle iş parçası zorlanmaktadır. Bu zorlanma kayma düzleminin oluşmasına neden olmaktadır. Operasyon sürecinde kayma düzleminde artan plastik deformasyonun, iş parçasının kayma gerilmesini aşmasıyla talaş oluşumu gerçekleşmektedir [1, 23].

Ancak, talaş oluşumunu sadece kayma düzlemi üzerinden tanımlamak, gerçek talaş oluşumunu tam manası ile karşılamamaktadır. Talaş oluşumunda plastik deformasyon büyük önem taşımaktadır. Plastik deformasyonun büyük bir kısmı kesici takım önündeki bölgesel deformasyon ile gerçekleşir. Talaş kaldırma işlemi, üç deformasyon bölgesinde gerçekleşir. Bu deformasyon bölgelerinden birincisi; iş parçası ve takımın temas ettiği bölgede, kayma düzleminde oluşan deformasyon bölgesidir. Birinci deformasyon bölgesinde yüksek plastik deformasyonun etkisi ile talaş oluşumu başlamaktadır. Birinci deformasyon bölgesi talaş oluşumunun gerçekleştiği en önemli bölgedir. İkinci deformasyon bölgesini ise; takım-talaş arasındaki temas bölgesinde oluşur. Talaş birinci deformasyon bölgesinde oluştuktan sonra ilerleyerek takım talaş yüzeyine temas eder. Takım ve talaş arasındaki bu temas sonucunda oluşan basınç, sürtünme ve sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşen yapışma ve plastik deformasyon ile talaş bu bölgede tekrar deformasyona uğrar ve kesme bölgesinden uzaklaşır. İkinci deformasyon bölgesi birçok yönden operasyon için kritik öneme sahiptir. İkinci deformasyon bölgesindeki takım-talaş teması ve etkileşimi yine bu bölgede görülen yüksek basınç ve sıcaklık talaşlı imalat performansında belirleyicidir. İkinci deformasyon bölgesi, en yüksek sıcaklık ve gerilim değerlerinin olduğu bölgedir. Bu bölgede oluşan termal ve mekanik yükler talaş tipini de önemli ölçüde etkilemektedir. Üçüncü deformasyon bölgesini ise; yeni oluşan iş parçası yüzeyi ve kesici takımın yan yüzeyinin teması oluşmaktadır. Bu bölgede meydana gelen sürtünme ve sürtünmeye bağlı

olarak açığa çıkan sıcaklıklar deformasyonda etkilidir [13, 24]. Talaşlı imalat işlemlerinde oluşan deformasyon bölgeleri Şekil 2.2. de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Talaşlı imalatta deformasyon bölgeleri [1]

2.1.2. Talaş oluşumu

Talaşlı imalat operasyonların plastik deformasyon sonucu oluşan talaş birinci deformasyon bölgesinde iş parçasından ayrılarak ikinci deformasyon bölgesine ilerler. Talaşın ikinci deformasyon bölgesinden geçerken takım ile olan etkileşimi talaşın şekillenmesi ve operasyon performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Talaşın şekillenmesinde iş parçası özellikleri, kesici takımın geometrisi, kesme parametreleri ve kesme şartları doğrudan etkilidir [23, 25].

Talaş oluşumunda birinci deformasyon bölgesinde oluşan kayma düzlemi büyük öneme sahiptir. Kayma düzlem açısı; işlenen yüzeyle talaş kayma düzlemi arasında kalan açıdır. Kayma düzlem açısı iş parçasının mekanik özellikleri ve kesici takım geometrisi ile doğrudan ilgilidir [1, 13]. Kesme işlemi sırasında uygulanan yüksek plastik deformasyon talaş boyutlarının şekillenmesinde büyük rol oynamaktadır. Kesme işlemi sırasında plastik deformasyon ile oluşan sıkıştırma ya da baskı nedeni ile talaş uzunluğunda bir kısalma meydana gelir. Benzer şekilde talaş kalınlığı (t_c) bu plastik deformasyon etkisi ile kesme derinliğinden (t_o) daha büyük olmaktadır. Kaldırılacak talaş hacmi Eş. 2.6' da ifade edilmiştir.

$$V = wt_o l = wt_c l' \quad (2.6)$$

Eş. 2.6'da w talaş genişliği, l ile talaş uzunluğu ve l' ile de operasyon sonrası talaş uzunluğu sembolize edilmiştir. Bu eşitlik, talaş boyundaki sıkışma ile talaş kalınlığındaki genişlemenin aynı oranda gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

$$\frac{t_c}{t_o} = \frac{l}{l'} \quad (2.7)$$

Talaş kalınlıklarının bu oranı, yığılma faktörü kavramını ortaya çıkarmıştır. Yığılma faktörü (λ); operasyon sonunda oluşan talaşın kalınlığının operasyon öncesi belirlenen talaş kalınlığına (kesme derinliğine) oranı ile Eş. 2.8'de ifade edilmektedir.

$$\lambda = \frac{t_c}{t_o} \quad (2.8)$$

Yığılma faktörü her zaman birden büyük bir değer almaktadır ($\lambda > 1$). Yığılma faktörü için kayma düzlem açısı ve talaş açısı önemli iki parametredir. Yığılma faktörü talaş açısı ve kayma düzlem açısı kullanılarak tanımlanırsa;

$$\lambda = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \phi} \quad (2.9)$$

Eş. 2.9 elde edilir. Yığılma faktörü talaşın kesme bölgesinden ayrılma hızı (V_a) ve kesme hızı (V) arasında da bir ilişki kurmaktadır. İkinci deformasyon bölgesinde meydana gelen sürtünme, yapışma gibi etkiler bu iki hız arasında bir farklılığa neden olmaktadır. Talaşın akma hızı operasyonun kesme hızından daima küçük olacaktır. Bu iki hız arasındaki ilişki deneysel olarak Eş. 2.10' da ifade edilmiştir [15, 25].

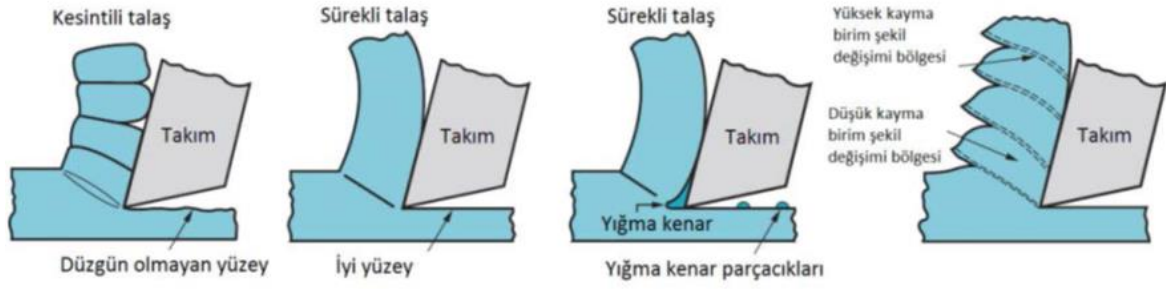
$$\lambda = \frac{V}{V_a} \quad (2.10)$$

2.1.3. Talaş tipleri

Kesme işlemi sırasında talaşın şekillenmesi takım iş parçası temasının ardından plastik deformasyon ile başlar. Operasyon sırasında talaş ilk bükülme ile şekillenir. Talaşın formu; ilerleme hızı, kesme derinliği başta olmak üzere kesme parametrelerine, iş parçası malzemesinin mekanik özelliklerine ve kesici takım geometrisine doğrudan bağlıdır [16]. İşlem sırasında artan ilerleme hızları ve kesme derinliği talaşın kırılgenliğini artırmaktadır. Benzer bir şekilde iş parçasının düşük sünekliği yine talaşın kırılgenliğini artıran bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte fosfor (P), kükürt (S) ve kurşun (Pb) gibi alaşım elementleri de talaş kırılgenliğini artırarak kısa talaş oluşumuna neden olmaktadır.

Talaşın şekillenmesinde; talaşın bükülme ya da kıvrım yarıçapı büyük etkiye sahiptir. Talaşın bir yay şeklinde bükülerek şekillenmesi talaşın üst yüzeyinde çekme, alt yüzeyinde ise basma gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Söz konusu gerilmeler talaş dayanım gerilmesinin üstüne çıkarsa talaş kırılmakta, altında kalırsa talaş kırılmadan uzamaktadır. Talaş kıvrım yarıçapı azaldıkça talaş kırılgenliği artmaktadır [23].

Talaş birinci deformasyon bölgesinde şekillenmeye başlar ancak talaş oluşumunda ikincil deformasyon bölgesi büyük öneme sahiptir. Takım ile talaş arasındaki temas, hareket ve kimyasal ilişki, kesme kuvvetlerinin etkisi, sürtünme, yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ve kesme şartların talaşın şekillenmesinde önemli etkiye sahiptir. Tüm bu şartların farklı kombinasyonları farklı tiplerde talaş oluşumuna neden olmuştur. Talaş tipleri kesme operasyonunun kararlılığı, harcanan enerji ve yüzey kalitesi başta olmak üzere birçok konu hakkında önemli bilgiler verir. Talaşlı imalat sonucunda oluşan talaş tipleri genel çerçevede üç tipe ayrılır. Bunlar; süreksiz (kırık) talaş, sürekli talaş ve yığıntı (yapışık / BUE) talaş olarak isimlendirilir [15]. Operasyon için genellikle belirli bir uzunluğa ulaşmış (1 cm) dairesel veya helisel şekilli talaşlar arzu edilmektedir [13, 26].



Şekil 2.3. Talaş tipleri [1]

Süreksiz (kırık) talaş

Süreksiz (kırık) talaş, gevrek malzemelerin işlenmesi sırasında oluşur. İş parçasının gevrek özellikleri talaşın sınırlı oranda şekillenmesine ve birinci deformasyon bölgesinde kırılarak küçük boyutlarda oluşmasına neden olmaktadır [26]. Süreksiz talaşın oluşmasına neden olan kesme şartları, malzeme özellikleri ve kesme parametreleri mevcuttur. Kırılgan özellikleri olan, grafit lamellerine sahip dökme demir gibi malzemelerin işlenmesinde, yüksek kesme derinlikleri, ilerleme hızları ve düşük kesme hızları kullanıldığında, etkin ve yüksek basınçlı soğutma uygulamalarında, düşük talaş açlarına sahip takımların kullanıldığı işlemlerde ve tezgâh rijitliğinin yetersiz olduğu durumlarda süreksiz talaş oluşumu görülür.

Talaşın dışarıdan bir etki olmaksızın kırılması için üç mekanizma vardır. Bu mekanizmalar; talaşın kendiliğinden kırılması, talaşın takıma çarparak kırılması ve talaşın iş parçasına çarparak kırılmasıdır. Talaşın kendiliğinden kırılması uygun talaş kıvrım yarıçapının oluşması ve oluşan gerilmenin talaşı kırması ile mümkündür. Böyle bir kırılma şekli için talaşın uygun akış yönünde ilerlemesi, ideal kesici takım geometrisi ve kesme parametrelerinin kullanılması gerekmektedir. Talaşın takıma çarparak kırılması durumunda talaş, takım yan yüzeyine periyodik bir yük uygulayacaktır. İşlem devam ettikçe talaş takımı adeta çekiçleyecek ve takım üzerinde mekanik yorulmalara neden olacaktır. Talaşın iş parçasına temas ederek kırılması sürecinde, kırılan talaşın, kesme bölgesine tekrar gelme riski oluşur. Bu durum işlenmiş parça yüzeyinin bozulması, operasyon sürekliliğinin aksayarak takım kırılmaları hatta operatör yaralanmaları gibi istenmeyen durumlara sebep olabilir. Talaşın iş parçasına ve takıma çarparak kırılması, operasyon süreci açısından olumsuzluklar sebebiyle talaşın kendiliğinden kırılmasının istenmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.4. Talaşın kendi kendine, takıma çarparak ve iş parçasına çarparak kırılması [25]

Sürekli talaş oluşumu işlem süresinde değişken kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum takımın sürekli değişken yüklere maruz kalması ve titreşim oluşması sonucunu doğurmaktadır. Talaşın sürekli akışı iş parçası yüzeyinin düzensiz bir yapı almasına da yol açar. Bu nedenlerden dolayı sürekli talaş çok tercih edilen bir talaş tipi olmasa da yüksek talaş kontrolü, taşıma ve depolama kolaylığı gibi avantajları ile öne çıkmaktadır.

Sürekli talaş

Sürekli talaş; sünek malzemelerin düşük ilerleme hızı ve kesme derinlikleriyle yüksek kesme hızları kullanılarak işlenmesi ile oluşur. İş parçasının sünek yapısı talaşın kırılmadan şekillenmesini sağlar. Talaşın kırılmaksızın akması yüksek yüzey kalitesinin gerçekleşmesine imkân verir. Ayrıca talaş kırılmasına bağlı olarak oluşan kuvvet değişimleri de sürekli talaş ile ortadan kalkar. Bu nedenle sürekli talaş tercih edilen bir talaş tipidir [23, 26].

Operasyon sırasında oluşan sürekli talaş; yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı tercih edilen bir talaş tipi olmasına rağmen, uzun veya büyük çaplı iş parçalarının işlenmesinde operasyon sürekliliğini olumsuz etkilemektedir. Kopmaksızın uzayan talaş; takım tutucu, bağlama sistemi, iş parçası ve diğer tezgâh donanımlarının ve operatörün güvenliğini tehdit etmektedir. Talaşın iş parçasına dolanarak işlenmiş yüzeyi çizmesi yüzey kalitesini düşürmektedir. Kesme bölgesinden uzaklaştırılamayan talaş, operasyonun durdurulmasına neden olmakta bu durum operasyon sürekliliğini imkânsız kılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak talaş ile birlikte yüksek sıcaklıkların da kesme bölgesini terk etmemesi takım performansını olumsuz etkilemektedir. Operasyon sırasında karşılaşılan bu olumsuz etkilerin yanında, operasyon sonrası depolama ve taşıma gibi zorluklar ile karşılaşılmaktadır.

Sürekli talaşın neden olduğu tüm bu olumsuz tablo operasyon maliyetlerini artırmaktadır. Tüm bunlar talaş kontrolünü gerekli kılmıştır. Sürekli talaşın daha etkili kontrolünü sağlama amacı ile talaşın kırılması hedeflenmiştir. Talaş kırıcı geometrisine sahip takımların kullanılması, beklemeli kesme, yüksek basınçlı soğutma ve farklı talaş kırma yöntemleri kullanılmaktadır [27–29].

Yığıntı talaş

Yığıntı talaş; sünek malzemelerin uygun olmayan (düşük ya da orta) kesme hızları ile işlendiği veya kesici takımın aşınma sürecine girdiği durumlarda oluşur. Kesme işlemi sırasında takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünme çıkan talaşın takım-talaş yüzeyine yapışmasına neden olur. Bu yapışmada takım-iş parçası arasındaki kimyasal etkileşim, sıcaklık ve basınç önemli rol oynar. Kesici takım ve iş parçası arasındaki kimyasal uygunluk, kısmen düşük sıcaklıklar ve yüksek basınç yığıntı talaş oluşumunu kolaylaştırır [13, 25].

Yığıntı talaş farklı isimler (BUE-Built Up Edge, yapışık talaş, yığma talaş gibi) ile de tanımlanmaktadır. Yığıntı talaş oluşumu, sürekli kendini tekrar eden bir sürecin ürünüdür. Kesme işleminin başlaması ile yapışma başlar ve yığıntı talaş kesici takım üzerinde oluşur, yapışma oranı arttıkça takım üzerindeki yığıntı talaş da büyür, kritik boyuta ulaştığında takım ile arasındaki bağ zayıflar ve akan talaş ile birlikte kesme bölgesini terk eder. Ardından bu süreç tekrar başlar [1].

Yığıntı talaşın kesme bölgesinden koparak uzaklaşması sırasında kesici takımdan malzeme kopararak takımın zarara uğramasına ve takım ömrünün azalmasına neden olur. Ayrıca yığıntı talaş takım kenarına yapışarak takım talaş açısının değişmesine yol açar. Bu durum kesme şartlarının sürekli değişmesine sebep olur. Sürekli değişen kesme şartları takımın mekanik yorulmasına yol açar. Yığıntı talaş oluşumunda talaş, takım ile birlikte iş parçasının işlenmiş yüzeyine de yapışarak yüzey kalitesini olumsuz etkiler. Yığıntı talaş oluşumu durumunda iş parçasının yine iş parçası malzemesi ile kaplanmış bir takım tarafından kesilmeye zorlanması iş parçası boyutlarını bile değiştirmekte ve operasyon verimini önemli ölçüde düşürmektedir [13, 25, 30].

2.2. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik; her hangi bir iş parçasının talaşlı imalat ile şekillendirilmesi sürecinin kolaylığı ya da zorluğu olarak ifade edilebilir [31]. Başka bir yaklaşımla işlenebilirlik; talaşlı imalat sırasında oluşan kayıpların yüksek ya da düşük olmasını ifade eder [30]. İşlenebilirlik doğrudan bir malzeme özelliği olarak düşünülse de operasyonu oluşturan tüm değişkenlerden doğrudan etkilenmektedir. İşlenebilirlik başta iş parçası olmak üzere kesici takım, kesme parametreleri, kesme şartları, tezgâh özellikleri ve kesme ortamı gibi birçok faktör ile doğrudan ilgilidir [1].

İşlenebilirliği etkileyen birçok faktörün olması işlenebilirliğin değerlendirilmesini de çeşitlendirmiştir. İşlenebilirliğin değerlendirilmesinde talaş biçimi, kesme bölgesi sıcaklıkları, takım aşınması/takım ömrü, kesme kuvvetleri/güç tüketimi ve yüzey kalitesi kriterleri kullanılmaktadır. [1, 32, 33]. Malzemenin işlenmesi sırasında elde edilen yüksek yüzey kalitesi, uzun takım ömrü ve düşük kesme kuvvetleri/güç tüketimi işlenebilirliğin iyi olduğunu ifade etmektedir[21].

Talaş kaldırma işlemi sırasında harcanan gücün çok önemli bir bölümü talaşın plastik deformasyonu ve iş parçasından ayrılması için kullanılmaktadır [13]. Talaşın şekillenmesi ve iş parçasından ayrılması sırasında iş parçası kesme hareketi, ilerleme hareketi ve yardımcı hareket doğrultularında bir tepki kuvveti ortaya koyar [34]. Kesme sırasında oluşan kesme kuvvetleri parçanın kesilmeye karşı gösterdiği direncin ve harcanan enerjinin bir ölçütüdür. Bu durum, kesme kuvvetlerine maliyetler açısından büyük bir önem kazandırmaktadır. Ayrıca kesme kuvvetleri takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerinde de önemli etkilere sahiptir [35].

Talaşlı imalat uygulamalarında üründen beklenen kalite beklentilerinin başında yüzey kalitesi gelmektedir [36]. Kesme işlemi sırasında takım özellikleri, iş parçası özellikleri ve bu ikisi arasında meydana gelen fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal etkileşimler iş parçası yüzeyinde istenmeyen izlerin oluşmasına neden olur [25]. Yüzey pürüzlülükleri; iş parçasının aşınma, yağlama ve sürtünme gibi tribolojik özelliklerine ek olarak, sızdırmazlık, termal, elektriksel, hidrodinamik gibi özelliklerini de doğrudan etkilemektedir [37]. Yüzey kalitesi malzemenin yorulma dayanımı açısından da büyük önem taşımaktadır [16, 38]. Tüm bu özellikler; yüzey pürüzlülüklerinin işlenebilirlik açısından önemini daha da artırmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü kesici takım uç yarıçapı ve ilerleme oranı arasındaki bağıntı Eş. 2.2' de verilmiştir. Kesici takım uç yarıçapının büyümesi yüzey kalitesini ve takımın kenar mukavemetini artırmaktadır. İlerleme hızının azalması ise yüzey pürüzlülüklerinin iyileşmesine önemli katkı sağlamaktadır [39, 40]. Kesme parametreleri ve takım geometrisi dışında işlenen malzeme özellikleri de yüzey pürüzlülükleri açısından önemlidir. Operasyon sırasında oluşan titreşimler, iş parçası, takım ve tezgâh rijitliği de yüzey pürüzlülükleri açısından büyük önem taşımaktadır [40–42].

Takım ömrü; kesici takım kenarının kritik aşınma değerine ulaşana kadar etkili kesme yaptığı toplam süre olarak tanımlanmaktadır [15]. İşlem sırasında takım ömrünün tamamlaması ve sonrasında kullanılmaya devam edilmesi parça başı maliyetlerin, iş parçası boyutsal hataların, yüzey pürüzlülüklerinin, kesme kuvvetlerinin ve titreşimin artmasına, bununla birlikte verimliliğin düşmesine neden olmaktadır. Kesme işlemindeki takım aşınması; takım malzemesi, takım geometrisi, kesme parametreleri (kesme hızı), kesme sırasında oluşan ısı, talaş yapısı, soğutma uygulamaları ve iş parçası malzemesi gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörlerden en etkili ve belirleyici parametre ise kesme hızıdır [15, 43]. Artan kesme hızları birim zamanda iş parçası üzerine uygulanan plastik deformasyonu artırmaktadır. Bu durum ise, işleme sırasında daha fazla ısı oluşumuna ve yüksek sıcaklıklara çıkılmasına yol açmaktadır. Oluşan yüksek ısı kullanılan takımın; sertliğini azaltarak aşınmasını kolaylaştırmakta, plastik deformasyona uğramasına sebep olmakta ve böylece ömrünü azaltmaktadır [13, 44].

İş parçasının setliği, ısıl iletkenliği, sünekliği, pekleşmesi, inklüzyonları (yapı içinde istenmeyen madde veya kalıntılar) ve kimyasal özellikleri işlenebilirliğini etkilemektedir. İş parçasının sertliği arttıkça kesici takımda abrasif aşınma artar bu durum takım ömrünü olumsuz etkiler. Düşük sertlik malzemelerin işlenmesinde olumlu etki yapıyor olsa da; düşük sertlik ve yüksek süneklik ile birlikte oluşan yıgıntı talaş (built up edge - BUE) yüzey kalitesini kötüleştirir, kuvvetlerin karasız oluşmasına neden olur ve takım ömrünü azaltır. Malzemenin düşük sünekliği iyi bir talaş kontrolü sağlamanın yanında daha az güç gerektirir. İş parçasının artan dayanımı ise kesme kuvvetlerini ve sıcaklıkları artırır ve kesme işlemi zorlaşır. Malzemenin kimyasal yapısının takım ile etkileşimi aşınma mekanizmalarını ve takım ömrünü belirler. Malzemenin kimyasal özellikleri, uygulanan ısıl işlemler ve inklüzyonlar işlenebilirlik açısından önem kazanmaktadır [45].

3. DELME İŞLEMİ

Talaşlı imalat birçok farklı operasyonu bünyesinde barındırmaktadır. Bu operasyonlardan en önemlilerinden birisi delme işlemidir. Diğer yöntemler ile kıyaslandığında delme işlemleri %33 gibi önemli bir oranla en çok başvurulmuş talaşlı imalat yöntemini oluşturmaktadır [4, 46]. Delme işleminin bu kadar çok kullanılmasının temelinde; başka talaşlı imalat yöntemleri için ön işlem olması ve montaj odaklı sistemlerin delme işlemini sıklıkla kullanması yatmaktadır. Delme işlemi kılavuz çekme, raybalama, honlama vb. birçok talaşlı imalat uygulamasından önce gerçekleştirilen bir uygulamadır. Buna ek olarak pim, perçin, cıvata vb. birçok bağlama elemanının kolon, itici ve sıyırıcı pim vb. konumlandırma elemanı olarak çalışması deliklerin varlığı ile mümkün olmaktadır. Tüm bu durumlar delme işleminin kullanımı ile beraber önemini de artırmıştır [5].

Delme işlemi; kesici takım kullanarak iş parçası üzerine yuvarlak boşlukların oluşturulması işlemidir. Delme işleminde; esas kesme hareketi takımın dönmesi ile ilerleme hareketi ise yine takımın yaptığı doğrusal hareket ile sağlanmaktadır. Bu tanıma ve bu kesme prensibine sahip olan delik büyütme, kademeli delik delme, raybalama, havşalama gibi operasyonların tamamını delme işlemi kavramı kapsamaktadır [13, 47, 48].

Delme işleminin gerçekleştirilmesinde kesici takım olarak genellikle matkaplar kullanılmaktadır. Bu kesiciler silindirik yapıya, birden fazla kesme kenarına, iş parçasına batmayı sağlayabilmek için konik bir uca ve talaş tahliyesini sağlayabilmek için birden fazla kanala (helisel ya da düz) sahip takımlardır. Helisel kanallı matkaplar talaşlı imalat en çok kullanılan matkaplardır [1, 39]. Matkaplar delme işleminde diğer talaşlı imalat yöntemlerinde kullanılan kesici takımlardan daha büyük bir öneme sahiptir. Delme işleminde esas kesme hareketi ve ilerleme hareketi takım üzerinden sağlanmaktadır. Operasyon sırasında dönen matkap iş parçası içerisine eksenel yönde ilerler ve talaş kaldırarak deliği oluşturur. Ayrıca delme işleminde talaş tahliyesi de takım üzerinde bulunan helis kanalları sayesinde sağlanmaktadır.

Delme işlemi diğer talaşlı imalat yöntemleri ile aynı kinematik ve dinamik prensiplere sahiptir. Delme işleminde de talaş ve ısı oluşumu diğer yöntemlere benzer şekilde gerçekleşir. Ancak delme operasyonunun doğası gereği karşılaşılan önemli problemler

mevcuttur. Delme işlemi sırasında talaş oluşumunun kapalı bir bölgede gerçekleşmesi talaş kontrolüne dışarıdan müdahaleyi imkânsız kılar. Talaş tahliyesi delme işlemlerinde takımın helis kanalları ile gerçekleşmektedir. Bu durum takım-iş parçası-talaş arasında oluşan temasın ve sürtünmelerin artmasına neden olmaktadır. Tahliyesi sırasında talaşın sıkışarak takımı kırması operasyonun bir diğer handikabıdır. Yine bu talaş tahliyesi ile uzaklaştırılan yüksek ısınnın hem takıma hem de iş parçasına önemli etkileri olmaktadır. Kesme hızının kesme kenarı boyunca değişmesi ve merkezde sıfır olması önemli problemlerdendir. Bunun gibi birçok problem operasyonun uygulanmasını güçleştirmiş, işlem sırasında takım, iş parçası ve tezgâh uyumunu gerekli kılmıştır [5, 46, 49].

Delme işleminin karmaşık ve zorlu bir işlem olması bu işlem için takım geometrisi ve takım malzemesini önemli kılmıştır. Bununla birlikte sağlıklı bir delme işlemi için kullanılan kesme parametreleri de büyük önem kazanmıştır. Delme işleminde yüksek kesme hızları takım aşınmasına sebep olmaktadır. Bu aşınma ise; düşük takım ömrüne, düşük delik kalitesi ve boyutsal toleransların dışına çıkılmasına yol açmaktadır. Düşük kesme hızları ise yığıntı talaş oluşumu ve buna bağlı düşük takım ömrüne, talaş tahliyesinin güçleşmesine ve uzun operasyon süreleri ile maliyetlerin artmasına yol açmaktadır [49].

Delme işleminde kesme hızı matkap çapındaki çevresel hız olarak kabul edilir. Matkapın kesme kenarı boyunca (dış çaptan – merkeze) kesme hızı sürekli düşmekte ve merkezde sıfır olmaktadır. Kesmenin çok daha düşük hızlarda gerçekleşmesine rağmen dış çaptaki hızın kesme hızı olarak alınması işlem kolaylığı sağlamaktadır. Diğer talaşlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi delme işleminde de kesme hızı – devir sayısı arasındaki ilişki Eş. 2.1 ile formülize edilmektedir. Delme işlemi özelinde eşitlikte yer alan çap (d) değeri matkap çapı olarak alınır [1].

Delme işleminde kesme hızı kadar ilerleme hızının da talaş tahliyesi, kuvvet oluşumu ve termal etkileri bulunmaktadır. Hızlı talaş tahliyesi ve etkili talaş kontrolü, düşük operasyon süreleri ve düşük takım aşınması sağlaması nedeni ile yüksek ilerleme hızının avantajı olarak görülebilir. Ancak delme işlemi sırasında yüksek ilerleme hızlarının kullanılması yüksek ilerleme kuvvetlerinin, matkap kırılmalarının ve düşük delik kalitesinin oluşmasına yol açar. Düşük ilerleme hızları ise daha fazla takım-talaş temasına dolayısıyla hızlı aşınmalara, uzun talaş oluşumuna, işlem sürelerinin uzamasına ve delik kalitesinin artmasına neden olmaktadır [49].

Delme işleminde, tornalama işleminde olduğu gibi genellikle devir başına yapılan ilerleme oranı kullanılmaktadır. Ancak bir devirde kaldırılan talaş kalınlığı (talaş yükü) tornalama ve delme operasyonlarında farklılık gösterir. Tornalama işleminde bir devirde ilerleme oranı kadar talaş kaldırılırken, delme işleminde takımın genellikle iki ağızlı olması nedeni ile kaldırılan talaş kalınlığı ilerleme oranının yarısı kadardır. İlerleme hızı matkap çapı ile orantılıdır. Matkap çapının büyük seçildiği operasyonlarda yüksek ilerleme oranları kullanılabilir. Artan takım çapının matkap mukavemetini artırması ve matkabın daha yüksek ilerleme kuvvetlerine dayanabilmesi bu durumda etkilidir [1].

Delme işleminde kesme parametreleri talaş kaldırma debisi üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Talaş kaldırma debisi birim zamanda oluşan talaş hacmi olarak ifade edilmektedir. Talaş hacminin belirlenmesinde talaş kesit alanı büyük öneme sahiptir. Talaş kesit alanı radyal talaş derinliği (a_p) ile diş başı ilerleme oranının çarpımı ile bulunur. Radyal talaş derinliği tornalama operasyonlarında ham parça ve bitmiş iş parçası çapları farkının yarısı olarak tanımlanmaktadır. Delme işleminde ise bu derinlik matkap çapının yarısı olarak Eş. 3.1 ile ifade edilir.

$$a_p = \frac{D}{2} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte D mm olarak matkap çapını ifade eder, dolayısı ile a_p 'de mm cinsinden tanımlanmaktadır. Talaş kesit alanı ise;

$$A_t = a_p f_t = \frac{Df_t}{2} = \frac{Df}{4} \quad (3.2)$$

$$A = 2A_t = Df_t = \frac{Df}{2}$$

Eş. 3.2 ile tanımlanır. Bu eşitlikte A ; toplam talaş kesit alanını, A_t ağız başı talaş kesit alanını (mm^2), f_t ise diş (ağız) başı ilerleme oranını ($\text{mm}/\text{diş}$) ve f ; ilerleme hızını ifade etmektedir. Eş. 3.2'den de yararlanılarak kesme hızına bağlı olarak talaş kaldırma debisi ($Q\text{-mm}^3/\text{dak}$) şöyle ifade edilir;

$$Q = AV \times 1000 \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte A ; talaş kesit alanını ve V ; kesme hızı tanımlanmaktadır. Kesme hızının birimi metre cinsinden olduğu için eşitlik 1000 ile çarpılarak talaş kaldırma debisinin biriminin milimetre cinsinden tanımlanması sağlanmıştır [50, 51].

Talaş kaldırma debisi, ilerleme hızı cinsinden aşağıdaki Eş. 3.4 te yazıldığı gibi tanımlanır;

$$Q = \frac{\pi D^2 f}{4} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte D ; matkap çapını (mm), f ise ilerleme hızını (mm/dak) ifade etmektedir [1].

Delme işlemlerinde çalışma boyunun ya da delik boyunun matkap çapı ile olan ilişkisi de büyük önem taşımaktadır. Delme boyunun artması talaş tahliyesini zorlaştırmaktadır. Talaş tahliyesinin güçleşmesi delik kalitesine ve operasyon verimine etki etmektedir. Bu durum derin deliklerin oluşturulmasında gagalamalı delme gibi farklı delme metotlarının gelişmesine neden olmuştur. Matkap çapı ve delik boyu arasındaki oransal ilişkiye göre delikler sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre;

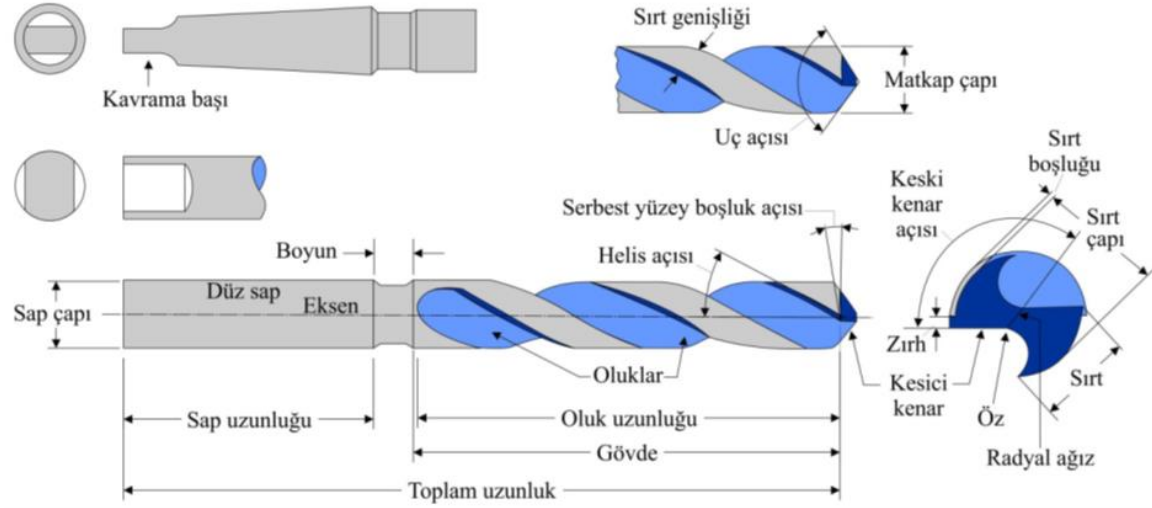
- $L/D \geq 10$ ise derin delik,
- $10 \geq L/D \geq 4$ ise normale delik,
- $L/D \leq 3$ ise kısa delik,

Olarak isimlendirilmiştir [13, 52].

3.1. Matkaplar

Delme işleminde kullanılan kesici takımlar matkap olarak isimlendirilir. Matkaplar yüksek hız çeliği (HSS) veya karbür çubukların taşlanması ile imal edilir. Operasyon sırasında matkaplar dönme hareketi ve doğrusal hareketi bir arada yaparak helisel bir hareket gerçekleştirirler. Matkaplar farklı çeşitleri ile talaşlı imalatla en çok kullanılan kesici takımlar arasında yer alır. Matkaplara ilişkin takım malzemesi, toleranslar ve takım geometrilerine dair standartlar TS ISO 235 ve TS 62 standartları ile tanımlanmıştır. En çok kullanılan matkap tipi helisel matkaplardır. Helisel matkaplar iki kesme ağızına, iki adet helisel talaş tahliye kanalına sahip, silindirik matkaplardır. İki kesme ağızı kuvvetleri dengelemektedir [14, 46, 53]. Matkaplara kesme performansını ve takım ömrünü artırmak

amacıyla kaplama işlemi uygulanmaktadır. Matkaplar Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi sap, gövde ve uç olmak üzere üç ana kısımdan oluşur.



Şekil 3.1. Matkap bölümleri [7]

Uç kısmı matkabın iş parçası ile temas ettiği ve delme işlemine başladığı ilk bölge olarak tanımlanır. Matkabın kesici ağızları bu bölgede bulunur. Matkap uç kısmı taşlanarak kesme ağızları, uç açısı ve arka boşluk açısı gibi matkap geometrisi oluşturulur. Matkap geometrisi kesme işleminin sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi için büyük önem taşır. Matkaplarda uç açısı genelde 118° kullanılmaktadır. İş parçası sertliği matkap uç açısının belirlenmesinde rol oynar. Artan malzeme sertliği ile beraber matkap uç açısı artarken (düzleşir), azalan sertlikler matkap uç açısını düşürür (sivrileşir). Arka boşluk açısı ise 8° - 12° arasında olacak şekilde kullanılmaktadır [50].

Matkabın gövde kısmı kesici uçundan başlayıp, matkap sapına kadar devam eden, helisel kanalların bulunduğu, matkabın en büyük kısmıdır. Helisel kanallar talaşın kesme bölgesinden uzaklaşmasını ve kesme sıvılarının kesme bölgesine ulaşmasını sağlamaktadır. Helisel kanal sayısı kesici ağız sayısı kadardır. Kesici ağızların devamından başlayan helis kanalları takımın talaş açısını oluşturmaktadır. Helisel kanallar belirli bir helis açısı ile üretilmektedir. Matkaplar üretilirken helis kanallarına paralel olacak şekilde bir basamak oluşturulur. Bu basamak matkap zırhı olarak tanımlanır. Zırh, sürtünme yüzeyini azaltır ve yüksek ısı oluşumunu engeller. Helisel kanallar arasında kalan bölge matkap özü olarak tanımlanır. Matkap özü takım boyunca belirli bir koniklikte üretilir. Bu koniklik kesme kuvvetleri ve moment etkisi ile matkabın kırılmasını önlemek amacıyla oluşturulur [50, 54].

Sap bölümü ise matkabın tezgâha bağlandığı bölümdür. Bağlama şekline tezgâh ve takım tutucu özelliklerine göre düz ya da konik şekilde takım sapları oluşturulur.

Delme işlemi sırasında helis kanalları üzerinden talaşın tahliye edilmesi kesme sıvılarının kesme bölgesine ulaşmasını zorlaştırır. Delme işlemlerinde daha etkili bir soğutma gerçekleştirebilmek için matkap içinden soğutma kanalları açılarak içten soğutmalı matkaplar üretilir. Böylece kesme sıvısı matkap içinden doğrudan kesme bölgesine gönderilir. İçten soğutma kesme bölgesini soğutur, takım ucunun yağlamasını sağlar bunun yanında talaşın daha hızlı ve etkili tahliye edilmesine ve yine talaşın soğumasına da yardımcı olur. Özellikle derin delik uygulamalarında, yüksek sıcaklıkların olduğu operasyonlarda ve art arda delme işlemlerinin olduğu operasyonlarda tercih edilir.

Gelişen teknoloji ile birlikte değişen malzeme özellikleri farklı geometrilerde matkapların kullanımını gerekli kılmıştır. Farklı uç geometrileri ve helis açılarının kullanıldığı matkapların yanında takma uçlu matkaplar da kullanılmaktadır. Farklı matkap geometrileri ve çeşitleri bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

3.2. Delme İşleminde Kuvvet Oluşumu

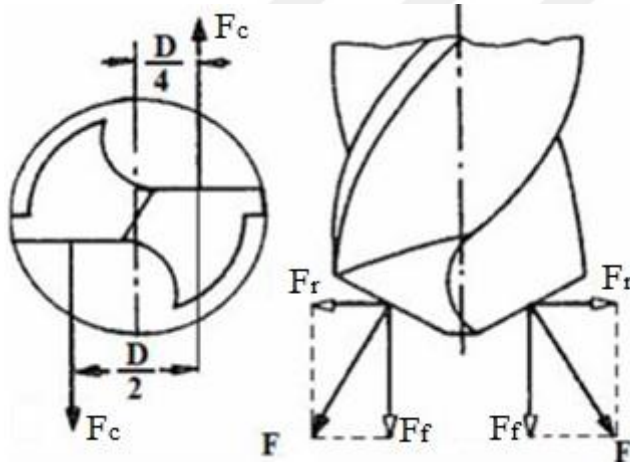
Delme işlemi sırasında matkap iş parçası boyunca ilerler bu ilerleme sırasında iş parçasında meydana gelen plastik deformasyon talaş oluşumunu sağlar. Bu plastik deformasyonun gerçekleşmesi, iş parçası dayanımının kritik seviyelerinin üstüne çıkılması ile mümkündür. Kesme işlemi sürecinde iş parçası kesilmeye karşı bir direnç oluşturur. Bu direnç sonucunda operasyon süresince matkaba talaş kaldırma kuvvetleri etki etmektedir. Matkabın iş parçasına dalarak talaş oluşturabilmesi ve operasyonun sürekliliği için güce ve dolayısıyla enerjiye gereksinim duyulmaktadır [55].

Delme işlemlerinde oluşan kesme kuvvetlerinin büyüklüğü ile iş parçası özellikleri doğrudan etkilidir. Kesme işleminin takım tarafından gerçekleşmesi ve talaş kaldırma kuvvetlerinin doğrudan takıma etki etmesi kuvvetlerin oluşumunda takımı önemli bir yere koymaktadır.

Matkap geometrisini oluşturan uç açısı, talaş açısı ve helis açısı gibi parametreler kuvvetlerin oluşumunda etkilidir. Ayrıca matkap malzemesi ve boyutları oluşacak kuvvetlere dayanabilecek nitelikte seçilmelidir.

Operasyon sırasında iş parçası–takım uyumu kadar kesme parametrelerinin seçilen değerleri de kritik öneme sahiptir. Kesme ve ilerleme oranları/hızları oluşan kuvvetleri şekillendiren faktörler arasındadır. Bunlar dışında takım ve tezgâh titreşimi, delme boyu, soğutma ve yağlama sistemlerinin kullanımı, takım aşınması, talaş tahliyesi ve sıcaklıklar gibi birçok faktör talaş kaldırma kuvvetleri üzerinde etkilidir [56–58].

Delme işleminde her bir matkap ağzına etki eden talaş kaldırma kuvvetleri üç bileşenden oluşmaktadır. Bu kuvvet bileşenleri; kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvet (F_r) olarak tanımlanmaktadır. Delme işlemi sırasında oluşan kuvvet bileşenleri Şekil 3.2. de gösterilmiştir. Kesme kuvveti ve radyal kuvvet kesici kenar boyunca farklılık gösterdiği için operasyon sırasında oluşan kuvvet ortalama kuvvet oluşumu dikkate alınarak değerlendirilir. Matkaba etki eden radyal kuvvetler eşit büyüklükte ve zıt yönlü olduğu için birbirini dengelemektedir. Bu nedenle delme işlemi sırasında sadece kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti etkilidir [59].



Şekil 3.2. Delme operasyonu sırasında oluşan kuvvet bileşenleri

3.2.1. Kesme kuvveti (F_c)

Delme işleminde esas kesme hareketinin bir sonucu olarak matkap kesme kenarlarına kesme kuvveti etki eder. Bu kesme kuvveti talaş kesiti ve malzeme özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Matkabin bir ağzına etki eden kesme kuvveti, aşağıdaki Eş. 3.5 te verildiği gibi ifade edilir;

$$F_{ct} = A_t k_s = \frac{Df_t}{2} k_s = \frac{Df}{4} k_s \quad (3.5)$$

Delme işleminde kullanılan matkapların genellikle iki ağızlı olması toplam kesme kuvveti (N) için Eş. 3.5 kullanılarak güncellenmiştir. Buna göre toplam kesme kuvveti;

$$F_c = 2F_{ct} = Df_t k_s = \frac{Df}{2} k_s \quad (3.6)$$

Eş. 3.6 ile ifade edilmiştir. Bu eşitliklerde k_s özgül kesme kuvvetini (N/mm²) ifade eder. Özgül kesme kuvveti iş parçasından bir milimetrekarelik talaş kesit alanının kaldırılması için gerekli olan kuvveti ifade eder. Özgül kesme kuvveti için iş parçası özellikleri büyük önem taşımaktadır. Özgül kesme kuvveti kesme şartları, iş parçası ve takım özellikleri dikkate alınarak hazırlanmış tablolardan belirlenir.

Delme işleminde kesme kuvveti kesme momentinin oluşumuna neden olur. Delme sırasında bir ağızda oluşan moment ağız başına oluşan kesme kuvvetinin (F_{ct}) matkap çapının (D) dörtte biri ile çarpılarak bulunur. Bu işlemle kesme kuvvetlerinin, kesme hızının sıfır olduğu matkap merkezine göre momenti alınmış olur. Toplam moment ağız başı momentin, ağız sayısı ile çarpılması ile elde edilir. Delme işlemi esnasında meydana gelen kesme momenti oluşumu aşağıda Eş. 3.7 de verildiği gibi ifade edilebilir;

$$M_t = F_{ct} \frac{D}{4} \quad (3.7)$$

$$M = 2M_t = F_c \frac{D}{4}$$

Bu eşitliklerde M_t ; ağız başına oluşan momenti (Nmm), M ise toplam kesme momentini (Nmm) ifade eder [15, 49].

3.2.2. İlerleme kuvveti (F_f)

Delme işlemi sırasında ilerleme hareketine bağlı olarak ilerleme hareketi doğrultusunda ancak bu harekete zıt yönde bir kuvvet matkaba etki eder. İlerleme kuvveti (F_f) deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmektedir. Bu çalışmalar neticesinde ilerleme kuvveti için

ampirik eşitlikler türetilmiştir. Bu eşitlikte ağız başına oluşan ilerleme kuvveti aşağıdaki Eş. 3.8 verildiği gibi tanımlanır;

$$F_{ft} = F_{ct} \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte F_{ft} ağız başına düşen ilerleme kuvvetini (N), γ ise takım uç yarıçapını karşılamaktadır. Toplam ilerleme kuvveti ise ağız sayısı ile orantılı olarak ifade edilir. Buna göre toplam ilerleme kuvveti;

$$F_f = 2F_{ft} = 2F_{ct} \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) = F_c \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (3.9)$$

Eş. 3.9 ile tanımlanır. Toplam ilerleme kuvvetinin tanımlandığı bir diğer eşitlik ise;

$$F_f = k_s (f_d D)^{0.8} \quad (3.10)$$

Eş. 3.10 ile tanımlanır. Bu eşitlikte k_s özgül kesme kuvvetini, f_d ; devir başına ilerleme oranını belirtir [7].

3.3. Delme İşleminde Delik Kalitesi

Gelişen teknoloji ile birlikte başta uzay ve havacılık alanı olmak üzere birçok sanayi dalı dar toleranslarda ürünlere ihtiyaç duymaktadır. Tezgâh ve takım teknolojisinde yaşanan gelişmeler bu ihtiyaca cevap verebilecek ürün kalitesinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Delme işleminin en çok başvurulanan talaşlı imalat yöntemi olması ve birçok operasyon için ön işlem oluşu bu operasyonun yüksek hassasiyet ile gerçekleştirilmesini önemli kılmıştır.

Talaşlı imalat uygulamalarında delik kalitesi farklı kriterlerle belirlenmektedir. Bu kriterler ürün kalitesini ya da ürünün sahip olması gereken özellikleri tanımlamaktadır. Boyut toleransları, yüzey kalitesi, şekil ve konum toleransları delik kalitesini belirlemede kullanılan önemli kriterlerdir.

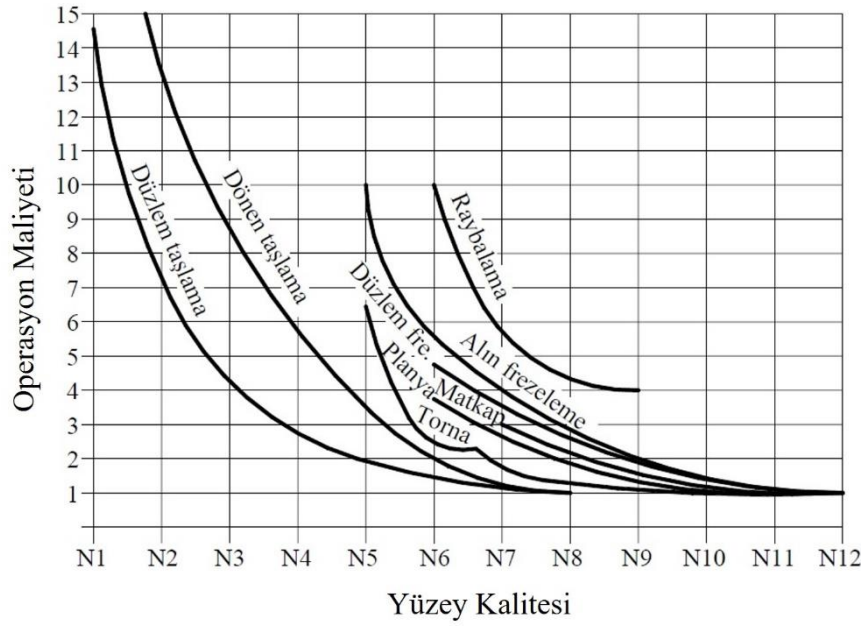
Delme işlemi sonucu oluşturulan deliğin kalitesi bu kriterler açısından ayrı ayrı

değerlendirilmektedir. Delik kalitesinin belirlenmesinde yüzey kalitesi genellikle yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi ile sağlanmaktadır [50]. Deliğin ölçü/boyut toleransının belirlenmesinde delik çapının değişimi en çok başvuru toleranstır. Şekil ve konum toleransları açısından delik kalitesi ise dairesellik (ovalite), silindiriklik (eksenel kaçıklık) ve diklik gibi toleranslar belirleyici olmaktadır [60, 61].

Delik kalitesinde arzu edilen hassasiyetlere ulaşmak için raybalama, honlama vb. ek operasyonlara başvurulmaktadır. Bu durum operasyon sürelerinin uzamasına ve yeni takım maliyetlerine neden olarak işlem maliyetlerini artırmaktadır. Düşük maliyetlerde ve yüksek kalitede deliklerin tek bir operasyon ile oluşturulması verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Delme işleminde ek operasyonlara gerek duymaksızın yüksek kalitede deliklerin üretilmesi ideal kesme parametrelerinin, doğru kesici takımın, rijit bir tezgâhın ve etkili bir soğutma işleminin kullanılması ile mümkündür [7, 15, 62, 63].

3.3.1. Deliğin yüzey kalitesi

Malzemenin sahip olduğu yüksek yüzey kalitesi üstün tribolojik özellikler ve yorulma dayanımı sağlamaktadır. Eşli çalışan parçalarda yüzey kalitesi sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Ancak yüzey kalitesi belirlenirken ideal seviyeler kullanılmalıdır. Dar toleranslarda yüzey pürüzlülüğünün yarıya düşürülmesi işleme maliyetlerini dört kat artırmaktadır. Yüzey kalitesi belirlenirken üretim maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır [62]. Yüzey kalitesinin operasyon maliyetlerine etkisi Şekil 3.3.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yüzey kalitesinin operasyon maliyetlerine etkisi [55]

İş parçası yüzeylerinde arzu edilen yüzey özellikleri parçanın teknik resminde belirtilmelidir. Yüzey kalitesinin belirlenmesinde yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü büyük önem taşımaktadır. Yüzey pürüzlülüklerin ölçülmesine ilişkin standartlar TSE'nin TS EN 10049 numaralı standardında belirtilmiştir [63].

Delik yüzeylerinin kalitesi eşli çalışan parçalar, montaj güvenilirliği ve parça ömrü gibi birçok nedenden dolayı büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte delme işleminin zorlu bir uygulama olması, talaş tahliyesi sırasında talaşın takım ve delik yüzeyine olan teması gibi olumsuz etkiler arzu edilen yüksek yüzey toleranslarına ulaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum delme işlemi parametrelerinin ve delik yüzeyi kalitesinin belirlenmesinin önemini artırmıştır.

Yüzey kalitesinin belirlenmesinde yüzey pürüzlülükleri ve yüzey dalgalanmaları kullanılmaktadır. Yüzey dalgalanmaları; yüzeyde oluşan büyük kusurlardır. Dalgalanmalar hassas gerçekleştirilmeyen kesme işlemleri sonucunda oluşur. Yüzey pürüzlülüğü ise mikro yapıdan kaynaklanan ve işlemeden oluşan yüzey kusurlarıdır. Yüzeyde oluşan dalgalanmalar daha çok geometrik sapmalara dâhil edildiği için yüzey kalitesinin belirlenmesinde yüzey pürüzlülüğü daha etkili ve geçerli bir yöntemdir [7, 15].

Yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesinde farklı değişkenler kullanılmaktadır. Bu

değişkenler pürüzlülükleri farklı matematiksel ilişkiler ile ifade eder. R_a ; referans profil için belirlenen alan ortalama çizgisi altında kalan çukur ve üstünde yer alan tümseklerin alanlarının aritmetik ortalamasını ifade eder. R_q ise yine bu alanların geometrik ortalaması olarak tanımlanır. R_t ; referans profil boyunca en yüksek tümsek ile en derin çukur arasındaki mesafeyi tanımlar. R_a sadece ortalamaları verdiği için yüzey hakkında yeterli fikir vermez. Benzer şekilde R_t ' de sadece en uç noktalar ile ilgilendiği için yüzey hakkında tam bir bilgi vermez. Yine de R_a değerini profil üzerinden kaydederek yüzey yapısını grafiksel olarak tanımlamak mümkündür. Pürüzlülük ölçüm cihazlarının birçoğunda R_a değerinin kullanımı yaygınlaşmıştır [7, 62, 64].

3.3.2. Deliğin ölçü (boyut) toleransı

İş parçasından beklenen performansın alınması parçanın tasarlandığı boyutlarda üretilmesi ile mümkündür. Ancak tezgâh hassasiyetleri, üretimi ya da ölçmeyi gerçekleştiren operatörün yeterliliği, üretim ya da ölçümün yapıldığı ortam şartları ve ölçü aletinin ölçme hassasiyeti parçanın mutlak doğrulukta üretilmesini imkânsız kılar. Bu nedenle oluşacak hata alt ve üst toleranslar ile sınırlandırılır. Toleranslar, bir harf ve bir sayı ile ifade edilir. Harf tolerans alanının sıfır çizgisine (anma ölçüsüne) olan uzaklığını, sayı ise kalite grubunu ifade eder. Delik toleransları büyük harfler ile gösterilir [63].

Delme işleminde delik yüzeyinin kalitesi kadar delik boyutları da büyük önem taşımaktadır. Montaj işleminin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi ve eş çalışacak parçaların uyumu için delik çapının belirlenmiş tolerans aralığında kalması beklenir. Toleransların dışındaki çaplar iş parçasının kullanılmayacağı anlamına gelir. Bu durum önemli bir iş kaybı ve maliyet artışına neden olur. Delik çaplarının tolerans aralığının içinde kalarak nominal çapa en yakın seviyede olması beklenir.

İşlem sonunda oluşan delik çapının nominal çaptan farkı çaptan sapma olarak ifade edilir. Delik çapındaki değişim değerleri toleranslar ile sınırlandırılmıştır. Delme işleminde matkabın merkezden sapması, matkabın sağlıklı bağlanmaması, titreşimler, yüksek ilerleme hızlarına bağlı olarak matkap üzerinde oluşan kararsız yükler, aşınma gibi nedenler delik çapındaki sapma değerlerini artırmaktadır [13].

3.3.3. Deliğin şekil ve konum toleransı

Yüzey ve boyut toleransları haricinde deliğin geometrik özelliklerini ve parça üzerinde bulunması gereken konumunu gösteren toleranslar şekil ve konum toleranslarıdır. Bir iş parçasının paralellik, diklik, doğrusalık, düzlemsellik, dairesellik, eş merkezlilik, silindiriklik, simetriklik ve yalpalama gibi geometrik özellikleri ve parça üzerindeki detayların konumları bu tolerans grubu ile belirlenir. Özellikle uzay ve havacılık alanı gibi hassas ve karmaşık geometrilerin işlendiği dallarda şekil ve konum toleransları büyük önem taşır. Şekil ve konum toleranslarına dair özellikler TSE'nin TS EN ISO 1101 nolu standardı ile belirlenmiştir [62, 63]. Şekil ve konum toleranslarının teknik resimde gösterilmesine ilişkin standartlar ise TS 1498 nolu standartta sunulmuştur.

Deliğin sahip olduğu şekil özelliklerinin istenilen tolerans aralığının içinde kalması beklenmektedir. Nominal şekil özelliklerinin dışına çıkılması sapma olarak ifade edilir. Bu sapmaların belirlenen tolerans değerinin altında olması istenir. Delik için büyük önem taşıyan ve en çok kullanılan şekil ve konum toleransları dairesellik, silindiriklik ve dikliktir.

Dairesellik (Ovalite)

Delik boyunca alınan tüm kesitlerde delik çevre çizgisinin, aynı kesit düzleminde bulunan ve delik ile eş merkezli iki daire arasında kalması gerekmektedir. Bu iki daire arasındaki mesafe belirlenen dairesellik toleransıdır [50, 62, 63]. Tolerans aralığını belirleyen eş merkezli iki daireden küçük olanı delik çapının en küçük olduğu noktaya teğet olmalıdır.

Dairesellik değerleri takım ve iş parçasının bağlanma kalitesinden, tezgâh rijitliğinden, seçilen kesme parametrelerinin uygunluğundan, oluşan titreşimlerden, soğutma/yağlama yeterliliğinden ve talaş tahliyesinden etkilenmektedir. Delme işleminin başlangıcında oluşan dinamik kararsızlık delik çaplarında olduğu gibi dairesellikte de etkilidir [65, 66].

Silindiriklik

Delik boyunca delik yüzeyinin, delik ile eş merkezli iki silindir arasında kalması gerekmektedir. Bu iki silindir arasındaki mesafe belirlenen Silindiriklik toleransıdır [62, 63].

Silindiriklik deliğin ilerleme ekseninden kayması olarak da tanımlanabilir. Derin delik uygulamalarında silindiriklik önemlidir. Delme işlemi sırasında oluşan aksenal kuvvetlere bağlı sehim, yetersiz talaş tahliyesi, yüksek kesme bölgesi sıcaklıklar silindiriklikten sapma değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Etkili bir soğutma uygulaması hem sıcaklıklar hem de talaş tahliyesini iyileştirerek silindiriklikten sapma değerlerinin azalmasına olumlu bir etkiye sahiptir [67].

Diklik

Delik ekseninin, belirlenen referans yüzeyine dik olan düzlem üzerinde bir birine paralel iki düzlem arasında bulunması diklik toleransıdır. Paralel iki düzlem arasındaki mesafe diklik tolerans aralığı olarak ifade edilir [54, 61, 63].

Derin delik uygulamalarında matkapta oluşan sehim, iş parçasının düzgün bağlanmaması gibi operasyon koşulları diklik toleransının nominal değerden sapmasına neden olmaktadır.

4. TALAŞLI İMALATTA SOĞUTMA

Talaş kaldırma sürecinde soğutma ve yağlama uygulamaları operasyon verimliliğine büyük katkı sağlamaktadır. Bu soğutma ve yağlama işlemleri için kesme sıvılarının kullanımı gerçekleştirilmektedir. Soğutma işlemi, kesme bölgesinde oluşan yüksek ısının hızlıca uzaklaştırılmasını; yağlama ise, takım-talaş ve takım-iş parçası arasında bir film tabakası oluşturarak sürtünmelerin azaltılmasını amaçlar. Soğutma ve yağlama görevleri yanında talaş tahliye hızını artırmak, talaş boyutlarını düşürmek, talaş yapışmasının önüne geçmek, korozyonu önlemek, takım ömrünü artırmak gibi işlevler de kesme sıvılarının özelliklerindendir. Kesme sıvılarının arzu edilen etkiyi gösterebilmesi için kesme bölgesine doğru bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Kesme sıvıları kullanımının sağladığı avantajlar;

- Kesici takımda oluşan aşınmaları azaltarak takım ömrünü artırır,
- Kesme bölgesinde sürtünmeleri azalttığı için kesme kuvvetleri azalır,
- Talaşın hızla uzaklaşmasını sağlar,
- Yüksek sıcaklıklara bağlı çarpılmaları azaltır,
- Daha yüksek hızlarda çalışma imkânı sunar ve işleme süreleri kısalar,
- Yüzey kalitesinin artmasına katkı sağlar.

Bu avantajlar sonucunda takım maliyetleri, güç maliyetleri ve işçi maliyetleri azalır bu duruma ek olarak birim zamanda üretilen parça sayısı artarak parça başı maliyetler düşer [14].

Kesme sıvılarının işlevlerini başarılı bir şekilde yerine getirebilmesi için bazı özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. İyi bir soğutma performansı için kesme sıvısının ısı iletim yeteneği ve özgül ısının yüksek olması gerekir. İyi bir yağlama için ise kesme sıvısının yüksek yapışma ya da ıslatma özelliği olması gerekir. Yapışma ya da ıslatma akışkanın bir yüzeye belirli bir kalınlıkta yapışması anlamına gelir, yağlar yapışma kabiliyeti yüksek sıvılardır. Başlıca kesme sıvılarının özellikleri;

- Yüksek soğutma kabiliyeti
- Yüksek yağlama kabiliyeti
- Yüksek korozyon koruması

- Uzun depolama ve kullanma ömrü
- Kolay yanmama ve tutuşmama özelliği
- Sağlığa zararlı etkilerinin olmaması
- Düşük viskoziteye sahip olması
- Operasyon şartlarını olumsuz etkilememesi
- Çevreci olması, havayı ve suyu kirletmemesi
- Yüksek geri dönüşümü olması
- Maliyetleri çok fazla artırmaması

Bu özelliklerin tamamını taşıyan ideal bir kesme sıvısı bulunmamaktadır. Soğutma ve yağlama özelliği kesme sıvıları için belirleyici özelliktir. Suyun ısı iletim kabiliyeti ve özgül ısısı yüksektir. Suyun özgül ısısı yaklaşık olarak yağların iki katıdır. Ancak suyun yapışma özelliği çok çok düşüktür. Ayrıca su korozyona yol açarak ürün kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. İdeal bir kesme sıvısı için hem soğutma kabiliyeti yüksek olan hem de su ile yapışma kabiliyeti yüksek olan yağ karışımları ve bu karışıma katkı sunacak ek maddeler eklenir.

Kesme sıvıları farklı özellikleri ve kullanımları ile genelde iki başlık altında değerlendirilir. Kesme sıvıları emülsiyon kesme sıvıları, kimyasal kesme sıvıları ve kesme yağları olarak sınıflandırılırlar. Operasyon verimliliğini artırmak için kesme sırasında benzer amaçlarla gazların da kullanıldığı koşullar mevcuttur.

Kesme yağları; soğutmadan ziyade yağlamanın öne çıktığı işlemlerde kullanılır. Kesme yağları yüksek korozyon koruyuculuğu ve yüzey kalitesi sağlamaktadır. Ancak yanma riski yüksek kesme hızlarında kullanımlarını sınırlandırır. Soğutma özellikleri zayıftır ve cilt hastalıkları gibi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Vida açma, diş açma, taşlama, honlama gibi operasyonlarda kullanılır [15, 68, 69].

Kimyasal kesme sıvıları; su ve kimyasalların karışımından oluşur. Bu sıvılar üstün soğutma kabiliyetlerine, korozyon önleme özelliğine sahiptirler. Soğutma özelliklerinin yüksek oluşu, ısı oluşumunun fazla olduğu yüksek kesme hızlarında büyük fayda sağlar. Bu sıvılar berraktır ve operasyon şartlarının görünmesini engellemez. Ancak yağlama özellikleri çok zayıftır. Frezeleme, raybalama ve testere ile kesme gibi operasyonlarda kullanılır. Yağlayıcı

özelliklerini artırmak için bu kimyasal sıvılarına bazı mineral yağlar eklenmektedir. Bu kesme sıvıları yarı kimyasal kesme sıvıları olarak adlandırılır [15].

Emülsiyon kesme sıvıları; bu sıvılar su ve yağ karışımlarıdır. Su ile petrol bazlı mineral yağın karışım oranı %5 – 10 arasındadır. Karışım genelde süt rengini alır. Bu sıvılar yüksek soğutma, temiz iş ortamı, yüksek korozyon önleme, düşük maliyet, düşük yanma ve yağlama özellikleri nedeni ile tercih edilirler. Çok ağır talaş kaldırma işlemleri dışında tüm işlemlerde ve kesme hızlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Ancak bu sıvıların köpürme, cilt hastalıkları, atık problemleri gibi olumsuz etkileri de mevcuttur [7, 15, 44, 70].

Gazlar; hava kesme bölgesinde sürekli olan bir akışkandır. Havanın sınırlı olan yağlama ve soğutma etkileri kuru kesme şartlarında dahi etkilidir. Bir kompresör yardımıyla kesme bölgesine basınçlı hava gönderimi talaş tahliyesini kolaylaştırır, maliyet gerektirmez nüfuziyeti yüksektir sıvıların giremediği bölgelere girebilir. Bazı özel malzemelerin üzerinde sıvı kalıntıların kalması istenmeyebilir. Bu gibi durumlar da gazların kullanımı devreye alınır. Bu gibi durumlarda helyum, karbondioksit, argon ve azot gibi gazların soğutma etkilerinden faydalanılır [15].

Kesme bölgesine sıkıştırılıp gönderilen karbondioksit buharlaşarak soğutma sağlar. Havanın ya da gazların doğrudan kullanıldığı sistemler yanında, başka soğutucu ve yağlayıcılar eşliğinde, kesme bölgesine gönderildiği uygulamalar da mevcuttur [44].

Kesme sıvılarının istenilen performansı sergileyebilmesi için doğru ve etkili bir şekilde uygulanması gerekir. Kesme sıvısının kesme bölgesine gönderilmesindeki kayıplar, basınç ve debi gibi faktörler soğutma kabiliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Kesme sıvısı özellikleri, operasyon özellikleri ve gereklilikleri, kesici takım özellikleri farklı soğutma yöntemlerini doğurmuştur. Soğutma yöntemlerinin verimli bir şekilde uygulanması için tezgâhlar üzerine soğutma sistemleri (depo, pompa, soğutma hattı, filtre, vana, valfler vb.) donanım olarak eklenmiştir [15]. Tüm soğutma yöntemlerinin tezgâh üzerine eklenmesi maliyetleri fazlaca artıracığından en çok kullanılan soğutma yöntemleri üreticiler tarafından tercih edilmektedir. Soğutma yöntemleri doğrudan tezgâh donanımı olarak kullanıldığı gibi dışarıdan da kesme bölgesine uygulanabilmektedir. Soğutma uygulamalarında talaşın değil, takım ve iş parçasının soğutulmasına özen gösterilmelidir. Bu durum ise soğutma sisteminin konumlandırılmasını önemli kılmaktadır.

Kesme sıvısının uygulama basıncı; talaşın kırılması, talaşın uzaklaştırılması ve akışkanın nüfuziyeti adına etkilidir. Delme işlemi gibi talaş tahliyesinin zor olduğu ve talaş – iş parçası temasının fazla olduğu operasyonlarda bu durum daha büyük önem taşımaktadır [44, 71].

Geleneksel soğutma

Geleneksel soğutma yöntemi en çok kullanılan soğutma yöntemidir. Sıvı akışkanın kesme bölgesine yoğun bir şekilde gönderilmesi (fışkırtılması) ile bu yöntem gerçekleştirilir. Geleneksel soğutma yönteminde genellikle emülsiyon kesme sıvıları kullanılmaktadır. Bu yöntem hemen hemen tüm tezgâhlarda donanım olarak kullanılmaktadır. Geleneksel soğutma yöntemi takım içinden ve takım dışından uygulanabilir. Takım dışından gerçekleştirilen soğutmada, soğutucu akışkan nozullar yardımı ile kesme bölgesine gönderilirken, takım içinden uygulamalarında ise özel takım ve takım tutucular gerekmektedir. İçten soğutma uygulamaları için tezgâhın da uygun alt yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu yöntemde uygulama basıncı soğutucu akışkan pompası ile belirlenmektedir, dıştan soğutma işlemleri genellikle 5-50 bar, içten soğutma uygulamaları ise 35-100 bar basınçlara kadar uygulanabilmektedir. Bu yöntem tornalama, frezeleme, delme başta olmak üzere hemen hemen tüm talaşlı imalat yöntemlerinde kullanılmaktadır [2, 44].

Gaz ile soğutma

İş parçası üzerinde sıvı kalıntılarının istenmediği durumlarda hava ile soğutma alternatif bir yöntem olmuştur. Soğutma işlemi; kesme bölgesine kuru hava, argon, helyum karbondioksit vb. gazların gönderilmesi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde soğutucu akışkan (gaz) belirli bir basınçta kesme bölgesine gönderilir. Havanın sağlıklı, ucuz ve sınırsız bir kaynak olması soğutucu maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Buna ek olarak depolama ve geri dönüşüm maliyetleri de bu yöntem ile ortadan kalkmaktadır. Basınçlı hava kesme bölgesindeki talaşı etkili bir şekilde uzaklaştırmaktadır. Bu özelliklerinde dolayı hava ile soğutma önemli bir alternatif olmuş ve tezgâh donanımlarına eklenmeye başlanmıştır. Hava ile soğutma uygulamaları bu avantajlarına rağmen soğutma ve yağlama kabiliyetleriyle geri planda kalmaktadır [2]. Bu durum havanın soğutulmasını gündeme getirmiştir. Vorteks tüpleri kullanılarak sıkıştırılmış havanın soğutulması sağlanmıştır [72]. Soğuk hava uygulamaları ile kesme bölgesinde soğutma sağlanmıştır. Ancak yağlama kabiliyetleri sınırlı

kalmıştır. Bu soğutma yöntemi; başta frezeleme olmak üzere birçok talaşlı imalat yönteminde uygulanmaktadır.

Minimum miktarda yağlama (Minimum Quantity Lubrication - MQL)

MQL ile soğutma yönteminde basınçlı hava çıkışa yakın bir noktada bir başka hattan gelen az miktarda yağ ile karıştırılarak kesme bölgesine püskürtülür. Kesme sıvısı olarak kullanılan yağların maliyetleri, sağlık açısından olumsuz etkileri, geri dönüşüm maliyetleri, çevreye olan zararları bu sıvıların yoğun kullanılmasını sınırlamaktadır. Hava ile soğutma uygulamasının yağlama konusundaki yetersizliği bu iki yöntemle birbirine bütünleşmiştir. Böylece yağ kullanımı en az seviyede tutulmuş (10 – 150 ml/saat) ve hava ile etkili bir yağlama sağlanmıştır. Ayrıca basınçlı hava sayesinde yağın kesme bölgesine nüfuziyeti artırılmış ve yağlama kalitesi yükseltilmiştir. Bu yöntem de geleneksel soğutma gibi takım içinden ve takım dışından uygulanabilmektedir. Tezgâh donanımı gibi kullanılmasının yanında dışarıdan da uygulanabilmektedir. Hava basıncı, yağ debisi bu yöntemin etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Tüm talaşlı imalat yöntemlerine uygulanabilmektedir [2, 7].

Kriyojenik soğutma

Bu soğutma yöntemi de hava takviyeli bir diğer soğutma uygulamasıdır. Kesme bölgesine hava ile birlikte sıvı nitrojen (azot) gönderilmesi ile soğutma gerçekleştirilmektedir. Sıvı azotun çok düşük sıcaklıklarda (-196 °C) kalabilmesi, kesme bölgesinin etkili bir şekilde soğutulmasını sağlamıştır. Bu etkili soğutma kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklıkları düşürerek takım aşınmalarını azaltmaktadır. Takım ömrü ve kesme performansının artması bu yöntemi öne çıkarmaktadır. Ancak bu düşük sıcaklıklarda canlı dokunun da zarar görmesi operatör sağlığını tehdit etmektedir. Ayrıca azot maliyetlerine ek olarak azotun özel tanklarda depolanması, özel hatlar ile taşınması ek maliyetlere sebep olmaktadır. Tüm bunlar kriyojenik soğutmanın sınırlı alanlarda kullanımına neden olmuştur [2, 9].

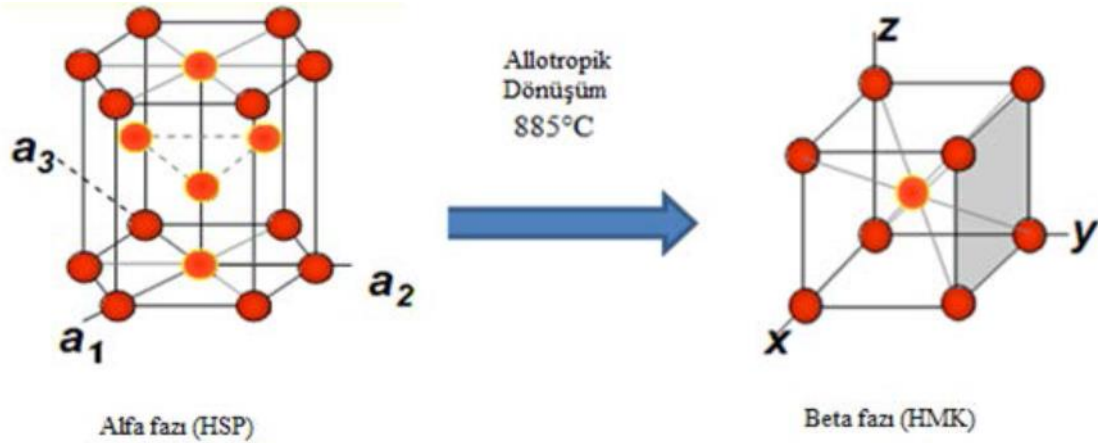


5. TİTANYUM MALZEMESİ

Titanyum yer kabuğunda en çok bulunan dokuzuncu element ve dördüncü metaldir [73]. 18. Yüzyılın sonlarında keşfedilen titanyum, büyük bir rezerve sahip olduğu halde kullanılabilir hale getirilmesi, yüksek maliyet ve teknoloji gerektirdiği için 1950'li yılları bulmuştur. Tabiatta TiO_2 (rutil minerali) veya $FeTiO_3$ (ilmenit minerali) olarak bulunan titanyumun saflaştırılması bir dizi kimyasal operasyonu içermektedir [74]. Gelişen teknoloji sayesinde titanyum alaşımları birçok endüstride ticari olarak kullanılmaktadır. Titanyumun bu denli yaygın kullanılması onun üstün mekanik ve kimyasal özellikleri sayesinde. Titanyum diğer metallere kıyasla düşük özgül ağırlığa ($4,51 \text{ g/cm}^3$) sahiptir. Titanyumun özgül ağırlığı çelik ile kıyaslandığında % 60 daha hafiftir. Hafif olmasının yanında $1670 \text{ }^\circ\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıklarda ergiyen bir metaldir. Saf titanyum ve titanyum alaşımları özellikle yüksek sıcaklıklar ($253 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$) altında üstün mekanik özelliklerini muhafaza edebilmektedir. Titanyum düşük ısı iletkenliğe sahip bir malzemedir [10]. Tüm bu üstün özelliklerine ek olarak yüksek korozyon dayanımı, biyolojik uyumluluğu, yüksek mekanik dayanımı (1235 MPa), zehirli olmaması ve sertliği gibi özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [17]. Titanyum alaşımları; başta uzay ve havacılık olmak üzere, otomotiv, nükleer, biyomedikal, petrokimya, denizcilik, askeri, mobil iletişim, spor ürünleri, gıda ve mücevher gibi birçok endüstri dalının gözde malzemesidir [75]. Titanyumun bu üstün özelliklerinin daha da geliştirilmesi amacıyla titanyum alaşımları geliştirilmiştir. Endüstriyel kullanım dikkate alındığında en çok kullanılan titanyum alaşımı $Ti6Al4V$ alaşımıdır.

Titanyum elementi sıcaklığa bağlı olarak farklı fazlarda bulunmaktadır. Oda sıcaklığında titanyum hekzagonal sıkı paket yapıda ve α fazında bulunurken artan sıcaklık ile ($880 - 885 \text{ }^\circ\text{C}$) hacim merkezli kübik yapıya ve β fazına dönüşmektedir.

Gelişmiş özellikleri nedeni ile endüstriyel uygulamalarda titanyum alaşımları saf titanyuma göre daha çok tercih edilmektedir. Titanyum alaşımları içerisinde barındırdığı titanyumun fazı dikkate alınarak sınıflandırılır. Bu açıdan titanyum alaşımları α fazlı titanyum alaşımları, $\alpha + \beta$ fazlı titanyum alaşımları ve β fazlı titanyum alaşımları olmak üzere üç gruba ayrılır.



Şekil 5.1. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alfa (α) fazlı titanyum alaşımları

Bu alaşımlar içerisinde; alfa fazlı titanyum ile birlikte alüminyum, zirkonyum ve kalay gibi alaşım elementleri bulundurulur. Özellikle alüminyum faz geçiş sıcaklığını yükselterek α fazının daha kararlı hale gelmesine katkı sağlar. Alfa fazlı titanyum alaşımları çok yüksek ve düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özelliklerini (mukavemet, tokluk, sürtünme direnci) muhafaza etme konusunda diğer alaşım türlerine göre daha başarılıdır. Bu alaşım grubu ısıtılma ve plastik şekil verme yöntemleri ile şekillendirmeye elverişli değildir.

Beta (β) fazlı titanyum alaşımları

Beta fazlı titanyum alaşımları ise içerisinde vanadyum, molibden, demir ve krom gibi β fazı sabitleyici alaşım elementleri ile birlikte β fazında titanyum elementi içermektedir. Beta fazlı titanyum alaşımları hacim merkezli kübik yapıya sahiptirler. Bu HMK yapı titanyum alaşımlarının plastik şekil verme yöntemi ile şekillendirilmesine imkân sağlamıştır. Böylece β fazlı titanyum alaşımları dövme başta olmak üzere haddeleme, ekstrüzyon vb. soğuk şekillendirme teknikleri ile şekillendirilebilirler. Buna ek olarak bünyelerinde bulunan vanadyum ve molibden gibi ağır metallerden dolayı yüksek yoğunluklara sahiptirler. Beta fazlı alaşımlar yüksek dayanımlara sahiptir ancak bu dayanımlarını yüksek sıcaklık altında muhafaza etme konusunda $\alpha + \beta$ fazlı titanyum alaşımları kadar iyi bir performans sergilemezler. Yorulma dayanımı, ısıtılma işlem görme kabiliyeti ve yüksek yanma dayanımı β fazlı titanyum alaşımlarının avantajları arasında sayılmaktadır. Yüksek yoğunluklarına ek

olarak mikro yapılarındaki kararsızlıklar ve düşük korozyon dirençleri gibi özellikleri ise bu tip alaşımların dezavantajlarıdır.

Alfa – Beta ($\alpha + \beta$) titanyum alaşımları

Bu alaşımlarda alfa ve beta fazları, uygun alaşım elementlerinde dengesi ile bir arada bulunur. Bu alaşımlarda β fazı sabitleyici alaşım elementlerinin varlığı ile β fazının alaşım içinde varlığını koruması sağlanır. Alfa – beta titanyum alaşımları %10-50 arasında değişen değerlerde beta fazı içerirler. Bu alaşım türü, β fazlı alaşım elementleri kadar yüksek dayanıma sahip değillerse de düşük yoğunlukları sayesinde özgül dayanımları yüksek alaşımlardır. Bu alaşımlar yaşlandırma, çözelti ısıtma işlemi ve tavlama gibi ısıtma işlemleri uygulamaya elverişlidir. Isıtma işlemi gördükten sonra bu malzemeler yüksek dayanım ve tokluğa kavuşurlar. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan titanyum alaşımlarının %70 $\alpha + \beta$ alaşımlarıdır. Alfa – beta alaşımlarının en önemlisi ve en çok kullanılan alaşımı Ti6Al4V'dir.

Ti6Al4V alaşımının endüstriyel uygulamalarda kullanım oranı yaklaşık %45'tir [76]. Ti6Al4V malzemesinin sahip olduğu yüksek korozyon dayanımı, yüksek dayanım, düşük ağırlık/dayanım oranı gibi özellikler bu alaşımın tercih edilmesine neden olmuştur. Bu üstün özelliklerine ek olarak malzemenin fabrikasyonu, üretim deneyimi ve ticari olarak kolay temin edilebilmesi malzemenin kullanımını artırmıştır. Ti6Al4V malzeme uzay ve havacılık uygulamalarında, savunma sanayinde, medikal endüstrisinde, enerji santrallerinde ve gaz türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [73]. Eklemeli imalat sanayisinde tercih edilen tozların başında da Ti6Al4V tozu gelmektedir [77].



6. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)

İnsan beyni mevcut koşulları sınıflandırma, değerlendirme, yorumlama, öğrenme ve hatırlama özelliklerine sahiptir. İnsan beyni sebep- sonuç ya da girdi - çıktı verileri arasında ilişki kurar, bu ilişkileri sistematikleştirir ve öğrenme özelliği ile değişen girdi koşullarına göre çıktıları tahmin edebilir. İnsan beyni bu özelliklerini karmaşık ağ yapısını oluşturan nöronların varlığı ile sağlamaktadır. Nöronların temel görevi bilgi taşımaktır. Değişen şartları, buna verilen tepkiyi ve tepki sonunda oluşan yeni şartları sürekli beyne iletirler. Böylece sürekli bir veri akışı oluşturarak girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi bir döngüye bağlar. Bu nöron döngüleri; öğrenme, yorumlama ve tahmin etme yeteneği kazandırır [59, 78].

Verilerin yapay sinir ağları (YSA) ile modellenmesi insan beyninin yapısından ilham alınarak geliştirilmiştir. Bilgisayar ortamında geliştirilen yapay sinir ağları, klasik bilgisayar algoritmalarının dışında insan beynine benzer şekilde öğrenme algoritmalarına sahiptir. Böylece yapay sinir ağları çıktıları tahmin edebilir [79]. Bu özelliği nedeni ile yapay sinir ağları ile modelleme birçok bilim alanında yürütülen faaliyetlerde kullanılmaktadır. YSA ile modelleme optimizasyon işlemleri, verilerin ilişkilendirilmesi, sınıflandırma, zaman seri analizi ve doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi gibi işlemlerde kullanılan bir yöntemdir. YSA ile modelleme ilk olarak 20. Yüzyılın ortalarında bir elektrik devresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [78].

Yapay sinir ağları ile modelleme öğrenme ve hatırlama özellikleri sayesinde sistem verilerini ilişkilendirir ve girdi – çıktı bağlantısını kurabilir. Yapay sinir ağlarının bu iki özelliği sayesinde daha önce kendisine tanıtılmayan girdi verileri ile karşılaştığında da çıktı verisi üretebilmektedir. Yapay sinir ağları ile modellemenin bu özelliği birçok alanda kullanılmasına yol açmıştır. Sağlık, ekonomi, enerji, otomotiv, imalat, uzay ve havacılık gibi iş alanlarında girdi ve çıktılar arasındaki ilişki matematiksel olarak modellenirken yapay sinir ağları kullanılmaktadır [80].

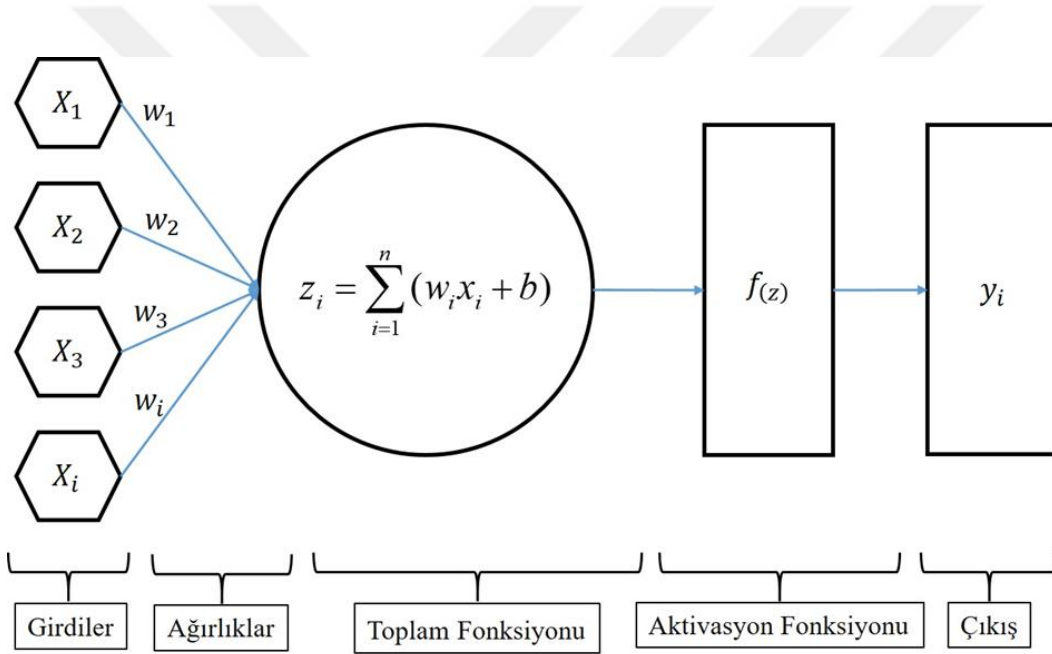
6.1. Yapay Sinir Ağı Hücresi ve Elemanları

Yapay sinir ağları hücresi yapısal olarak beyin sinir hücrelerine benzetilmiştir. Bir yapay

sinir ağı hücresinde girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar bulunur. Sistem dışından ya da diğer hücrelerden alınan veriler girdileri oluşturur. Girdiler ağırlıklar sayesinde sisteme bağlanır. Bu ağırlıklar girdilerin etkilerini belirler. Toplam fonksiyonu, tüm girdiler ve bu girdilerin ağırlıklarının çarpımının bir fonksiyonudur. Aktivasyon fonksiyonu ise sistem çıkışını hesaplar. Aktivasyon fonksiyonu çoğunlukla doğrusal olmayan bir fonksiyondur [59, 78].

$$y_i = f(W.X + b) \quad (6.1)$$

Çıkış değeri Eş. 6.1 ile hesaplanır. Bu eşitlikte W ; ağırlıkların, X ise girişleri sembolize eder.



Şekil 6.1. Yapay sinir ağı hücresinin elemanları

Girdiler; yapay sinir ağı elemanına dışarıdan gelen verilerdir. Girdilerin sayısı ve büyüklüğü modellenmesi istenilen sisteme göre değişiklik gösterir. Bu aşamada verilere her hangi bir işlem uygulanmaz olduğu gibi bir sonraki elamana iletilir.

Ağırlıklar; girdiler ile elde edilen veri ya da verilerin toplam fonksiyonu üzerindeki etkisini belirleyen katsayılardır. Ağırlık değeri veri ve çıktı arasındaki ilişkiye bağlı olarak pozitif, negatif veya sıfır değerlerini alabilir.

Toplam fonksiyonu; girdilerin ağırlıklar ile çarpılarak gönderildiği bölümdür. Burada

verilerin bütünleştirilmesi sağlanır ve net girdi hesaplanır. Veriler aktivasyon fonksiyonuna gönderilmeden önce genellikle toplanır. Bazı durumlarda bu işlem verilerin en büyüğü, en küçüğü veya kümülatif/birikmiş toplamı alınarak da gerçekleştirilebilir. Verilerin hangi toplama fonksiyonuna göre değerlendirileceğine dair bir sınıflandırma bulunmamaktadır. Toplam fonksiyonun sonucu doğrusal ya da doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonuna gönderilerek çıktı hesaplanır.

Aktivasyon fonksiyonu; girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkinin eğrisel olarak tanımlanmasını sağlar. Özellikle yapay sinir ağının yüksek performans ile çalışması ve sistemin daha önce tanımlanmamış girdiler karşısında yüksek doğruluk ile çıktıları tahmini ideal aktivasyon fonksiyonun seçilmesi ile sağlanır. Aktivasyon fonksiyonu olarak doğrusal, adım, rampa, sigmoid, fermi ve hiperbolik tanjant fonksiyonları yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar arasında en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonu sigmoid fonksiyonudur. Sigmoid fonksiyonu Eş. 6.2' de verilmiştir.

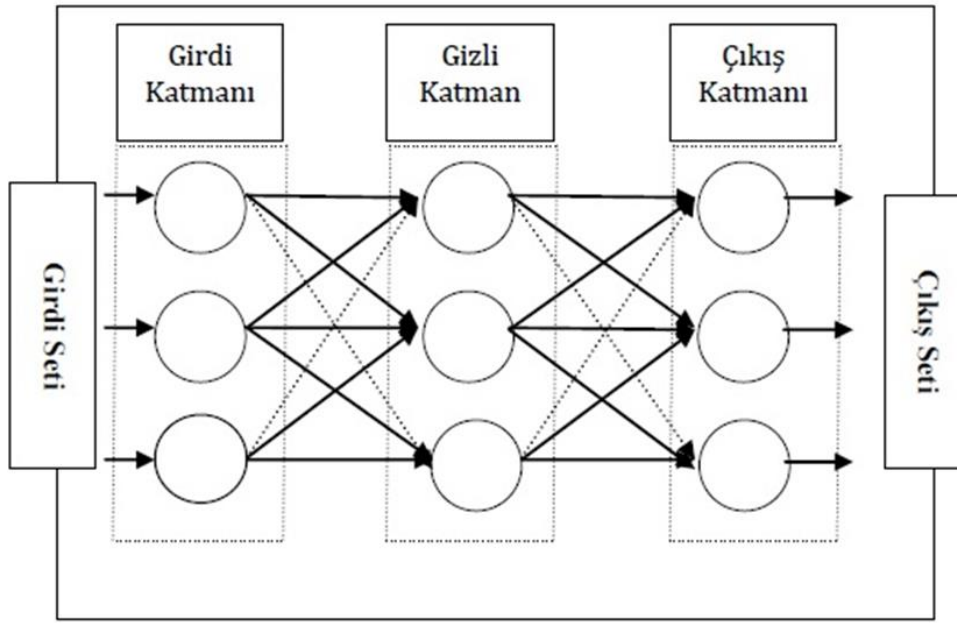
$$F_{(O)} = \frac{1}{1 + e^{-\sum w_i \cdot x_i}} \quad (6.2)$$

Çıkış; aktivasyon fonksiyonun uygulanması ile elde edilen çıktı değerlerini ifade eder.

6.2. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı

Yapay sinir ağları bünyelerinde bulundurdıkları katman yapısına göre tek ve çok katmanlı ağlar olarak iki gruba ayrılmıştır.

Tek katmanlı yapay sinir ağları sadece girdi ve çıktı katmanlarından oluşur. Tek katmanlı ağlar ile sadece doğrusal problemler çözülebilir. Tek katmanlı yapay sinir ağları karmaşık problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır [81]. Çok katmanlı ağlar ise girdi ve çıktı katmanları dışında gizli katmanların da bulunduğu ağ yapılarıdır. Bu tür ağ yapılarında gizli katmanlar, girdi katmanından gelen verileri aktivasyon fonksiyonunda işleyerek çıktı katmanına transfer eder. Karmaşık problemlerin çözümünde en az bir gizli katman bulunması gerekmektedir. Girdi katmanı ve çıktı katmanı arasında yer alan tüm katmanlar gizli katman olarak tanımlanır. Gizli katmanların dış ortam ile bağlantısı bulunmamaktadır. Gizli katmanlar girdi katmanından aldığı verileri işleyerek çıktı katmanına iletmektedir [78].



Şekil 6.2. Yapay sinir ağı katmanları [59]

Yapay sinir ağı ile modellemede ağ elemanlarının ve katmanların birbirleri ile olan ilişkileri ağ yapılarında farklılaşmalara neden olmuştur. Yapay sinir ağı ileri beslemeli ve geri beslemeli olmak üzere iki sınıf bağlama biçimine göre sınıflandırılmıştır. İleri beslemeli ağlarda verinin sürekli ileri doğru aktarılması söz konusudur. Dışarıdan alınan veriler sırası ile girdi katmanına, gizli katmana ve son olarak çıktı katmanına doğru ilerler. Verinin ters yönlü akışı bu sistemlerde yoktur. Bu sistemlerde tüm katman elemanları kendinden önceki katman elemanı tarafından beslenir [59, 78, 81]. Geri beslemeli ağlarda ise katman elemanlarından en az biri kendisinden sonraki katmanlarca beslenir. Böylece verinin sadece ileriye doğru değil geriye doğru da akması sağlanır.

6.3. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi

Yapay sinir ağlarının tasarımında insan beynini esas aldığı gibi çalışma prensibi ve öğrenme süreci de insan beynine benzemektedir. Yapay sinir ağlarının eğitilmesi öğrenme ve test aşamaları olarak iki aşamadan oluşur [78]. Öğrenme aşaması tıpkı insan beyninin öğrenmesi gibidir. Bu süreçte beynin duyu organları ile dış ortamdan veri aldığı gibi veriler alınır. Alınan bu veriler ağırlıkları ile çarpılarak toplam fonksiyonunda toplanır. Duyusal girdilerin beyin merkezinde değerlendirilip söz konusu girdilere karşı bir tepkinin ortaya konulduğu gibi yapay sinir ağlarında da verileri aktivasyon fonksiyonda değerlendirilerek çıkış üretilir. Söz konusu çıktılar mevcut sonuçlar ile karşılaştırılarak hata hesaplanır. Bu aşamadan sonra

hatanın en aza indirilerek gerçek çıkışa en yakın çıkışın hesaplanması için öğrenme süreci döngüsel olarak tekrarlanır. Bu aşamada verilere dair ağırlıklar tekrar hesaplanarak hatanın en aza düşürülmesi hedeflenir. Öğrenme süreci sonucunda giriş ve çıkış verileri arasında istenilen uyum yakalanana kadar devam eder ve söz konusu ağırlık oranları kayıt altına alınır.

Öğrenme süreci tamamlandıktan sonra test süreci devreye girer. Test sürecinde ağ sisteminin daha önce karışılmadığı bir veri için çıkış üretmesi istenir. Üretilen bu çıkış ile gerçek çıkış arasında uyum olması istenilir. Ağ sistemi test verilerine doğru çıktıları üretebiliyorsa ağ sistemi işi ya da süreci öğrenmiş demektir [59, 82]. Bu işlem başarısız olursa öğrenme sürecine dönülmesi gerekmektedir.

6.4. Normalizasyon İşlemi

Yapay sinir ağlarının çalışmasına verilerin doğru bir şekilde girilmesi büyük önem taşımaktadır. Verilere bazı ön işlemler uygulanarak daha kolay yorumlanması ve yapay sinir ağlarının daha iyi performans göstermesi sağlanabilir. Verilerin daha etkili bir şekilde yorumlanması için ham verilere Normalizasyon işlemi uygulanır. Bu işlem yapay sinir ağlarının eğitim sürecinin daha kısa olmasına neden olmaktadır [83, 84].

Normalizasyon işlemi veri gruplarına uygulanır ve verilerin dağılımını düzenler. Verilerin bir aralıkta ölçeklendirilmesi (normalizasyonu) ağ sisteminin performansını artırmaktadır. Bir ağ sisteminde veriler içerisinde çok büyük ya da çok küçük değerler olabilir. Bu değerler arasında ilişki kurulmaya çalışılırken veriler arasındaki bu rakamsal farklılık ağ sisteminin yanlış yorumlar yapmasına neden olabilir. Bu durumu ortadan kaldırmak için bütün verilerin belirlenen bir aralıkta tanımlanması gerekmektedir. Böylece farklı dış etkenler sonucu elde edilen verilerin aynı sayısal aralığa indirgenmesi sağlanmış olur. Bu işlemin farklı prensipler benimsenerek yapılması farklı Normalizasyon yöntemlerinin oluşmasına neden olmuştur. Medyan, min. – max., sigmoid ve Z- Score normalizasyonları en çok kullanılan normalizasyon yöntemleridir [81, 83, 85].

Min-Max yöntemi, verileri 0-1 arasında normalize eder. Bu yöntemde verinin alabileceği en küçük değer minimum (0), en yüksek değer ise maksimum (1) olarak tanımlanır. En düşük ve en yüksek veriler arasında kalan diğer veriler ise 0 ile 1 arasında değerler alırlar. Min-

Max normalizasyonu Eş. 6.3' de verilmiştir.

$$x' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6.3)$$

Bu eşitlikte; x' verinin normalize edilmiş değerini, x_i normalize edilecek girdi verisini, $x_{\min}$ veri setinde yer alan en küçük girdi verisini ve $x_{\max}$ veri setinde yer alan en büyük girdi verisini ifade etmektedir.



7. LİTERATÜR TARAMASI

Bu başlık altında Ti6Al4V malzeme üzerinde gerçekleştirilen İşlenebilirlik çalışmalarına ait bir literatür derlemesi yapılmıştır. Literatür bölümü; Ti6Al4V malzemenin kullanım alanları ve bu geniş kullanıma neden olan üstün özelliklerini belirterek başlamaktadır. Devamında yaygın talaşlı imalat operasyonlarından olan tornalama ve frezeleme işlemleri ile Ti6Al4V malzemenin işlenebilirliğine katkı sunan araştırmalara yer verilmiştir. Bu araştırmalar arasında farklı soğutucu basınçlarının kullanıldığı çalışmalar paylaşılmıştır. Talaşlı imalatın önemli bir diğer operasyonu olan ve çalışmamızı da kapsayan delik delme işlemi ile Ti6Al4V malzemenin şekillendirildiği araştırmalar incelenmiştir. Ardından delik delme çalışmaları eşliğinde gerçekleştirilen sıcaklık analizlerine yönelik çalışmalar derlenmiştir. Farklı soğutma yöntemlerinin ve soğutucu basıncının operasyona katkılarını inceleyen çalışmalar da irdelenmiştir. Son olarak literatür bölümünün genel bir değerlendirmesi yapılmıştır.

Ti6Al4V titanyum alaşımının mükemmel korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik özelliklerinin iyi olması ve düşük ağırlık oranı gibi özellikleri bu alaşımı tercih edilen malzemeler arasına taşımıştır. Bu alaşım; başta uzay ve havacılık olmak üzere medikal endüstrisinde, deniz taşıtlarında, otomotiv sektöründe, gıda sanayinde, kimya ve petrokimya endüstrisinde ve farklı endüstri dallarında yaygın olarak kullanılan önemli bir mühendislik malzemesidir [10]. Teknolojide yaşanan gelişmeler malzemeye olan ilgiyi ve kullanım alanlarını artırmıştır. Ancak, bu malzemenin düşük ısı iletkenliği, kimyasal kararlılığı ve elastiklik modülü malzemenin talaşlı imalat yöntemi ile şekillendirilmesini zorlaştırmaktadır [22]. Bu durum Ti6Al4V malzemesi üzerine yapılan çalışmaları ayrıca değerli kılmaktadır.

Talaşlı imalatın önemli yöntemlerinden olan tornalama işlemi uygulanarak Ti6Al4V malzemenin şekillendirildiği çalışmada oluşan sıcaklıkların belirlenmesi amaçlanmıştır. Ti6Al4V malzeme sahip olduğu düşük ısı iletkenlik nedeni ile kesme sırasında oluşan sıcaklığın araştırıldığı malzemelerin başında gelmektedir. İki adımda gerçekleştirilen çalışmada ilk bölümde deneysel çalışmalar yapılmış ve operasyon sırasında termal kamera ile oluşan sıcaklıklar ölçülmüştür. Çalışmanın ikinci bölümünde ise operasyon sonlu elmanlar yöntemi ile modellenerek sıcaklık oluşumu bilgisayar ortamında simüle edilmiştir.

Çalışma sonucunda deneysel ve teorik sonuçlar kıyaslanmıştır. Çalışma esnasında kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kesme deneyleri 0,1 mm/dev sabit ilerleme oranı ve 0,2 mm sabit kesme derinliğinde üç farklı kesme hızı (10, 20 ve 40 m/dak) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V malzemenin talaşlı imalatının simülasyonu için DEFORM 2D yazılımı ile iki boyutlu model geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda artan kesme hızına bağlı olarak operasyon sıcaklığının arttığı bildirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sıcaklık verilerinin uyumlu olduğu görülmüştür [86].

Tornalama operasyonlarında önemli maliyet kalemlerinden olan enerji tüketiminin en aza indirilmesine yönelik bir dizi istatistiki çalışmalar yapılmıştır. Ti6Al4V malzemenin tornalandığı çalışmada yüzey pürüzlülükleri ve özgül kesme enerjileri incelenmiştir. Çalışma parametreleri olarak kesme derinliği (0,2; 0,4 ve 0,6 mm), kesme hızı (35, 40 ve 45 m/dak) ve ilerleme oranları (0,06; 0,08 ve 0,10 mm/dev) olarak belirlenmiştir. Belirlenen çıktı parametrelerinin tahmini için Yanıt Yüzey Metodu (YYM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri kullanılmıştır. Girdi parametreleri etkilerinin belirlenmesi için ise Varyans Analiz yapılmıştır. Her iki çıktı değeri için de (yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme direnci) matematiksel modeller geliştirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde ilerleme oranı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediği kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Özgül kesme direnci ise kesme derinliği, ilerleme oranı ve kesme hızlarından sırası ile en çok etkilenmiştir. Geliştirilen modeller aracılığı ile en düşük yüzey pürüzlülükleri için ideal kesme parametreleri: Kesme derinliği 0,2 mm; ilerleme oranı 0,0637 mm/dev ve kesme hızı 36 m/dak olarak belirlenmiştir. Minimum özgül kesme direnci için ise kesme parametrelerinin kesme derinliği 0,53 mm; ilerleme oranı; 0,0963 ve kesme hızı 44 m/dak olarak belirtilmiştir [87].

Farklı kaplama yöntemleri (CVD ve PVD) ile kaplanmış sementit karbür kesici takımlar ile Ti6Al4V malzeme tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma; kesme hızı (30, 60 ve 90 m/dak), ilerleme oranı (0,052; 0,104 ve 0,162 mm/dev), kesme derinliği (1; 1,5 ve 2 mm) ve kesme uzunluğunun (40, 80 ve 120 mm) farklı kombinasyonları ile oluşturulmuştur. Kuru kesme şartları altında gerçekleştirilen çalışma sonucunda takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Takım aşınması, her iki kaplama türünde de artan kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme oranı ve kesme uzunluğu ile artmıştır. Artan

kesme hızları ile takım aşınması artarken yüzey pürüzlülükleri optimum derecelere inmiştir. Artan ilerleme oranları, kesme derinlikleri ve kesme uzunlukları ile yüzey pürüzlülüklerinin arttığı görülmüştür. CVD kaplı kesici takım PVD kaplı kesici takıma oranla daha çok aşınmıştır. Artan ilerleme oranı ve kesme derinliği ile talaş kalınlığı değerinin arttığı ifade edilmiştir [22, 88].

Tornalama yöntemi kullanılarak Ti6Al4V malzemenin şekillendirildiği bir başka çalışmada, kesme parametrelerine göre değişen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında seramik kesici takımlar kullanılmış, üçer farklı kesme hızı (45, 90 ve 130 m/dak), ilerleme oranı (0,1; 0,2 ve 0,32 mm/dev) ve iki farklı kesme derinliği (0,5 ve 0,75 mm) ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak iki farklı ortamda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kesme sıvısının kullanıldığı deneylerde kuru şartlara kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Kesme sıvısı kullanımının yüzey kalitesine olumlu etkisi ortaya konulmuştur. Seramik kesicilerin de ıslak kesme koşullarında daha az aşındığı, kesme sıvısının takım ömrüne yaklaşık %30 oranında olumlu katkı sağladığı bildirilmiştir. İlerleme oranı ile yüzey pürüzlülüğü değerinin doğru orantılı olduğu, artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığı gözlemlenmiştir [89].

Farklı basınçlarda soğutucu akışkanlar ile desteklenerek gerçekleştirilen Ti6Al4V malzemenin tornalanması işleminde talaş morfolojisi ve takım ömrü araştırılmıştır. Çalışma sabit 75 m/dak kesme hızı, 0,25 mm/dev ilerleme oranı, 2 mm kesme derinliği ve 150 mm kesme uzunluğu ile gerçekleştirilmiştir. Değişken olarak 6 bar ve 90 bar değerinde farklı soğutucu akışkan basıncı belirlenmiştir. Yüksek basınç ile uygulanan soğutucunun talaş boyutlarını küçülttüğü ve talaş kontroline katkı sağladığı, daha uzun takım ömrü ortaya koyduğu bildirilmiştir [90].

Sıklıkla kullanılan bir diğer talaşlı imalat yöntemi olan frezeleme operasyonu kullanılarak Ti6Al4V malzemenin işlenebilirliği araştırılmıştır. Yüksek basınçlı soğutucu eşliğinde gerçekleştirilen çalışmada değişen kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney tasarımı Taguchi L16 dizini kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kesme hızı, ilerleme oranı ve soğutucu basıncı parametreleri için dörder seviye belirlenmiştir. Deneyler sırasında kaplamalı takma uç kullanılmıştır. Çalışma sırasında radyal kesme derinliği 10 mm, eksenel kesme derinliği ise 2 mm olacak şekilde sabit

tutulmuştur. Çalışma bulgularında; ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğüne doğrudan etki ettiği, artan ilerleme oranı ile pürüzlülük değerlerinin arttığı bildirilmiştir. Değişen soğutucu basıncı ve kesme hızının ise yüzey pürüzlülüğüne belirgin bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ideal çalışma şartları belirtilmiştir [91].

Bir başka çalışmada Ti6Al4V malzeme, karbür (WC) ve TiN kaplı HSS parmak freze çakıları ile frezelenmiştir. Kuru kesme koşulları altında gerçekleştirilen operasyonda kesme derinliği sabit 2 mm olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında üçer farklı kesme hızı (5, 10 ve 15 m/dak) ve ilerleme oranı (0,05; 0,075 ve 0,1 mm/dev) kullanılmıştır. Çalışma genelinde farklı takım tiplerinin, değişen kesme hızı ve ilerleme oranlarının kesme kuvvetlerine, yüzey pürüzlülüğüne, takım aşınmasına ve kanal sapmalarına etkileri araştırılmıştır. Artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, artan ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin ise arttığı her iki takım tipinde de görülmüştür. Takım aşınmasının artan kesme hızı ve ilerleme oranı ile arttığı bildirilmiştir. Kanal girişlerinde oluşan sapma değerlerinin kanal çıkışındaki sapma değerlerinden yüksek olduğu ve artan ilerleme oranı ile kanal sapmalarının nominal değerlere yakın seyrettiği ifade edilmiştir. Sert karbür parmak freze çakılarının HSS freze çakılarına göre her açıdan daha avantajlı olduğu bildirilmiştir [92].

Frezeleme işlemi sırasında uygulanan farklı soğutma yöntemlerinin operasyon verimliliğine etkileri araştırılmıştır. Ti6Al4V malzemenin frezelenmesi ile gerçekleştirilen çalışmada takım aşınması için etkin aşınma mekanizmasının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma sırasında TiAlN kaplı ve kaplamasız karbür takımlar kullanılmıştır. Kesme hızı 50 m/dak olarak sabit tutulmuş, üç farklı ilerleme oranı (0,1; 0,3 ve 0,5 mm/dev) ve dört farklı kesme derinliği (0,2; 0,3; 0,4 ve 0,5 mm) değişken olarak belirlenmiştir. Farklı soğutma yöntemlerinin etkinliğini ortaya koyabilmek için kuru, geleneksel soğutma ve minimum miktarda yağlama (MQL- Minimum Quantity Lubrication) koşulları altında deneyler yapılmıştır. Tüm soğutma yöntemlerinde de en baskın aşınma mekanizmasının abrasif aşınma mekanizması olduğu bildirilmiştir. Takım kenarına talaş yapışması (BUE) kuru işleme şartlarında en baskın ikinci aşınma mekanizması olmuştur. MQL soğutma da BUE oluşumu önemli derecede azalmıştır. TiAlN kaplama kuru işleme şartlarında diğer soğutma yöntemlerine göre daha etkili olmuştur. Ti6Al4V malzemenin frezelenmesi işleminde MQL soğutma yöntemi tavsiye edilmiştir [93].

Tornalama ve frezeleme operasyonları haricinde talaşlı imalat yöntemleri arasında geniş uygulama alanı bulan bir diğer operasyon ise delik açma işlemidir. Delik açma operasyonunun kapalı bir bölgede gerçekleşmesi ve talaş tahliyesi gibi bazı temel sorunlar bu operasyonu tornalama ve frezeleme işlemlerinden daha karmaşık ve zor bir işlem haline getirmiştir [61]. Delik açma yöntemi kullanılarak Ti6Al4V malzemenin işlenebilirliği birçok çalışmaya konu olmuştur.

Titanyum alaşımı kullanılarak delme performansının incelenmesi amacıyla TiAlN kaplamalı karbür matkaplar ile kuru kesme şartları altında deneysel araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada her bir parametre için üç çeşit devir sayısı (500, 1000 ve 1500 dev/dak), ilerleme oranı (0,2; 0,3 ve 0,4 mm/dev) ve matkap çapı (3, 6 ve 9 mm) kullanılmıştır. Deney tasarımı Taguchi L27 dizinine göre yapılmıştır. Kesme kuvvetleri, takım aşınması, sıcaklık oluşumu ve talaş yapısı çalışmada incelenmiştir. Deney sonucunda yüksek devir ve düşük ilerleme oranları kullanılarak takım ömrü ve delik kalitesinin arttığı görülmüştür. İlerleme oranının kesme kuvvetleri için en etkili parametre olduğu bildirilmiştir. Delme işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar ve takım ile iş parçası arasındaki yapışma nedeniyle takımın hızlı bir şekilde aşındığı tespit edilmiştir. Takım aşınmasının ilerleme oranındaki değişimlere karşı çok hassas olduğu ilerleme oranındaki artış ile takım aşınmasının arttığı ifade edilmiştir [94].

Titanyum alüminid alaşımının derin delik açma uygulamalarında işlenebilirliği araştırılmıştır. İşlenebilirlik çıktıları olarak ilerleme kuvveti, kesme momenti, mikro sertlik ve talaş morfolojisi araştırılmıştır. Çalışma kuru kesme şartları altında 4 mm çapında TiAlN kaplı karbür matkaplar eşliğinde gerçekleştirilmiştir. Araştırma değişkenleri dörder farklı kesme hızı (18, 36, 54 ve 72 m/dak) ve ilerleme oranı (0,01; 0,02; 0,03 ve 0,04 mm/dev) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda artan ilerleme oranı ile ilerleme kuvvetleri ve kesme momentinin arttığı görülmüştür. Delik derinliği arttıkça ilerleme kuvvetleri ve kesme momentlerinde ani yükselmeler gözlenmiştir bu durum talaşın takım helis kanallarına kaynaklanmasına bağlanmıştır. Kuru kesme şartları sonucunda yüksek sürtünmeler ve takıma talaş yapışmasının yüzey bütünlüğünü olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Delik duvarlarında takım ömrünü olumsuz etkileyen mikro sertliklerin oluştuğu ifade edilmiştir. Delme işlemi boyunca talaş tahliyesinin zorlaştığı, yüksek sürtünme ve sıcaklık etkisi ile üst üste yığılmış katlanmış bir talaş oluşumu gözlemlendiği açıklanmıştır [95].

Ti6Al4V malzemenin delindiği çalışmada, kesme hızı, ilerleme oranı ve matkap çapı gibi

çeşitli kesme parametrelerinin ilerleme kuvvetleri, tork ve dairesellik (delik girişi ve çıkışında) çıktılarına etkileri araştırılmıştır. Araştırma kapsamında deneysel çalışmalar 3 boyutlu işleme modeli geliştirilerek desteklenmiştir. Operasyon modeli geliştirilmesi çalışmalarında DEFORM-3D yazılımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen ve model üzerinden türetilen veriler karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında tezgâh devri (400, 500 ve 600 dev/dak), ilerleme hızı (30, 40 ve 50 mm/dak) ve matkap çapı (5, 6 ve 7 mm) esas alınmıştır. Deneyler TiN kaplı karbür matkaplar kullanılarak yapılmıştır. Deneysel veriler regresyon analizi kullanılarak çıktı değerleri ile girdi parametreleri arasındaki ilişkiler modellenmiştir. Geliştirilen operasyon modeli deney sonuçlarını tahmin etmede oldukça başarılı performans ortaya koymuştur. Regresyon çalışmaları sonucunda elde edilen veriler deneysel veriler ile kıyaslandığında %10 gibi bir hata payı olduğu ve kabullenilebilir sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Optimum dairesellik değeri için 531 dev/dak tezgâh devri, 45 mm/dak ilerleme hızı ve 7 mm matkap çapı önerilmiştir [96].

Farklı kesme parametrelerinin ve kesme uzunluğunun delme operasyonu verimliliğine etkileri Ti6Al4V malzemenin delindiği çalışmada araştırılmıştır. Çalışma çıktıları olarak ilerleme kuvveti, kesme torku, takım aşınması ve delik kalitesi incelenmiştir. Islak çalışma koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, 6,8 mm çapında TiN/TiAlN kaplı karbür matkaplar kullanılmıştır. Deney parametreleri; sabit ilerleme oranı (0,1 mm/dev), üç farklı kesme hızı (38; 41,8 ve 45,6 m/dak) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda artan kesme uzunluğu ile ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek ilerleme kuvveti, en yüksek kesme hızı ile yapılan deneylerde görülmüştür. Bu durum takım aşınmasına bağlanmıştır. Kesme hızı ve kesme uzunluğunun artması ile delik çapındaki bozulma değerleri artmıştır. Bu durumun; takım aşınması ve takım geometrisinde yaşanan değişimlere bağlı olduğu ifade edilmiştir [97].

Ti6Al4V malzemenin delinerek delik kalitesinin incelendiği bir başka çalışmada, takımlar üzerinde farklı işlemler yapılmıştır. Islak ve kuru olmak üzere iki farklı ortamda yapılan deneylerde 5 mm çapında M42 HSS matkaplar kullanılmıştır. Matkaplar kaplamasız, TiAlN/TiN kaplı, kriyojenik işlem uygulanmış ve kriyojenik işlem ardından temperlenmiş olarak dört farklı tipte belirlenmiştir. Matkap tipleri haricinde dört farklı kesme hızı (6, 8, 10 ve 12 m/dak) ve üç farklı ilerleme oranı (0,04; 0,05 ve 0,06 mm/dev) değişken olarak belirlenmiştir. Delik kalitesini belirlemek için delik çapı, dairesellik ve silindiriklik değerleri CMM cihazında ölçülmüştür. Çalışma sonucunda soğutma operasyonunun delik kalitesini

iyileştirdiği görülmüştür. En iyi delik kalitesi sonuçlarının TiAlN/TiN kaplı takımda elde edildiği, bununla birlikte kriyojenik işlemin delik kalitesine iyileştirici katkı sağladığı bildirilmiştir [48].

Ti6Al4V malzemenin delinmesinde farklı delme yöntemlerinin takım aşınmasına etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında doğrudan dalma yöntemi, 1 mm dalma ardından 2 mm geri çıkma yöntemi ve 1 mm dalma ardından tam geri çıkma yöntemi karşılaştırılmıştır. Kuru ortam şartları altında gerçekleştirilen deneyler sırasında AlCrN kaplı karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneyler sırasında kesme hızı 20 m/dak, ilerleme oranı ise 0,01 mm/dev olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda delme yönteminin matkap aşınmasında önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Doğrudan dalma yöntemi ile yapılan deneylerde talaşın matkabın helis kanallarına dolduğu ve 11. Delikte kırıldığı görülmüştür. Bir diğer yöntem olan 1 mm dalma ardından 2 mm geri çıkma ile yapılan deneylerde 30 delik açıldığı bildirilmiştir. 3. Yöntem ile yapılan deneylerde ise 150 delik delinmesine rağmen takımda hiçbir aşınma olmadığı ifade edilmiştir. En verimli delme işlemi 1 mm dalma ve tam geri çıkma yönteminde elde edilmiştir [98].

Benzer bir başka çalışmada doğrudan delme yöntemi ve gagalamalı delme yöntemleri kıyaslanmıştır. Çalışmada 6 mm çapında kaplamasız karbür matkaplar kullanılmış ve farklı geometrik özelliklere sahip matkaplar seçilerek matkap tipi de bir başka değişken olmuştur. Araştırma çerçevesinde belirlenen değişkenlerin takım aşınması ve takım ömrüne etkileri incelenmiştir. Deneyler üç farklı kesme hızı (50, 60 ve 70 m/dak) ve sabit ilerleme oranı (0,1 mm/dev) kullanılarak, kuru kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda tüm kesme hızlarında gagalamalı delme işleminin doğrudan delme işlemine göre daha uzun takım ömrü sağladığı bildirilmiştir. Kesme hızı değerinin artması ile her iki takım tipi için de takım ömrünün azaldığı ve artan kesme süresi ile yanıl aşınma değerlerinin arttığı ifade edilmiştir. Matkap geometrisi konusunda ise B tipi matkaplar tavsiye edilmiştir [99].

Ti6Al4V malzemenin delindiği araştırmada takım aşınmasının gelişimi, delik kalitesi ve yüzey bütünlüğü çıktılarına odaklanılmıştır. Deneysel çalışmalar kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Takım aşınmasının belirlenmesinde optik mikroskop ve SEM görsellerinden faydalanılmıştır. Delik kalitesi; delik çapı değişimi ve çapak yüksekliği ile yüzey bütünlüğü ise yüzey pürüzlülüğü, metalürjik değişiklikler ve mikro sertlik ile belirlenmiştir. Çalışma kapsamında 6 mm çapında TiN kaplı matkaplar kullanılmıştır.

Operasyon sırasında kesme hızı 50 m/dak ve ilerleme oranı 0,07 mm/dev olarak sabit tutulmuştur. İki farklı işleme yöntemi kıyaslanmıştır. Birinci işleme yöntemi; her delik delindikten sonra takımın basınçlı hava ile soğutulmasını, ikinci işleme yöntemi ise takımın seri sekiz delik açtıktan sonra basınçlı hava ile soğutulmasını ifade etmektedir. İkinci yöntem ile yapılan deneylerde takım diğer yöntemle kıyasla üçte biri gibi kısa bir sürede kırılmıştır. Takım üzerinde talaş yapışması ve uzayan operasyon süreleri boyunca artan krater aşınması görülmüştür. Matkap kırıldığı için takım ömrü deneyleri tamamlanamamış ancak belirgin aşınma mekanizmaları görülmüştür. Difüzyon, termal ve mekanik yükler takımın kırılmasına neden olmuştur. Delik kalitesi matkap kırılmadan hemen önce bile yüksektir [100].

Farklı matkap boylarının delik kalitesine olan etkilerinin Ti6Al4V malzemenin delinmesi ile araştırıldığı bir başka çalışmada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında iki farklı boya sahip (117 ve 79 mm) 8 mm çapında kaplamasız HSS matkaplar kullanılmıştır. Çalışma çıktıları olarak delik tolerans değerleri incelenmiştir. Delme operasyonlarında büyük öneme sahip olan nominal delik çapları ile ortalama eş eksenlilik, diklik ve dairesellik değerleri ölçülmüştür. Kısa ve uzun matkaplar 7,5 m/dak kesme hızı; 300 dev/dak devir sayısı ve 0,05 mm/dev ilerleme oranı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Delik çapındaki hassasiyetin kısa takımda daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Diklik ve dairesellik değerlerinde ise uzun takımların daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Uzun takımın aşınma performansının kısa takıma göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir [101].

Matkap boyları üzerinde yapılan araştırmalarda olduğu gibi matkapların değişen helis açıları da araştırma konusu olmuştur. Ti6Al4V malzemenin delinmesi sırasında iki farklı helis açısının (25°, 30°), üçer farklı ilerleme hızının (10, 12 ve 14 mm/dak) ve tezgâh devrinin (600, 800, 1000 dev/dak) operasyon çıktılarına etkileri araştırılmıştır. Araştırma 10 mm çapında kaplamasız karbür matkaplar ile kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir. Çalışma çıktıları yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve matkapta meydana gelen titreşim hızları olarak belirlenmiştir. Düşük yüzey pürüzlülükleri, takım aşınmaları ve titreşim hızları için ideal çalışma koşulları bir dizi istatistiki çalışma ile ortaya konulmuştur. Yüksek helis açıları ve devir sayılarının sürtünme ve ısı oluşumunu artırarak takım aşınmalarını artırdığı açıklanmıştır. Matkapta meydana gelen aşınmaların yüzey pürüzlülüğü ve titreşim hızlarını artırdığı bildirilmiştir. Artan devir sayısı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüklerini, yine artan devir sayısı ve helis açısının matkap titreşim hızını artırdığı ifade edilmiştir. İstatistiki

alışmalar sonucunda elde edilen modeller ve deneysel bulguların rtuştuğu belirtilmiştir. Düşük ıktı değerleri için yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda ideal helis açısı 26, 16°, ilerleme hızı 10 mm/dak ve devir sayısı 600 dev/dak olarak rapor edilmiştir [102].

Kesici takımlara uygulanan kaplama işleminin takım performansına etkileri delme operasyonu kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür matkapların verimliliği Ti6Al4V malzeme üzerinde delme işlemi uygulanarak test edilmiştir. Matkap apı 6 mm olarak belirlenmiş ve deneyler %6' lık bir konsantrasyona sahip su-soğutucu akışkan karışımı eşliğinde yapılmıştır. Araştırma kapsamında yüzey pürüzlülüğu, takım aşınması ve takım ömrü incelenmiştir. Deneyler sabit ilerleme oranı (0,06 mm/dev) ve dört farklı kesme hızı (25, 35, 45 ve 55 m/dak) kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda artan kesme hızı ile takım aşınması ve takım ömrünün azaldığı, en yüksek takım ömrünün 25 m/dak kesme hızında TiAlN kaplamalı matkap kullanılarak elde edildiği ifade edilmiştir. Kaplamalı takımların, gerek yüzey pürüzlülüğu gerekse takım ömrü açısından, kaplamasız takımlardan daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. Araştırma ile kaplamasız karbür kesici takımların 25 m/dak ve üzeri hızlarda yüksek aşınma değerler nedeni ile kullanılmasının uygun olmayacağı açıklanmıştır [103].

Delik açma çalışmalarında deliğin nihai şekli ve boyutları kalıntı gerilmelerini doğrudan etkiler. Delme işlemi sırasında oluşan sıcaklık ve termomekanik yükler, i gerilmelerin oluşmasına zemin hazırlar ve bu gerilmeler delik büzülmelerinin temel sebebini oluşturur. Delik büzülmelerini oluşturan bu i radyal kuvvetlerin lölmesi için yenilikçi bir yaklaşım geliştirilerek Ti6Al4V malzemenin delinmesi ile deneysel bir çalışma ortaya konulmuştur. Deneyler sırasında 12 mm çapında, 140° uç açısına sahip takma uçlu karbür matkaplar kullanılmıştır. Çalışma, 30 m/dak sabit kesme hızı ve 0,08 mm/dev sabit ilerleme oranı eşliğinde kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında; oluşan kuvvetler, tork değerleri ve kenar boşlukları ölçölmüştür. Yapılan lümler sonucu elde edilen veriler matematiksel modeller ile ilişkilendirilerek radyal ve teğetsel kuvvetlere ilaveten delik çıkışında iş parçası ve delik kenarı arasındaki sürtünme katsayılarının belirlenmesi de sağlanmıştır [104].

Ti6Al4V malzemenin yağ buharı ile soğutularak (yağlanarak) karbür matkaplar ile delinmesi sırasında sürtünme davranışları incelenmiştir. AlCrN kaplamanın sürtünme davranışları üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma kapsamında 9 mm çapında

kaplamasız ve AlCrN kaplamalı pimler kullanılarak delme işlemi simüle edilmiş ve sürtünme davranışları belirlenmeye çalışılmıştır. Sürtünmenin kesme kenarı ve kenar boşlukları boyunca sabit olup olmadığı sorgulanmıştır. Sürtünme karakteristiğinin kenar boşlukları ve matkap yan yüzeylerinde tamamen farklı olduğu bildirilmiştir. Yan yüzeyler ve kenar boşlukları için iki farklı sürtünme modelinin türetilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Sürtünmenin temas basıncına duyarlı olduğu belirtilmiştir. Son olarak çalışma ile AlCrN kaplamanın sürtünme ve aşınma oranını artırdığı ve titanyum delme operasyonu için uygun olmadığı gösterilmiştir [105].

Delik açma uygulamalarında kesici takım- iş parçası ve kesici takım-talaş arasındaki temas ve oluşan sürtünmeler operasyon kalitesini düşürmektedir. Kesme sırasında oluşan ısının düşürülmesi, ilerleme kuvvetlerini azaltılması, yüzey pürüzlülüğü ve delik kalitesinin artırılması takım-iş parçası ve takım-talaş arasındaki sürtünmelerin azaltılması ile sağlanabilir. Bu hedef ile yapılan araştırmada matkap yüzeyine farklı mikro dokular (mikro delikli, mikro oluklu ve işlem uygulanmamış) uygulanmıştır. Farklı yüzey dokularına sahip bu matkapların kesme performansı farklı soğutma yöntemleri (MQL, geleneksel soğutma ve kuru) ile test edilmiştir. Çalışma kapsamında iş parçası olarak Ti6Al4V malzeme kullanılmıştır. Deneyler sırasında sabit kesme hızı (60 m/dak) ve ilerleme oranı (0,07 mm/dev) belirlenmiş ve 8 mm çapında kaplamasız karbür matkaplar kullanılmıştır. Delik açma deneylerinden önce farklı mikro dokuların etkileri pin-disk sürtünme deneyleri belirlenmeye çalışılmıştır. Pin-disk deneylerinde en az sürtünme katsayısını mikro çukurlu kaplamanın sergilediği görülmüştür. Matkaplar ile yapılan delik açma testlerinde ise; yüzeye uygulanan mikro dokuların ilerleme kuvvetlerini önemli ölçüde azalttığı, daha düşük yüzey kusurları oluşturduğu ve takım yüzeylerine iş parçası malzemesinin yapışma eğilimini düşürdüğü belirtilmiştir. Matkaba uygulanan mikro delikli dokuların tüm soğutma şartlarında daha etkili olduğu ve geleneksel soğutma yöntemi ile daha düşük ilerleme kuvvetleri elde edilse de, kesme sıvıları maliyeti düşünüldüğünde MQL soğutmanın daha verimli olduğu ifade edilmiştir [106].

Farklı matkap geometrileri de Ti6Al4V malzemenin delinmesi araştırmalarında kendisine yer bulmuştur. Farklı üç tip matkap geometrisi (çok noktalı, adımlı ve çift konik) ile delik açma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kuru şartlar altında, dörder farklı kesme hızı (30, 50, 70 ve 90 m/dak) ve ilerleme oranı (0,05; 0,1; 0,15 ve 0,20 mm/dev) ile gerçekleştirilmiştir. İş parçası Al2024 ve Ti6Al4V malzemeler kullanılarak bir sandviç

oluşturulmuştur. Araştırma kapsamında; kesme kuvvetleri, tork, yüzey pürüzlülüğü, çapak yüksekliği ve talaş yapısı incelenmiştir. Sonuçlara göre çift konik matkap ile delmede, diğer matkaplara kıyasla daha küçük ilerleme kuvvetleri, kırık talaş oluşumu ve daha düşük çapak yükseklikleri oluşması nedeniyle daha iyi delik kalitesi ve daha yüksek verim elde edildiği bildirilmiştir [107].

Ti6Al4V malzemenin termal özelliklerinden dolayı, işleme sırasında ortaya çıkan ısı, malzeme deformasyon bölgesinde birikir. Bu durum kesici takımlar için zararlı yüksek sıcaklıklara neden olur ve bu alaşımın işlenmesini zorlaştırır. Bu nedenle Ti6Al4V malzeme üzerinde termal analiz çalışmaları büyük yer tutmaktadır.

Sıcaklık değerlerinin tespiti için takım içine termokupl yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sıcaklık değerleri deneysel veriler ile desteklenmiştir. Deneysel çalışmalarda iki farklı kesme hızı (10 ve 30 m/dak) ve ilerleme oranı (0,1 ve 0,2 mm/dev) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada iş parçası olarak Ti6Al4V malzeme, kesici takım olarak ise 12 mm çapında, iki adet soğutma kanalına sahip ve 30 derecelik helis açısı bulunan kaplamasız karbür matkaplar seçilmiştir. Sıcaklık ölçümü için kullanılan termokupllar bu soğutma kanallarına yerleştirilmiştir. Bu çalışmada, Rotary Tool Temperature (RTT) yeni bir termokupl bazlı sıcaklık ölçüm sistemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile geliştirilen model ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilerin uyumluluk gösterdiği görülmüştür [108].

Benzer bir diğer çalışmada Ti6Al4V malzemenin kuru delinmesi sırasında oluşan sıcaklıkların analizi yapılmıştır. İşlenmiş malzemede termal etkilerin belirlenebilmesi için üç boyutlu bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında sıcaklık ölçümü termokupllar ile gerçekleştirilmiştir. Termokupllar malzeme üst yüzeyinden aşağıya doğru 3; 7,5 ve 11 mm mesafede delik kenarına ise 1 mm mesafede konumlandırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda geliştirilen sayısal modeller deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında 6 mm çapında, 140°'lik uç açısına sahip TiAlN kaplı karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneyler sırasında kesme hızı 50 m/dak ve ilerleme oranı 0,07 mm/dev olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında oluşan sıcaklıklar delik yüzeyine dik bir şekilde sıralı olarak yerleştirilen termokupllar ile ölçülmüştür. Çalışmalar sonucunda kabul edilebilir bir model ortaya konulmuştur [109, 110].

Kesme sırasında oluşan sıcaklıkların Termokupllar kullanılarak belirlendiği bir başka araştırmada deneysel bulgular ve geliştirilen sonlu elemanlar modeli ile elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında 9,92 mm çapında karbür matkaplar kullanılmıştır. Çalışmada matkapların yan yüzeylerine dört adet termokupl yerleştirilerek sıcaklıkların belirlenmesi, kullanılan dinamometre ile de kuvvet ve tork değerlerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Termokupllar kesici takıma yerleştirildiği için takım tezgâh tablasına, iş parçası (Ti6Al4V) ise iş miline bağlanmıştır. Deneyler esnasında ilerleme oranı (0,05 mm/dev) sabit tutulmuştur, kesme hızı ise üç farklı (24,4; 48,8 ve 73,2 m/dak) seviyede belirlenmiştir. Ölçülen tork ve kuvvet değerleri kullanılarak matkaplar üzerinde sürtünmeye bağlı ısı üretimi hesaplanmıştır. Artan kesme hızı ile sıcaklık değerlerinin yükseldiği bildirilmiştir. Delme işlemi sırasında yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığı, 73,2 m/dak kesme hızında sıcaklıkların 1060 °C 'ye çıktığı görülmüştür. Deneysel sonuçlar ile geliştirilen sonlu elemanlar modelinden elde edilen verilerin uyumlu olduğu ifade edilmiştir [111].

Delme işlemi sırasında oluşan sıcaklıkları belirleme konusunda farklı yöntemler de kullanılmıştır. Ti6Al4V malzemenin delinmesi operasyonunda deliğin alt yüzeyindeki sıcaklık iki adet optik fiber destekli bir kızılötesi pirometresi ile belirlenmiştir. Optik fiberlerden biri takım içindeki soğutma kanalına yerleştirilmiş, fener milinden geçirilerek ikinci optik fibere bağlanmıştır. Açılmakta olan deliğin alt yüzeyinden yayılan kızılötesi ışınlar bu optik fiberler aracılığı ile pirometreye iletilerek sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Deneyler sırasında iş parçası kalınlığı, iş parçası malzemesi ve ilerleme oranı değişkenlerinin sıcaklığa ve tork oluşumuna etkileri araştırılmıştır. Çalışmada TiN ve AlN kaplamalı, 12 mm çapında soğutma kanallarına sahip karbür matkaplar kullanılmıştır. Tezgâh devir sayısı sabit seçilmiş ve 900 dev/dak olarak belirlenmiştir. İlerleme oranı 0,1 ve 0,25 mm/dev, iş parçası kalınlığı ise 5, 10, 15, 20 ve 25 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Operasyon sırasında delme ilerledikçe sıcaklıkların arttığı bildirilmiştir. Artan ilerleme oranı ile sıcaklıkların arttığı, düşük ilerleme oranlarında dahi iş parçası altına yaklaştıkça sıcaklık birikmesine bağlı olarak sıcaklıkların hızla arttığı ifade edilmiştir [112].

Titanyum alaşımının delinmesi sırasında ultrasonik titreşim uygulanarak bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Araştırma içeriğinde farklı kesme parametrelerinin ve ultrasonik titreşim uygulamasının operasyona katkıları incelenmiştir. Çalışma kuru kesme koşullarında 4 mm çapında kaplamasız karbür matkaplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme

parametreleri dört farklı devir sayısı (700, 1000, 1500 ve 2000 dev/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (70, 150 ve 200 mm/dak) olarak belirlenmiştir. Çalışma neticesinde ilerleme kuvveti, talaş oluşumu ve matkap ucundaki sıcaklık değerleri araştırılmıştır. Sıcaklık ölçümünde kızılötesi sıcaklık kamerası kullanılmıştır. Ultrasonik titreşimin, geleneksel delme işlemine göre daha düşük ilerleme kuvvetleri ve daha yüksek matkap sıcaklıkları ortaya koyduğu belirlenmiştir. Titreşim genliği artırıldığında daha düşük kuvvetlerin ve daha yüksek sıcaklıkların oluştuğu ifade edilmiştir. Ultrasonik titreşimin talaş oluşumunu önemli ölçüde değiştirmedeği gözlemlenmiştir [113].

Geleneksel delme operasyonuna alternatif olacak şekilde titreşim destekli delme ve dairesel havuz boşaltma stratejisi ile delme yaklaşımları bir başka çalışmada konu edilmiştir. Ti6Al4V malzemenin delindiği çalışmada MQL soğutma ve kuru işleme koşulları kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda oluşan sıcaklıklar ve plastik deformasyona bağlı değişen artık gerilmeler ile delik yüzeyindeki sertlikler ölçülmüştür. Takımlarda oluşan aşınmanın operasyon verimliliğine etkileri araştırılmıştır. Geleneksel delme ve titreşimli delme işlemleri için AlCrN kaplı karbür matkaplar, dairesel havuz boşaltma ile delme işleminde ise karbür parmak freze kullanılmıştır. En yüksek sıcaklık değerlerinin kuru şartlarda gerçekleştirilen geleneksel delme operasyonlarında oluştuğu bildirilmiştir. Artan takım aşınması ile operasyon sıcaklıklarının arttığı ifade edilmiştir. Titreşim katkılı delme işleminin geleneksel delme işlemine göre daha düşük sıcaklıklar oluşturduğu açıklanmıştır. Geleneksel delme operasyonu ve kuru delme şartlarında, matkabın helis kanallarına talaş birikmesine bağlı olarak ek sürtünme katkısı ile daha fazla sıcaklık yükü görülmüştür. Bu durum deformasyon tabakalarını oluşturduğu ifade edilmiştir [114].

Ti6Al4V malzemenin delinmesinde sıcaklık oluşumu ile birlikte operasyon verimliliğini olumsuz etkileyen talaş oluşumu da incelenmiştir. Ti6Al4V gibi sünek malzemelerin delinmesinde yetersiz talaş tahliyesi operasyonun olumsuz seyretmesine yol açmaktadır. Tüm bu durumlar talaş morfolojisini odak alan çalışmaların yapılmasını gerekli kılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında talaş tahliyesini ifade eden bir talaş tahliye değişkeni tanımlanmıştır. Farklı basınçlarda hava ile soğutma (6 ve 10 bar) ve takım içinden uygulanan MQL ile soğutma (3 ve 6 bar), kuru kesme ile karşılaştırılmıştır. Araştırma kapsamında oluşan sıcaklıklar ve talaş tahliyesi kamera ile ölçülmüştür. Deneyler sırasında 4,8 mm çapında AlCrN kaplı karbür matkaplar kullanılmış ve delme işlemi titreşim ile desteklenmiştir. Çalışma sırasında 7, 14 ve 21 m/dak kesme hızları kullanılmıştır. En yüksek

sıcaklıkların kuru kesme sırasında olduğu, 6 bar basınç ile uygulanan içten MQL işlemi ile en düşük sıcaklıkların elde edildiği belirlenmiştir. En yüksek talaş tahliye değişkeni ise yine 6 bar basınç eşliğinde takım içinden uygulanan MQL soğutma ile gerçekleşmiş, 10 bar basınç ile uygulanan hava soğutma ise talaş tahliye değişkeni en yüksek olan ikinci uygulama olarak karşımıza çıkmıştır [115].

Talaş yapısı üzerine yapılan bir diğer araştırmada Ti6Al4V malzemenin delinmesi sırasında oluşan talaş yapısını ve morfolojisini tam olarak anlamak için 3D bir model geliştirilmiştir. Farklı kesme parametrelerinin talaş oluşumu üzerinde etkileri araştırılmıştır. Çalışma sırasında 3,6 mm çapında, 140°'lik uç açısına sahip, kaplamasız tungsten karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneylerde üç farklı kesme hızı (26, 40 ve 55 m/dak) ve üç farklı ilerleme oranı (0,05; 0,13 ve 0,20 mm/dev) seçilmiştir. Temiz talaş görselleri alınabilmesi ve talaş oluşumuna dışardan etkileri azaltmak için deneyler kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Talaş uzunluğunun ilerleme hızı arttıkça azaldığı ancak değişen kesme hızının büyük bir değişime neden olmadığı bildirilmiştir [116].

Ti6Al4V malzemenin üstün mekanik ve termal özellikleri malzemenin işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir [10]. Delme işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar takım aşınmasının önemli oranda artmasına neden olurken, talaş tahliyesi de delme operasyonlarında kritik öneme sahiptir. Talaşlı imalat çalışmalarında karşılaşılan birçok problemin çözümünde kesme sıvısı kullanımı ve farklı uygulama yöntemleri önemli kazanımlar sağlamaktadır. Kesme sıvılarının gelişimi talaşlı imalat tekniklerine önemli katkılar sağlamıştır. Kesme sıvıları; uygulama sırasında kesme bölgesinde oluşan ısıyı düşürürken, yağlama özellikleri ile de takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünmeleri azaltmaktadır. Bu avantajlarına ek olarak kesme sıvıları, talaşın kesme bölgesinden hızlıca uzaklaştırılmasını da sağlamaktadır [69]. Talaşın hızlı tahliyesi delik yüzey kalitesini ve deliğin boyutsal toleranslarını önemli ölçüde etkiler. Böylece kesme sıvıları takım ömrünün artmasını ve operasyon verimliliğinin yükselmesini sağlamaktadır [42]. Kesme sıvılarının kullanımı birçok delme çalışmada önemli bir yer tutmuştur.

Ti6Al4V malzemenin delinmesi sırasında MQL uygulaması takım içinden ve takım dışından olmak üzere iki farklı şekli ile uygulanmıştır. Soğutucular 3,5 barlık basınç ile tatbik edilmiştir. Çalışmada; TiAlN, CrCN, TiCN ve kaplamasız 4 farklı kesicinin sıcaklık etkisi değerlendirilmiştir. Deneyler sırasında karbür K10 kalitede 6° boşluk açısına sahip 8,5 mm

çaplı matkaplar kullanılmıştır. Sıralı üç termokupl ile operasyon sırasında oluşan sıcaklıklar ölçülmüştür. Termokupllar delik yüzeyine 0.2 mm uzaklıkta ve delik girişinden 5, 10 ve 15 mm mesafe ile konumlandırılmıştır. Takımın içinden uygulanan MQL soğutmanın, takım dışından uygulanan MQL soğutmaya kıyasla sıcaklık değerlerinde %50'lik bir azalma sağladığı görülmüştür. Kaplamasız takımla gerçekleştirilen deneylerde en yüksek sıcaklıkların olduğu kaplamalı takımlarda sıcaklık değerleri açısından önemli bir farklılık olmadığı ifade edilmiştir [117].

Yaygın kullanımları nedeniyle Ti6Al4V ve Inconel 718 malzeme için delme işlemini de kapsayan farklı imalat prosesleri ile bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Ti6Al4V malzemenin delinmesi işleminde 6,4 mm çapında kaplamalı karbür matkaplar kullanılmıştır. Delme operasyonu sırasında içten ve dıştan soğutmanın etkileri araştırılmıştır. Soğutma işlemleri sabit basınç altında gerçekleştirilmiştir. Dıştan soğutma uygulamalarında TiAlN kaplama en uygun kaplama tipi olarak belirtilmiştir. Artan kesme hızları takım ömrünü olumsuz etkilerken 50 m/dak kesme hızında 60 delik, 60 m/dak kesme hızında ise 50 delik açılmıştır. Yapılan ön deneylerde içten soğutma ile çok daha yüksek kesme hızlarına (120 m/dak) çıkılmıştır. İçten soğutma uygulamasının takım ömrünü artırdığı ve 100 delik delmeye imkân sağladığı ifade edilmiştir. İçten soğutma yönteminin dıştan soğutma yöntemine göre daha yüksek takım ömrü ortaya koyduğu bildirilmiştir [118].

Soğutma yöntemlerine yeni bir bakış açısı kazandırmayı amaçlayan çalışmalar da gerçekleştirilmektedir. Soğutucuların ısıyı uzaklaştırmak için kesme bölgesine yönlendirildiği klasik yöntemlere alternatif olarak oluşturulan akış ile soğutma sıvısının doğrudan kesme bölgesinden uzaklaştırıldığı bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistemin geliştirilmesinin amacı; kesme bölgesinde üretilen ısının, soğutucu akışkan kanalı içindeki soğuk sıvı akışından kaynaklanan soğutma etkisinin pozitif yönlerini ortaya koyabilmektir. Sıvı akış kanalı ısı iletimini üst düzeylere çıkarabilmek için bakırdan yapılmıştır. Geliştirilen soğuk sıvı akışının titanyum delme operasyonlarında etkinliğinin ortaya konulmasına yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sabit ilerleme oranı (0,051 mm/dev) ve kesme derinliğinde (6,35 mm) üç farklı kesme hızı (10, 25 ve 35 m/dak) ile gerçekleştirilmiştir. Kesici takım olarak çapı 6.35 mm kaplamasız karbür matkaplar seçilmiştir. Deneysel çalışmaların çıktısı olarak sıcaklık, tork, kuvvet, metalürjik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Soğutucu akış yardımıyla; yüzey pürüzlülüğünde, kesme kuvvetlerinde ve tork değerlerinde kuru kesmeye göre önemli iyileşmeler olduğu

belirlenmiştir. Delik girişinde %5, delik çıkışında ise %17'lere varan değerlerde mikro sertlik kuru delmeye göre azalmıştır [119].

Farklı yağlayıcılar kullanılarak soğutma operasyonunun Ti6Al4V malzemenin delinmesine etkileri çalışmalara konu olmuştur. Ti6Al4V malzemenin delinmesi sırasında takım-talaş ara yüzeyinde daha düşük kesme sıcaklığı ve daha yüksek yağlama elde etmek için sıvı yağlayıcı su buharı spreyi (WOMS) yöntemi kullanılmıştır. Su ve ester yağ katkılı WOMS bu özelliği ile yağ esaslı MQL sisteminden ayrılmaktadır. WOMS sisteminin verimliliğini ortaya koyabilmek için farklı kesme parametreleri ve kuru kesme şartları ile deneyler yapılmıştır. Deneylerde 8 mm çapında TiAlN kaplı karbür matkaplar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında takım aşınması, matkap geometrisi ve delik kalitesi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Deney sonuçları WOMS soğutma altında yüksek takım ömrü ve daha verimli bir delme işlemi sağlandığını ortaya koymuştur [120].

Soğutma uygulamasının delik açma operasyonuna katkılarının araştırıldığı bir diğer çalışmada; geleneksel soğutma sıvısı kullanılarak soğutma işlemi ile kuru kesme koşulları karşılaştırılmıştır. Çalışmada; ilerleme kuvvetleri, tork, delik çıkışı patlatma yüksekliği, yüzey kalitesi, takım aşınması ve talaş morfolojisi incelenmiştir. Deneyler 4 mm çapında TiAlN kaplı karbür matkaplarla 72 m/dak kesme hızı ve 0,01 mm/dev ilerleme oranı ile gerçekleştirilmiştir. Delme uzunluğu, matkap çapının 2,25 ve 9,36 katı olacak şekilde iki farklı orana bağlı olarak belirlenmiştir. Soğutma işleminin; ilerleme kuvvetleri ve torku azalttığı ve yüzey kalitesini arttırdığı bildirilmiştir. Her iki işleme durumunda da takım üzerinde talaş yapışması (BUE) gözlemlenmiştir. Kuru işleme şartlarında çok daha yüksek patlatma yükseklikleri ölçülmüştür. Tüm sonuçlar genel olarak incelendiğinde kuru kesme şartlarının ıslak koşullara göre yetersiz kaldığı ifade edilmiştir [121].

Titanyum alüminyum alaşımının farklı soğutma uygulamaları eşliğinde delindiği çalışmada ise; ilerleme kuvvetleri, kesme torku ve talaş oluşumu araştırılmıştır. Çalışmada delme operasyonuna kuru, geleneksel soğutma ve MQL soğutma yöntemleri eşlik etmiştir. Sabit kesme parametrelerinin (kesme hızı 72m/dak, ilerleme oranı 0,01 mm/dev) kullanıldığı çalışmada farklı en boy oranları (2,25 ve 9,36) eşliğinde delik açma işlemi uygulanmıştır. Kesici takım olarak 4 mm çapında TiAlN kaplı karbür matkaplar kullanılmıştır. MQL soğutma yöntemi 200 ml/s debi ile 6 bar basınç eşliğinde kullanılmıştır. Araştırma sonucunda tüm kesme koşullarında MQL soğutmanın kuru şartlardan daha etkili olduğu

belirtilmiştir. Düşük en boy oranlarında MQL soğutmanın geleneksel soğutma kadar etkili olduğu ancak artan en boy oranı ile geleneksel soğutmanın etkinliğinin arttığı ifade edilmiştir. Yüksek en boy oranları ile yapılacak olan çalışmalarda gagalamalı delme tekniği ile MQL soğutmanın birlikte kullanılması tavsiye edilmiştir. Delme derinliği arttıkça talaş şeklinin spiral talaştan katlanmış şerit talaşa döndüğü ve talaş yapısının derinliğe bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir [122].

Delik açma ve delik büyütme operasyonlarında geleneksel kesme sıvısı ile soğutma ve kriyojenik soğutma yöntemleri karşılaştırılmıştır. Delik açma çalışmasında 16 mm çapında takma uçlu karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneyler üçer farklı kesme hızı (40, 50 ve 60 m/dak) ve ilerleme oranı (0,02; 0,05 ve 0,08 mm/dev) ile gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri, ilerleme kuvvetleri, tork, yüzey pürüzlülüğü ve delik toleransları çıktı verileri olarak araştırılmıştır. Takım aşınması ve talaş morfolojisine kriyojenik soğutmanın etkileri incelenmiştir. Kriyojenik soğutmanın kesme bölgesi sıcaklıklarını önemli ölçüde düşürdüğü, tork ve ilerleme kuvvetlerinde olumlu etkileri olduğu, yüzey pürüzlülüklerini azalttığı bildirilmiştir. Takım aşınmasını ve takım hasarlarını azaltmada, önemli ölçüde iyileşmeler kriyojenik soğutma ile görülmüştür. Çalışma sonucunda kriyojenik soğutmanın, geleneksel kesme sıvısı ile soğutmaya göre daha iyi soğutma ve yağlama sağladığı ifade edilmiştir. Karbür raybalar ile deliklerin 16,3 mm çapına genişletildiği çalışmada da yine iki soğutma yöntemi karşılaştırılmıştır. Kesme hızları (10, 20 ve 30 m/dak) ve ilerleme oranları (0,1; 0,2 ve 0,3 mm/dev) olarak belirlenmiştir. Benzer çıktıların değerlendirildiği çalışmada ek olarak talaş kırılması ve mikro yapı da incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde kriyojenik soğutmanın sıcaklık, ilerleme kuvveti ve tork değerlerini geleneksel soğutmaya göre düşürdüğü, yüzey pürüzlülüğü ve delik kalitesini ise bir miktar düşürdüğü bildirilmiştir. Talaş kırılabilirliği ve mikro yapı her iki soğutma yönteminde de benzer sonuçlar vermiştir [123, 124]. Bu çalışmanın devamı niteliğindeki bir başka araştırmada çalışma parametrelerinin istatistiki hesaplamalar ile optimize edilmesi amaçlanmıştır. Tüm çıktı değerleri dikkate alınarak yapılan çalışmalar sonucunda türetilen modelin doğruluğu katsayısı (R^2) değeri 0,986 olarak bildirilmiştir. Kriyojenik soğutmanın takım ömrünü artırdığı ve ideal çalışma koşullarının, kriyojenik soğutma eşliğinde kesme hızı 40 m/dak ve ilerleme oranının 0,02 mm/dev olduğu bildirilmiştir [125].

Geleneksel soğutma ve kriyojenik soğutma uygulamalarının titanyum alaşımının (grade 2) delinmesi operasyonu çerçevesinde karşılaştırıldığı çalışmada PVD kaplı karbür takımlar

kullanılmıştır. Deneysel çalışma üçer farklı kesme hızı (40, 50, 60 m/dak) ve ilerleme oranı (0,02; 0,05; 0,08 mm/dev) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma çıktıları olarak kesme sıcaklıkları, ilerleme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, dairesellik, silindiriklik, diklik ve takım aşınması araştırılmıştır. Kriyojenik soğutma uygulamasında sıvı azot (LN₂) kullanılmıştır. Araştırma sonucunda kriyojenik soğutmanın işleme sırasında oluşan sıcaklıkları %59 'lara varan oranlarda düşürdüğü bildirilmiştir. Artan ilerleme oranı değerleri ile ilerleme kuvvetlerinin arttığı ifade edilmiştir. Başta yüzey pürüzlülüğü olmak üzere delik kalitesi değişkenleri (silindiriklik, dairesellik, diklik) için kriyojenik soğutmanın geleneksel soğutmaya göre düşük performans gösterdiği açıklanmıştır. Bununla birlikte takım aşınması, kesme sıcaklıkları, ilerleme kuvvetleri değişkenleri için kriyojenik soğutmanın daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle kriyojenik soğutmanın uygulandığı deneylerde takımda kayda değer bir aşınmanın görülmediği ifade edilmiştir [126].

Farklı soğutma yöntemleri (kuru, geleneksel, MQL ve kriyojenik) ve kesme parametreleri kullanılarak Ti6Al4V malzemenin mikro delme performansı test edilmiştir. Çalışma çıktısı olarak kesme kuvveti, tork, takım aşınması, çapak yüksekliği incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında 700 µm çapında kaplamasız karbür matkaplar kullanılmıştır. Kesme parametreleri beş farklı tezgâh devri (1000, 2500, 5000, 7500 ve 10000 dev/dak) ve altı farklı ilerleme hızı (5, 10, 15, 30, 50 ve 70 mm/dak) seçilmiştir. Kriyojenik soğutma ile yapılan deneylerde kuvvet ve tork değerlerinin yüksek olduğu, geleneksel soğutma yönteminde en düşük yüzey pürüzlülüklerinin elde edildiği, farklı soğutma yöntemlerinin çapak yüksekliğine doğrudan bir katkısı olmadığı ancak kriyojenik soğutmada en düşük çapak yüksekliklerinin elde edildiği görülmüştür. Artan ilerleme hızları ve azalan devir sayıları çapak yüksekliğini artırmıştır. En yüksek tork oluşumu kuru işleme şartlarında elde edilmiştir [127].

Farklı soğutma yöntemlerinin incelendiği çalışmalara ek olarak soğutucu akışkan basıncının operasyona etkilerinin araştırıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Ti6Al4V malzemenin delinmesinde; soğutma sıvısı basıncı ve nozul çapı değiştirilerek soğutma işlemi verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, takma uçlu ve TiAlN kaplı karbür takımlar kullanılmıştır. Süreçte sıcaklık oluşumu ölçülmüş ve sonuçta da aşınma değerleri ve talaş formu incelenmiştir. Sıcaklık ölçümü takım içine yerleştirilmiş termokupllar ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler sabit kesme hızı (80 m/dak) ve ilerleme oranı (0,15 mm/dev) eşliğinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma değişkenleri ise dıştan soğutma

sırasında uygulanan 10 ve 70 bar basınç arasında değişen soğutucu basıncı ve beş farklı nozul (1,0; 1,4; 1,7; 2,0 ve 2,5 mm) çapıdır. Artan basınç değerleri ve nozul çapı ile aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek basınçların enerji sarfiyatını artırdığı göz önüne alındığında, 45 bar, soğutma için ideal basınç değeri olarak bildirilmiştir [128].

Yüksek basınç eşliğinde gerçekleştirilen soğutma işleminin operasyon verimine katkılarının araştırıldığı çalışmada delik açma yöntemine ek olarak parmak freze ve takma uçlu takımlar ile gerçekleştirilen frezeleme yöntemleri de dâhil edilmiştir. Böylece farklı talaşlı imalat uygulamalarında yüksek basınçlı soğutmanın operasyon verimine katkısı araştırılmıştır. Çalışmada 10 mm çapında kaplamasız karbür matkap ve parmak freze ve 20 mm çapında takma uçlu kesici takımlar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında takım aşınmaları, kesme kuvvetleri ve talaş oluşumu incelenmiştir. Çalışmada geleneksel soğutma ve yüksek basınçlı soğutma (70 bar) işlemleri karşılaştırılmıştır yüksek basınçlı soğutma işlemi takım içinden uygulanmıştır. Delik açma operasyonu geleneksel soğutma uygulamaları sırasında gagalamalı delme yöntemi (5 mm delme, 3 mm geri çıkma) uygulanarak 42,5 m/dak kesme hızı ve 0,17 mm/dev ilerleme oranı ile operasyon süresi 6:18 s olarak belirlenmiştir. Yüksek basınç kullanılarak gerçekleştirilen delik açma operasyonunda ise tek seferde delme yöntemi tercih edilmiş, kesme hızı %20 artırılarak 51 m/dak ve 0,17 mm/dev ilerleme oranı ile operasyon süresi 3:36 s olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışma sonucunda artan kesme hızı ve tek seferde delme uygulamasına rağmen yüksek basınçlı delik açma işleminde aşınmaların artmadığı bildirilmiştir. Yüksek basınçlı soğutma takım ömründe %43 lük bir artış sağlamıştır. Yapılan mali analizlere göre yüksek basınçlı soğutmanın üretim maliyetlerini % 15 - 64 oranında azaltma potansiyeline sahip olduğu bildirilmiştir [129].

Yapılan literatür araştırmaları göstermektedir ki; Ti6Al4V malzemenin delinmesi çalışmalarında sıcaklık analizi, soğutma yöntemlerinin etkisi ve karşılaştırılması, farklı soğutma yöntemlerinin geliştirilmesi, matkap geometrisi gibi farklı değişkenlerin etkileri çalışılmıştır. Bu araştırmalar çerçevesinde kuvvet, tork, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, sıcaklık oluşumu ve çapak yüksekliği gibi birçok çıktı değeri incelenmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarında;

- Matkapla klasik delik açma operasyonlarında soğutma yöntemlerinin tamamının kıyaslanmadığı, yapılan çalışmalarda sadece birkaç yöntemin birlikte kullanıldığı

görülmüştür. Soğutma yöntemlerinin kapsamlı olarak incelendiği çalışmada ise klasik delme operasyonu yerine mikro delme operasyonunun kullanıldığı ve içten soğutma yönteminin göz ardı edildiği fark edilmiştir.

- Soğutucu basıncının operasyona etkilerinin incelendiği çalışmaların da birkaç soğutma yöntemi ile sınırlı olduğu görülmüştür. Soğutucu basıncının talaş oluşumuna ve sıcaklıklara etkileri incelenmiş ve çıktı değerlerinin kısıtlı seçildiği belirlenmiştir.
- Çalışmalar kapsamında çıktı değerleri sıcaklık, kuvvet, tork, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş yapısı ile sınırlı kalmıştır. Delik kalitesi için önemli çıktı verilerinden olan ve geometrik toleransları belirleyen delik çapındaki değişim ve dairesellik değerleri çalışmalarda gereken önemi görememiştir.

Yapılacak olan çalışma ile literatürde eksikliği tespit edilen yukarıda sayılan konuların araştırılması ve literatüre kazandırılması hedeflenmektedir. Bu katkılara ek olarak istatistiksel analizler yardımı ile delme operasyonu için ideal soğutma yöntemi ve soğutucu basıncı belirlenecektir. Çalışma kapsamında incelenen malzeme ve kesici takım için en uygun kesme şartları ve çıktı değerleri için en etkili kesme parametreleri belirlenecektir. Bu Araştırma çıktıları ile endüstri çalışmaları için önemli kazanımlar ortaya konulacaktır. Kesme işlemleri sırasında önemli maliyet kalemlerinden olan güç tüketimi ve takım aşınması için uygun koşulların belirlenmesi, maliyetler açısından değerli bir kazanım olacaktır. Çalışmamız; ideal soğutma yönteminin belirlenmesiyle, tezgâh üzerinde bulunan soğutma sistemlerinin ve özelliklerinin değerlendirilmesi için yol gösterici olacaktır. Operasyon için en uygun soğutucu basıncının belirlenmesi tezgâh üreticileri için önemli bir ön bilgi olacak, tezgâhların soğutucu sistemleri üzerinde ARGE çalışmalarının önünü açacaktır.

8. MALZEME VE METOT

Bu tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımına uygulanan matkapla delme operasyonlarından yüksek verim elde edilebilmesi için ideal çalışma parametrelerinin ve en uygun soğutma yönteminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda karbür matkaplar ile bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Farklı kesme parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ilerleme kuvvetleri, kesme momenti, sıcaklık değerleri, takım ömrü ve delik kalitesi için önemli kriterler olan; yüzey pürüzlülüğü, dairesellik, delik çap ölçüsü ve silindiriklik değerleri incelenmiştir. Tüm bu çıktılar istatistiki çalışmalar ile değerlendirilerek delme operasyonları için ideal çalışma koşulları ve değişkenlerin çıktılar üzerindeki etkilerinin belirlenmiştir.

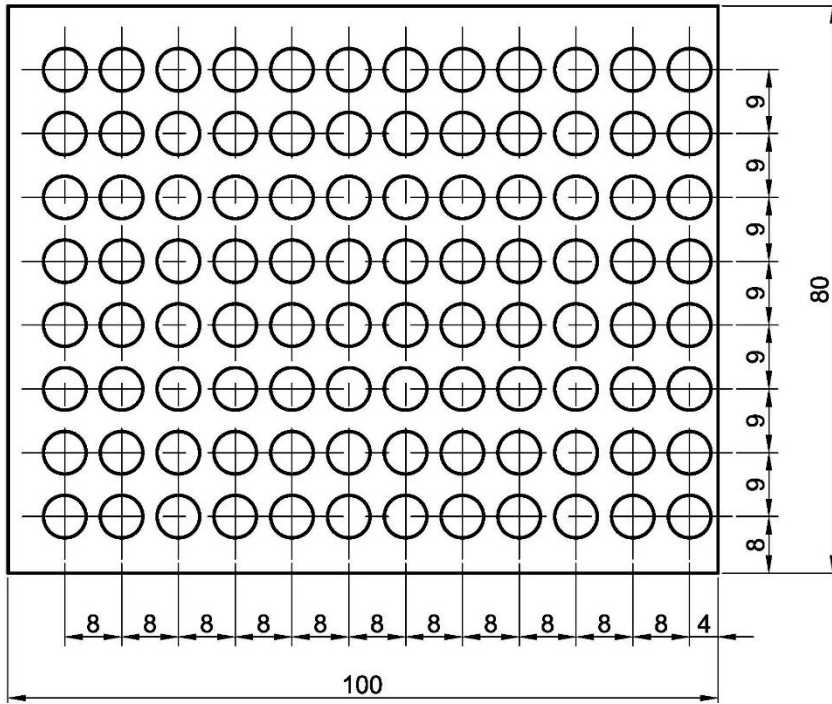
Delme operasyonlarında farklı soğutma yöntemleri ve bu soğutma yöntemlerinin operasyon verimliliğine etkileri de çalışma kapsamında araştırılmıştır. Sabit kesme parametreleri kullanılarak geleneksel soğutma, hava ile soğutma, minimum miktarda yağlama (MQL) ile soğutma, vortex tüp ile soğutma ve kriyojenik soğutma yöntemleri kıyaslanmıştır. Tezgâh donanımlarına yapılan eklentiler sayesinde takım içinden değişen basınçlar ile soğutma uygulaması mümkün olmuştur. Bu çerçevede geleneksel soğutma ve hava ile soğutma yöntemleri takım içinden uygulanarak farklı soğutma uygulamalarının etkinliği araştırılmıştır. Takım içinden yapılan geleneksel soğutma işleminde farklı soğutucu basınçları kullanılarak soğutucu basınçlarının operasyona katkıları incelenmiştir.

Tüm bu çalışmalar neticesinde Ti6Al4V malzeme için ideal delme parametreleri, soğutma yöntemi ve soğutucu basıncı değeri elde edilmiştir. Elde edilen veriler ile Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi kullanılarak delik delme işlemi modellenmiştir.

Bu bölümde; gerçekleştirilen deneyler sırasında, kullanılan malzeme, kesici takımlar, takım tezgâhı, ölçüm cihazları ve bu cihazların işleyişi hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmanın şekillenmesinde tercih edilen soğutma yöntemleri, operasyon değişkenleri ve çalışma stratejisi açıklanmıştır. YSA modellerinin türetilmesi sırasında benimsenen yönteme dair bilgiler verilmiştir.

8.1. Malzeme

Yapılan deneylerde iş parçası malzemesi uzay ve havacılık endüstrisinin yaygın olarak kullandığı Ti6Al4V alaşımı seçilmiştir. Deney numuneleri boyutları 80 x 100 mm, kalınlığı ise 15 mm olarak belirlenmiştir. Numune boyutlarının belirlenmesinde kuvvet ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi için tasarlanmış bağlama kalıbı dikkate alınmıştır. [130]. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 8.1.'de verilmiştir. Deneyler sırasında oluşturulan deliklerin numune üzerindeki yerleşim planı Şekil 8.1.'de sunulmuştur. Deney malzemeleri Marmara Titanyum Ltd. Şti. firmasından proje desteği ile satın alınmıştır. Numuneler üzerindeki delikler malzeme/takım maliyeti ve işleme optimizasyonu dikkate alınarak 6 mm çapında delinmiştir.



Şekil 8.1. Deney numunelerinde kullanılan delik yerleşim planı

Çizelge 8.1. İş parçasının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)							
Al	V	Fe	O	N	H	C	Ti
5,5 – 6,8	3,5 – 4,5	0,3	0,2	0,05	0,015	0,08	Denge Miktarı
Mekanik Özellikler							
Akma Dayanımı		Çekme Dayanımı		Sertliği (HRC)		Uzama (%)	
900 -950 MPa		880 - 920 MPa		36		10	

8.2. Takım Tezgâhı

Çalışma kapsamındaki deneyler, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan 5 eksen HAAS VF-2SS CNC tezgâhında gerçekleştirilmiştir. CNC tezgâhına ait teknik özellikler Çizelge 8.2. de verilmiştir.

Çizelge 8.2. CNC tezgâha ait teknik özellikler

X,Y ve Z Eksenleri	762, 406, 508 mm
Tezgâh Gücü	22,4 kW
En Yüksek Devir	12.000 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 l (Litre)

Tezgâh hem içten hem de dıştan soğutma sistemlerine sahiptir. Tezgâhın dıştan soğutma pompası 3 bar basınç sağlarken, içten soğutma pompası ise 60 bar yüksek basınç değerlerine ulaşabilmektedir. Yapılan çalışmada basınç değişiminin operasyona katkısının araştırılması için içten soğutma pompası çıkışına ek bir sistem tasarlanmış ve eklenmiştir.

8.3. Tezgâh Soğutma Sistemi

Soğutma uygulamaları talaşlı imalat operasyonlarından daha fazla verim alınmasını sağlamaktadır. Soğutma uygulamaları farklı soğutma yöntemleri ve soğutucu akışkanların kullanılması ile çeşitlenmiştir. Tezgâhlar da bu çeşitliliğe uygun olarak farklı soğutma yöntemlerini gerçekleştirebilecek şekilde donatılmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan CNC tezgâhı geleneksel soğutma yöntemini hem takım içinden hem de takım dışından, kuru hava ile soğutma yöntemini ise takım dışından uygulayabilecek donanımına sahiptir. Takım içinden geleneksel soğutma işleminde yüksek basınçlara çıkabilecek bir soğutma pompası tezgâhta mevcuttur. Soğutma uygulamalarını çeşitlendirmek ve değişen soğutucu basıncın etkinliğini gözlemleyebilmek için geliştirilen yeni bir soğutma sistemi tezgâh üzerine eklenmiştir.

Bu işlemler kapsamında öncelikli olarak tezgâha takım içinden kuru hava ile soğutma uygulamasının kazandırılması hedeflenmiştir. İçten soğutma uygulamasını çeşitlendirmek ve hava ile gerçekleştirilecek içten soğutmanın katkılarını ortaya koyabilmek için içten soğutma hattı hava kaynağına (kompresör çıkışına) bağlanarak içten soğutmalı hava sistemi tezgâha eklenmiştir. Basıncı hava kaynağı olarak Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan Tamsan firmasının TVK 3100 model yüksek basınç kompresörü kullanılmıştır. Kompresör 10 bar basınca kadar hava sıkıştırabilmekte ve soğutma sırasında basınç değeri ayarlanabilmektedir. Sistem basıncı kontrolü için Vema Pnömatik firmasından proje dışı satın alınan basınç ayar valfi kullanılmıştır. Hava ile yapılan içten soğutma sırasında içten soğutma pompası bir hidrolik hortum ile baypas edilmiştir. Oluşturulan basınç ayar sistemi ve içten hava soğutma sistemi Resim 8.1.'de sunulmuştur



Resim 8.1. Takım içinden hava ile soğutma sistemi

Takım içinden gerçekleştirilen geleneksel soğutma yönteminin farklı basınçlarda gerçekleştirilmesi ve böylelikle soğutucu basıncının operasyona katkılarının belirlenmesi için bir basınç ayar sistemi kurulmuştur. Tezgâhın içten soğutma pompası çıkışına hidrolik basınç ayar valfi yerleştirilmiştir. Basınç ayar valfinin tahliye hortumu tezgâh tankına yönlendirilerek fazla sıvının tezgâha geri dönmesi sağlanmıştır. Hidrolik basınç ayar valfi çıkışına eklenen manometre aracılığı ile soğutucu akışkan basıncı ölçülmüştür. Böylece akışkanın farklı basınçlarda kesme bölgesine uygulanması sağlanmıştır. Geliştirilen içten soğutma sisteminin görseli Resim 8.2.'de sunulmuştur.



Resim 8.2. Çalışma kapsamında geliştirilen takım içinden soğutma basınç ayar sistemi

8.4. Kesici Takım ve Takım Tutucu

Delik açma deneylerinin gerçekleştirilmesinde 6 mm çapında, TiN kaplı karbür matkaplar kullanılmıştır. Matkaplar iki adet içten soğutma kanalına sahiptir. Matkaplar m7 (6,004-6,016 mm) boyut toleransına sahip karbür çubuklardan bilenmiştir. Kullanılan matkaplara ait teknik özellikler ve kaplama özellikleri Çizelge 8.3.' de verilmiştir. Matkaplar TRS San. Tic. Ltd. Şti. firmasından proje kapsamında satın alınarak temin edilmiştir. Her bir deney için bir adet matkap kullanılmıştır. İş parçası boydan boya delinerek kesme boyu 15 mm olarak belirlenmiştir. Bütün deneylerde takım tutucu olarak Schunk Tendo- EC BT40 standart hidrolik takım tutucu kullanılmıştır. Hidrolik takım tutucular bağlama kuvveti oluşturmak için hidrolik sıvı basıncını kullanırlar. Mekanik sistem ile tahrik edilen hidrolik piston yardımıyla hidrolik sıvı, takımın yerleştirildiği bölüme pompalanır. Takım sapının tamamına her yönden sabit ve yüksek basınç uygulanır. Böylece hidrolik tutucular, takım üzerinde sistemin ürettiği sıkıştırma kuvvetleriyle yüksek rijitlik ve düşük salgı özelliği sunarlar. Farklı matkaplar bağlanılarak yapılan ölçümler sonucunda takımlarda görülen salgının 2 ile 4 μm (0,002 – 0,004 mm) arasında olduğu görülmüştür. Hidrolik tutucular takım içinden yapılan soğutma uygulamalarında da yüksek sızdırmazlık performansı sergileyerek soğutma sıvısının takım içinden etkili bir şekilde uygulanmasını sağlamıştır. Çalışma sürecinde takımlarda meydana gelen değişimler (aşınma, yapışma, vb.) Dino-Lite firmasının AM3113T model kamerası ile ölçülmüştür.

Çizelge 8.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kesici takımların özellikleri

Matkap Özellikleri	
Takım Malzemesi	Karbür
Soğutma Kanalı	2
Çapı	6 mm
Uç Açısı	140 °
Helis Boyu	30 mm
Toplam Boyu	64 mm
Kaplama Özellikleri	
Türü	TiN
Teknolojisi	PVD
Sertliği	2300 HV
Sürtünme Katsayısı	0,6
Kalınlığı	3 µm
Oksidasyon Sıcaklığı	550 °C
Rengi	Altın Sarısı

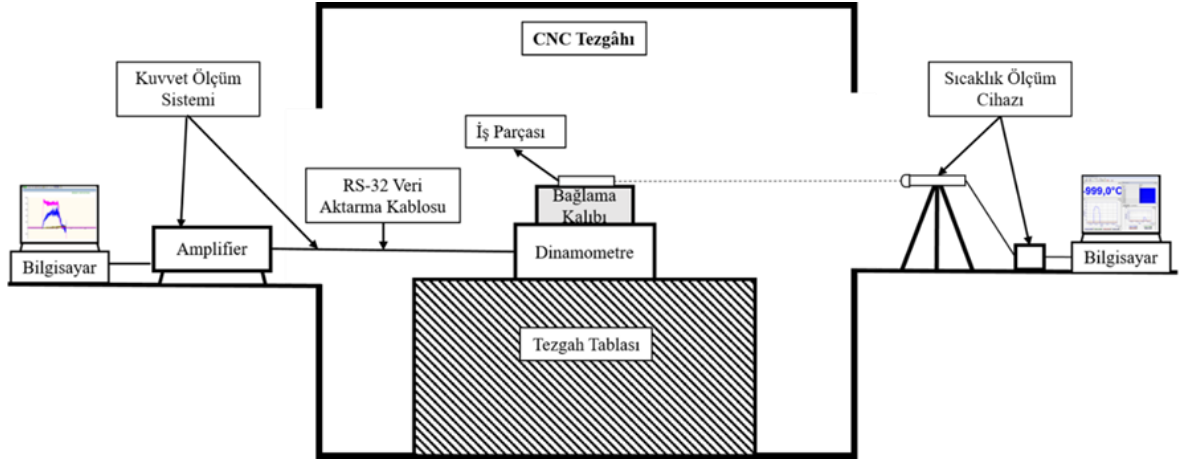
8.5. Deney Tasarımı

Deneysel çalışmalar ışığında farklı kesme hızı (20, 30, 45 ve 60 m/dak) ve farklı ilerleme oranları (0,05; 0,073; 0,1 ve 0,15 mm/dev) kullanılarak tam faktöriyel bir deney tasarımı yapılmıştır. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde literatür çalışmaları ve kesici takım katalog verileri yol gösterici olmuştur. Söz konusu deneyler ile Ti6Al4V malzemenin delinmesinde ideal kesme şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Deney parametreleri ve tezgâh girdi değerleri olan devir sayısı ve ilerleme hızı Çizelge 8.4.' de sunulmuştur. Deneysel çalışmalara başlamadan önce parametrelerin ve deney düzeneğinin operasyon için uygunluğu pilot deneyler yapılarak test edilmiştir. Pilot deneyler kapsamında 42 ve 61 m/dak kesme hızları ve 0,05; 0,07; 0,1 ve 0,15 mm/dev ilerleme oranları kullanılarak 8 deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ek olarak 20 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme oranı eşliğinde takım performansının test edildiği bir pilot deney daha yapılmıştır. Deneyler sırasında ve sonrasında çalışma çıktıları ölçülmüş ve elde edilen çıktı verileri değerlendirilmiştir. Pilot deneyler sonucunda kesme parametrelerinin deneyler için uygunluğu ve deney düzeneği sonucunda ölçümlerin doğruluk ile yapılabildiği görülmüştür.

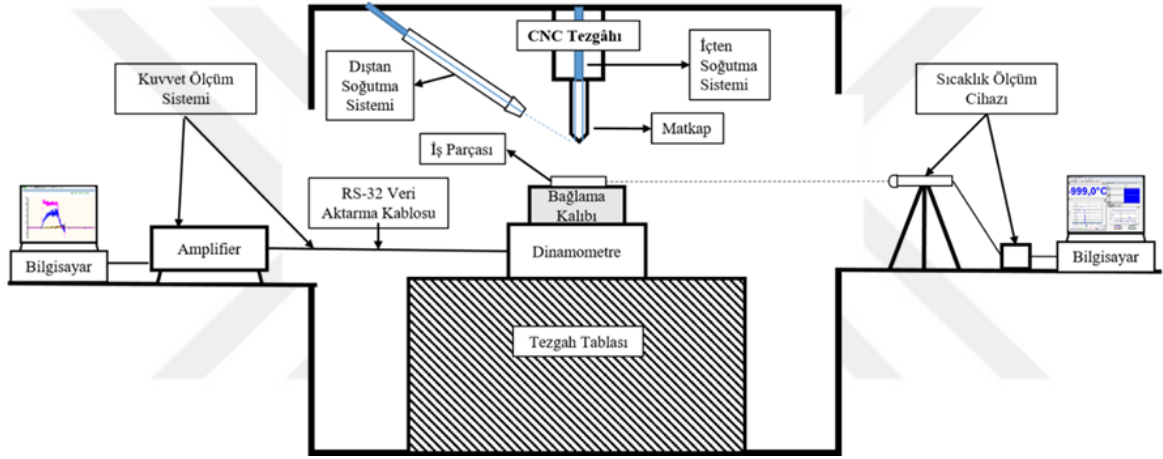
Çizelge 8.4. Deney parametreleri

Deney No	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme Oranı (mm/dev)	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)
1	20	0,05	1061	53
2		0,073		78
3		0,1		106
4		0,15		159
5	30	0,05	1592	80
6		0,073		116
7		0,1		159
8		0,15		239
9	45	0,05	2389	120
10		0,073		174
11		0,1		239
12		0,15		358
13	60	0,05	3185	159
14		0,073		233
15		0,1		319
16		0,15		478

Deney düzeneğinde tezgâhın döner tablasına kuvvet ölçüm seti (dinamometre ve bağlama kalıbı) bağlanmıştır. Parça üzerinden iş parçası referans noktası belirlenmiştir. Matkaplar takım tutucuya hep aynı yükseklikten (40 mm) bağlanmıştır. Böylece değişen takımlar için takım iş parçası sıfırının sabit kalması sağlanmıştır. Takım ömrü ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için ilk etapta aynı matkap ve aynı kesme parametreleri ile 12 delik açılması planlanmıştır. Deney numunesinin kenarına bir mm mesafe kalacak şekilde ilk delikler delinmiş ardından arkaya doğru 12 delik açılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Tezgâh yan kapıları açılarak iş parçası yan yüzeyinden birinci deliklerin açılması sırasında sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Diğer tezgâh yan kapısından ise dinamometrenin veri aktarım kablosu çıkarılarak amplifiere bağlanmış ve kuvvet ölçümünün sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Kuru ve soğutma sistemlerinin kullanıldığı deney düzeneği Şekil 8.4. ve Şekil 8.5.'de şematize edilmiştir.



Şekil 8.2. Kuru deneyler için hazırlanan deney düzeneği

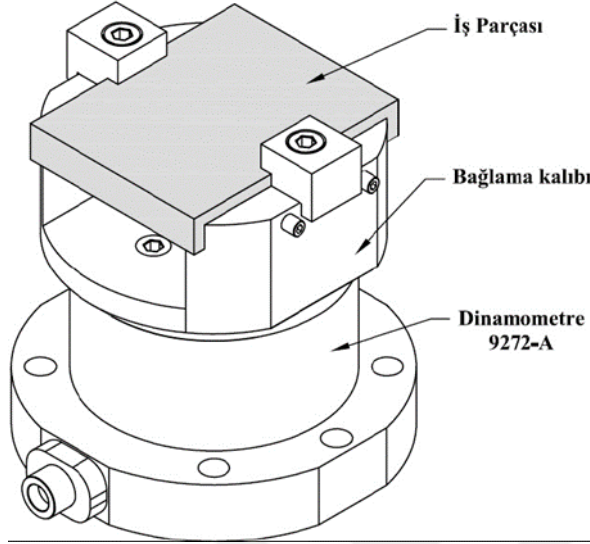


Şekil 8.3. Soğutma sistemleri eşliğinde yapılacak deneyler için kurulan deney düzeneği

8.6. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Talaşlı imalat uygulamalarında en önemli maliyet kalemlerinden biri kullanılan enerji maliyetleridir. Enerji tüketiminin belirlenmesinde en önemli gösterge ise kesme kuvvetlerinin büyüklüğüdür. Düşük kesme kuvvetleri enerji tüketimi açısından istenilen bir durumdur. Deneyler sırasında oluşan kesme kuvvetleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarları envanterinde bulunan KISTLER 9272 A tipi dört bileşenli piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre üç kesme kuvveti bileşenini (F_x , F_y ve F_z) ve kesme momentini (M_z) ölçme kapasitesine sahiptir. Boydan boya delik açma operasyonlarında deney numunesi dinamometre üzerine doğrudan bağlanamamasından dolayı numuneler dinamometre ölçülerine uygun olarak tasarlanmış bağlama kalıbına bağlanmıştır. Bağlama kalıbı ölçülerine göre boyutlandırılmış deney numuneleri hem yan yüzeylerinden hem de pabuçlar aracılığı ile üst yüzeylerinden bağlama

kalıbına sabitlenmiştir. Dinamometre ve bağlama kalıbının bağlanması ile oluşturulan kuvvet ölçüm setinin görseli Şekil 8.6. da sunulmuştur.



Şekil 8.4. Kuvvet ölçüm seti şeması

Deneyler esnasında dinamometre tarafından ölçülen sinyaller RS-32 veri aktarma kablosu ile amplifiere aktarılmıştır. Sinyallerin veri okuma kartına iletilmesinde KISTLER 5070-A tipi çok kanallı amplifier kullanılmıştır. Verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilebilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı kullanılmıştır.

8.7. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Talaşlı imalat uygulamalarında yüzey pürüzlülüğü iş parçasının tribolojik özelliklerini, yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle eş çalışan parçaların yüzey kaliteleri sistemin ömrü ve kalitesi için büyük önem taşımaktadır. Tüm bunlar delik yüzeylerinin istenilen pürüzlülük değerlerinde üretilmesini önemli kılmaktadır. Yüzey pürüzlülük değerleri delik kalitesinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Delik açma işlemlerinde arzu edilen pürüzlülük değerlerinin elde edilebilmesi için delik açma işlemi ardından raybalama operasyonu gibi ikincil işlemler kullanılmaktadır. İkincil işlemler ek maliyetlere ve operasyon sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle doğru kesme parametreleri ve doğru kesici takımın kullanılması ile istenilen yüzey pürüzlüklerinin tek seferde elde edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen deliklerin yüzey pürüzlülükleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan MİTUTOYO SJ-410 marka/model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri Çizelge 8.5.'de verilmiştir. Her bir delikten toplam dört ölçüm alınmış ve ölçümlerin ortalama değerleri üzerinden yüzey pürüzlülükleri değerlendirilmiştir. Numuneler bir mengene aracılığı ile sabitlenerek ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçüm ardından numune 90° döndürülerek delik yüzeyinin tamamının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Yüzey pürüzlülüklerinin değerlendirilmesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) esas alınmıştır. Yapılan ölçümlerde örneklem uzunluğu (λ) 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu (L) ise 4 mm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 8.5. Yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri

Model	SJ-410
Tarama hızı	0,05-1 mm/s
Tarama kuvveti	0,75 mN
İğne uç yarıçapı	2 μ m
Ölçüm aralıkları	800-2400 μ m
Profil çözünürlüğü	25 mm
Filtre	Gaussian
Örnekleme uzunluğu (λ)	0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8; 25 (mm)
Ölçme uzunluğu (L)	25 (mm)
Ölçülebilen parametreler	Ra, Rq, Rz, Ry, Rp, Rv, Rt, R3z, Rsk, Rku, Rc, RPc, RSm, Rmax*1, Rz1max*2, S, HSC, RzJIS*3, Rppi, Ra, Rq, Rlr, Rmr, Rmr(c)

8.8. Şekil ve Konum Toleranslarının Ölçülmesi

Delik kalitesinin belirlenmesinde yüzey pürüzlülüğü kadar büyük öneme sahip diğer bir unsur da şekil ve konum toleranslarıdır. Deliklerin istenilen geometrik kalitede üretilmesi hassas parçaların yüksek verim ile çalışmasında büyük önem taşımaktadır. Özellikle uzay ve havacılık alanı gibi düşük tolerans değerlerinin gerekli olduğu hassas parçaların kullanıldığı sektörlerde üretilen deliklerin düşük tolerans aralığında ve yüksek verim ile oluşturulması beklenmektedir. Yüksek kaliteli deliklerin tek bir seferde elde edilmesi operasyon verimi açısından büyük önem taşımaktadır. Delikler için büyük önem taşıyan birçok şekil ve konum toleransı olmakla birlikte delik çapı, dairesellik ve silindiriklik toleransları büyük önem taşımaktadır. Delik çapı değerleri geçme toleransları açısından önem kazanırken silindiriklik ve dairesellik eşli çalışan parçalar için büyük önem taşımaktadır.

Çalışma kapsamında deliklerin şekil ve konum toleransları; delik çap ölçüleri, dairesellik ve silindiriklik değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Tolerans değerlerinin ölçülmesi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Hexagon marka Global Performance (07.10.07) model CMM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

8.9. Sıcaklık Değerlerinin Ölçülmesi

Talaşlı imalat uygulamalarında kesme işlemi sırasında harcanan enerjinin önemli bir kısmı ısıya dönüşmektedir. Kesme işlemi sırasında açığa çıkan ısıнын kaynağı plastik deformasyon ile birlikte takım-iş parçası ve takım-talaş arasında oluşan sürtünmelerdir. Kesme sırasında açığa çıkan yüksek ısı operasyon sırasında yüksek sıcaklık değerlerine çıkılmasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıklar birçok takım aşınması mekanizmasının temelini oluşturmakta ya da aşınma mekanizmalarının etkisini artıran bir katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklar iş parçası üzerinde kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar talaş tahliyesi için de büyük önem taşımaktadır. Talaş kaldırma operasyonlarında oluşan sıcaklığın %80'i talaş ile kesme bölgesinden uzaklaştırılmaktadır. Bu durum talaş tahliyesini ve talaş tahliyesi sırasında değişen sıcaklıkları önemli kılmaktadır. Delik açma işlemlerinin kapalı bir bölgede gerçekleşmesi oluşan sıcaklıkların etkinliğinin daha da artmasına neden olmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda sıcaklıkların ölçülmesi temassız bir şekilde sağlanmıştır. İş parçası yan yüzeyine odaklanan lazer süzmesi ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. İş parçası yan yüzeyi ile delik duvarı arasında bir milimetre mesafe bulunmaktadır. Mesafeli sıcaklık ölçümü RAYTEK MI3 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümü sırasında iş parçası termal özellikleri ve yüzey kalitesine bağlı olarak değişen emesivity değeri 0,4 olarak alınmıştır [131, 132].

8.10. Deneylerde Kullanılan Soğutma Yöntemleri

Bu çalışmanın hedeflerinden biri de farklı soğutma yöntemlerinin talaşlı imalata katkılarının araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda farklı soğutma yöntemleri sabit kesme şartlarında uygulanmış ve gerekli ölçümler operasyon sırasında ve sonrasında yapılarak soğutma uygulamalarının operasyon verimliliğine katkıları incelenmiştir. Kuru deneyler sonrasında elde edilen veriler ışığında takım ömrü performansı da dikkate alınarak kesme hızı 45 m/dak

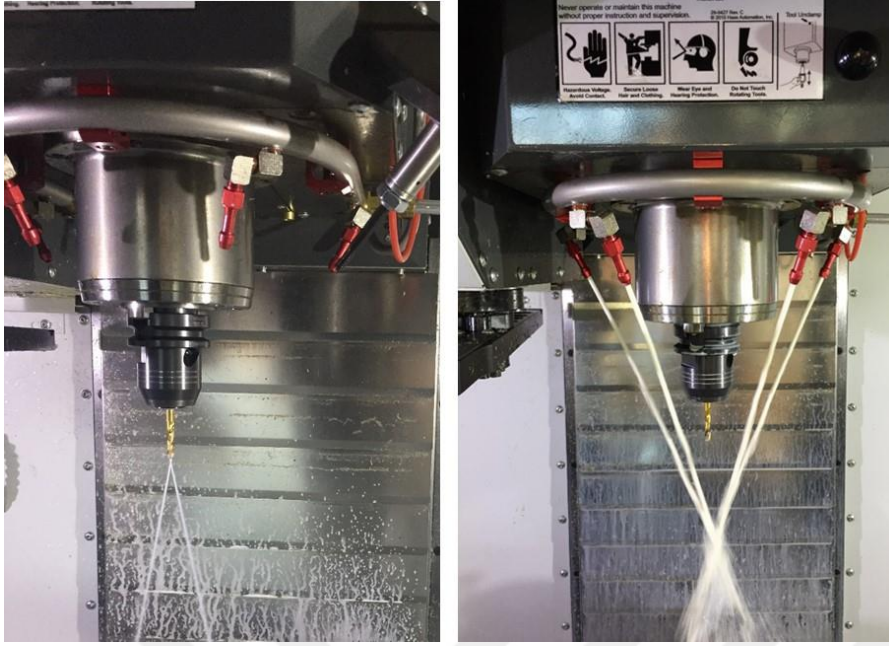
ve ilerleme oranı 0,1 mm/dev olacak şekilde sabit kesme parametreleri kullanılarak farklı soğutma yöntemleri incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında geleneksel soğutma, kuru hava ile soğutma, vortex soğutma, MQL soğutma ve Kriyojenik soğutma yöntemleri kullanılmıştır. Geleneksel soğutma ve kuru hava ile soğutma yöntemleri takım içinden ve takım dışından uygulanmıştır. Tüm takım dışı soğutma uygulamalarında soğutma sistemi nozulu matkap ucuna 50 mm mesafede konumlandırılmıştır.

8.10.1. Geleneksel soğutmanın uygulanması

Çalışma kapsamında kullanılan geleneksel soğutma uygulamasında emülsiyon kesme sıvıları tercih edilmiştir. Emülsiyon kesme sıvıları petrol bazlı mineral yağların su ile belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir. Kesme operasyonuna önemli katkılarından dolayı bu kesme sıvıları endüstride de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu soğutma yöntemi kesme bölgesine yüksek basınçlar eşliğinde uygulanabildiği gibi takım içinden ve takım dışından olmak üzere farklı uygulama tekniklerine de olanak sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan geleneksel soğutma işleminde Ti alaşımları için tavsiye edilen ve bu hususta sertifikalı bir soğutma yağı olan HOCUT 4260 kullanılmıştır. Söz konusu soğutma yağı Türekim Firmasından temin edilmiştir. Emülsiyon kesme sıvısı elde edilirken su – yağ karışım oranı %10 olarak belirlenmiştir. Bu oran HOCUT 4260 için üretici firma tarafından Titanyum alaşımları için tavsiye edilmiştir. Tezgâh soğutma tankında 160 L kesme sıvısı bu oran ile karıştırılmıştır. Karışım oranı refraktörmetre ile kontrol edilmiştir.

Geleneksel soğutma uygulaması bu çalışmada hem takım içinden hem de takım dışından uygulanmıştır. Her iki soğutma metodunda da aynı kesme sıvısı kullanılmıştır. Tezgâh üzerinde her iki soğutma yöntemi içinde ayrı ayrı kullanılacak soğutma sistemi ve soğutma pompaları mevcuttur. Takım dışından yapılan soğutma işleminde tezgâh soğutma pompası 3 bar 'lık basınçla soğutma işlemini gerçekleştirmektedir. Takım içinden yapılan soğutma işlemi için ise soğutma pompası kapasitesi max. 60 bar 'dır. Takım içinden yapılan soğutma işleminde tezgâhın takım içinden soğutma sistemi üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda farklı basınçların kullanılmasına olanak sağlanmıştır. Bu çalışmalar neticesinde takım içinden yapılan soğutma 10, 20, 40 ve 60 bar olarak uygulanmıştır. Böylece değişen soğutucu basıncının kesme performansına etkileri araştırılmıştır. Takım içinden ve takım dışından uygulanan geleneksel soğutma işlemi Resim 8.3.' da sunulmuştur.

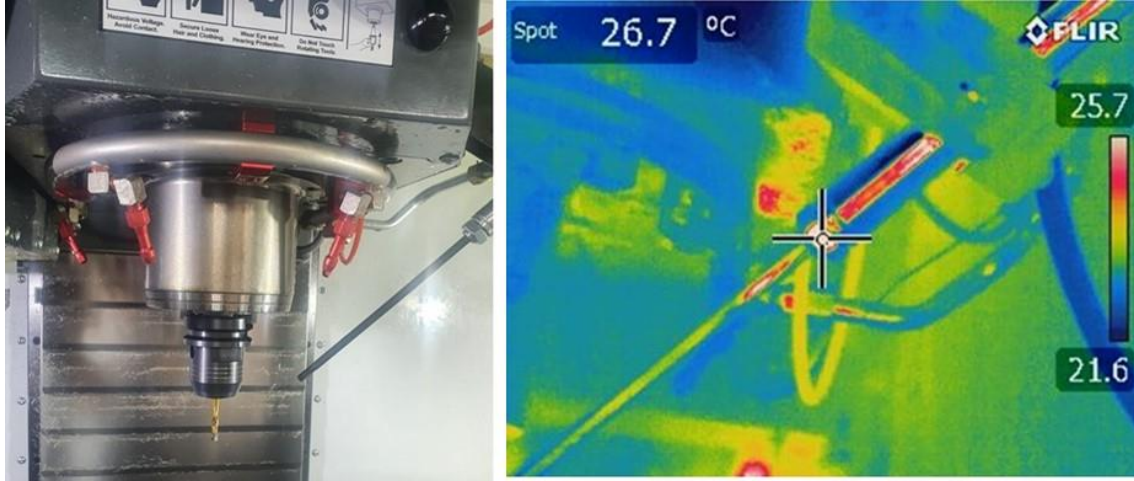


Resim 8.3. Takım içinden ve takım dışından uygulanan geleneksel soğutma

8.10.2. Kuru hava ile soğutma uygulaması

Kuru hava ile soğutma, talaşlı imalat uygulamalarında özellikle talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle havanın ucuz ve sınırsız bir kaynak olması, soğutma uygulamalarında kullanılan sentetik yağların çevreye ve sağlığa zararları hava ile soğutmayı önemli kılmaktadır.

Delme işlemi sırasında kuru hava ile soğutma yönteminin kullanılması bu araştırma içinde kendisine yer bulmuştur. Hava kaynağı olarak Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan TAMSAN firmasından temin edilmiş TVK 3100 model kompresör kullanılmıştır. Bu kompresör farklı basınçlara ayarlanarak istenilen basınçta havayı sisteme sağlamaktadır. Takım dışından kuru hava ile soğutma donanımı tezgâh üzerinde bulunmaktadır Tezgâha kazandırılan ve yukarıdaki bölümde açıklanan sistem sayesinde kuru hava ile soğutma takım içinden de gerçekleştirilebilmektedir. Kuru hava ile soğutma hem takım içinden hem de takım dışından 10 bar 'lık bir basınç ile uygulanmıştır. Termal kamera (FLIR T440) ile yapılan ölçümler sonucunda kesme bölgesine gönderilen kuru hava sıcaklığı yaklaşık 26 °C olarak ölçülmüştür. Kuru hava ile soğutma düzeneği Resim 8.4.' de sunulmuştur.

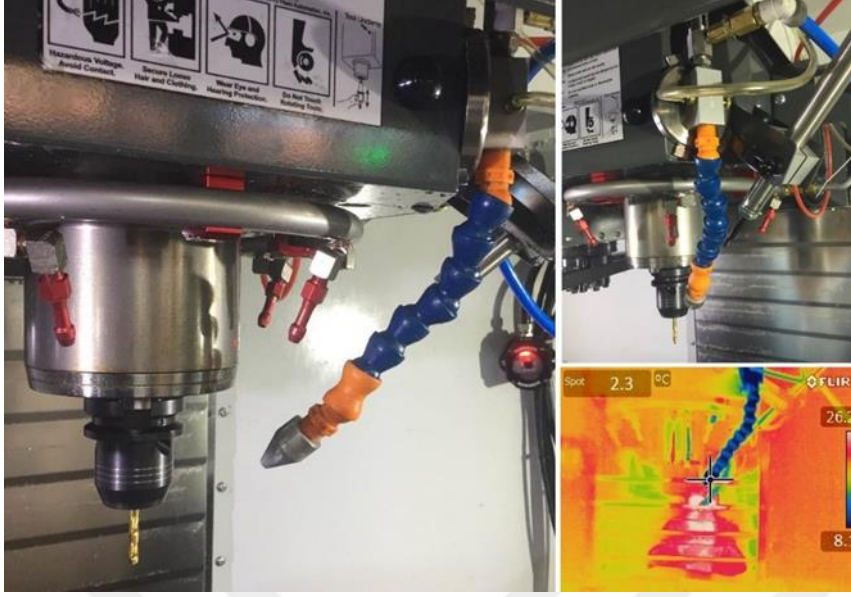


Resim 8.4. Kuru hava ile soğutma deney düzeneği

8.10.3. Vortex tüp ile soğutma uygulaması

Vortex tüplerinde bir adet basınçlı hava girişi ve iki adet hava çıkışı bulunmaktadır. Basınçlı hava tüp içinde helisel bir yol izlemektedir. Bu hareket sonucunda tüp cidarında hareket eden havanın hızı ve sıcaklığı ile tüp merkezinizde hareketine devam eden havanın hızı ve sıcaklığı farklılık göstermektedir. Tüp cidarında hareket eden hava yüksek mekanik enerjisi ve sürtünmeler sonucu açığa çıkan ısı nedeniyle daha yüksek sıcaklıklara çıkmaktadır. Tüp merkezinde hareketine devam eden hava enerjisinin büyük kısmını tüp cidarında hareket eden havaya aktardığı için düşük sıcaklıklarda tüpü terk etmektedir. Vortex tüpleri sayesinde $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında sıcaklıklarda hava elde etmek mümkündür. Kesme operasyonlarını soğutmada kullanılan kuru havanın soğutma kabiliyetini artırmak için Vortex tüpler önemli bir seçenek oluşturmuştur.

Bu çalışmada kullanılan vortex tüp ile soğutma işleminde basınçlı hava girişi kuru hava ile soğutma işleminde olduğu gibi 10 bar 'dır. Vortex tüp Nex Flor marka olup, soğuk hava susturuculu küçük boy modelidir. Vortex tüp ile kesme bölgesine gönderilen havanın sıcaklığı $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak termal kamera (FLIR T440) ile ölçülmüştür. Vortex soğutma sistemi Resim 8.5. de sunulmuştur.



Resim 8.5. Vortex ile soğutma deney düzeneği

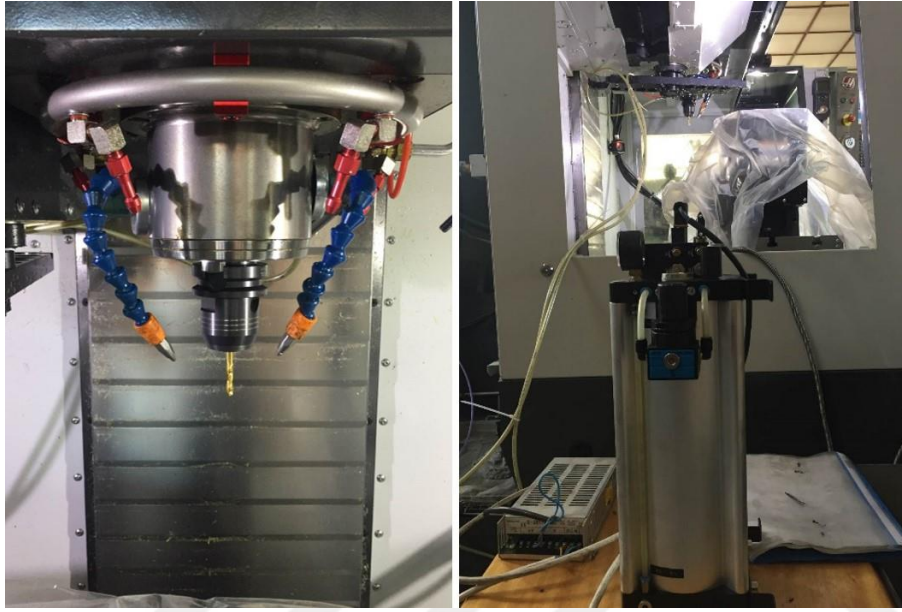
8.10.4. MQL ile soğutma uygulaması

MQL ile soğutma uygulaması hava ile birlikte minimum miktarda yağın kesme bölgesine gönderilmesini içermektedir. Basınçlı hava ile karşılaşan kesme yağı pulverize bir şekilde kesme bölgesine püskürtülmektedir. Kesme bölgesine basınçlı hava ile gönderilen kesme yağı soğutmanın yanında yağlama işlevini de yerine getirerek kesme performansını artırmaktadır. MQL ile soğutma işlemi basınçlı hava sayesinde kesme bölgesinde daha yüksek bir nüfuziyeti ve etki ortaya koymaktadır.

Deneysel çalışma kapsamında Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bünyesinde bulunan SKF UFB20-Basic MQL sistemi kullanılmıştır. Bu sistem farklı debilerde kesme yağını farklı basınçlar eşliğinde kesme bölgesine gönderebilmektedir. Çalışma kapsamında 200 ml/s debi ve 4 bar basınç ile MQL soğutma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mevcut MQL sisteminin kullanılabildiği en yüksek basınç değeri 4 bar'dır. MQL ile yapılan soğutma işleminde Master Fluid firmasının TRİM OE322 ürünü kesme yağı olarak kullanılmıştır. Ester bazlı bu yağ alüminyum ve titanyum alaşımlarının delinmesi ve diş açılması işlemlerinde yüksek performans gösterdiği için tercih edilmiştir. Kullanılan kesme yağının özellikleri Çizelge 8.6.'da sunulmuştur. MQL ile soğutma uygulaması ise Resim 8.6. da gösterilmiştir.

Çizelge 8.6. Kesme yağı özellikleri

Yağ Tipi	Yağ İçeriği	Viskozite (40°C de mm ² /s)	Renk	Parlama Noktası (°C)
Trim OE322 NS	Ester	22.0	Soluk Saman Sarısı	235



Resim 8.6. MQL ile soğutma deney düzeneği

8.10.5. Kriyojenik soğutma uygulaması

Kriyojenik soğutma 0 °C 'nin çok daha altındaki sıcaklıklarda sıvı azotun kesme bölgesine gönderilmesi ile sağlanmaktadır. Kriyojenik soğutma işlemi ile kesme bölgesi sıcaklıklarının düşürülüp takım ömrünün artırılması amaçlanmaktadır. Kriyojenik soğutma uygulamasında sıvı azot (LN₂) kullanılmaktadır. Sıvı azot çok düşük sıcaklıklarda kalabilme yeteneği ile birçok endüstri alanında tercih edilmektedir ancak, bu özelliği nedeniyle sıvı azotun canlı dokuya temas etmesi halinde ani donmalara ve sağlık sorunlarına neden olmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan sıvı azot Linde Gaz firmasından temin edilmiştir. Sıvı azot tankı aynı firmadan temin edilmiş 135 kg ağırlığında, 25 bar basınç kapasitesinde, yalıtımlı silindirik tanktır. Kriyojenik soğutma uygulamasında akışkanın tanktan çıkış basıncı 5 bar olarak ölçülmüştür. Sıvı azot 5 metre uzunluğunda, RS331 L12 tipi özel bir hortum ile kesme

bölgesine taşınmıştır. Söz konusu hortum tezgâh bağlantı elemanları aracılığı ile tezgâh içinde kesme bölgesine göre konumlandırılmıştır. Uygulanan soğutma operasyonunda soğutucu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan kriyojenik soğutma sistemi Resim 8.7. da sunulmuştur.



Resim 8.7. Kriyojenik soğutma işleminde kullanılan deney düzeneği

8.11. Deneysel Verilerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

Yapay sinir ağları ile verilerin modellenmesi, deneysel olarak test edilmeyen girdiler sonucunda elde edilecek çıktılar tahminine imkân sağlamaktadır. Yapay sinir ağlarının geliştirilmesinde öğrenme ve test aşamaları kullanılmaktadır. Mevcut verilerin bir kısmı ile yapay sinir ağları modelinin geliştirilmesi ve ağırlıkların hesaplanması sağlanmaktadır. İdeal ağırlıkların hesaplanmasının ardından kurulan modelin doğruluğu test edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında operasyon maliyetleri ve delik kalitesi için iki ayrı yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Bu modeller için uygun ağ yapısının belirlenmesinde ve verilerin ağırlıklarının hesaplanmasında “PHYTICA” yazılımı kullanılmıştır. Operasyon maliyetleri dikkate alınarak geliştirilen modelde girdi değerleri kesme hızı ve ilerleme, çıktı değerleri ise ilerleme kuvvetleri ve takımın aldığı yol olarak belirlenmiştir. Bu girdi-çıkı değerlerine bağlı olarak en iyi ağ yapısı geri beslemeli “2-5-4-2” geliştirilmiştir. Delik kalitesinin dikkate alındığı model için ise girdi değerleri yine kesme hızı ve ilerleme oranı

olurken, çıktı değerleri yüzey pürüzlülüğü ve delik çapı değerleri olmuştur. Bu model için en iyi ağ yapısı olarak geri beslemeli “2-4-3-4-2” ağ yapısı oluşturulmuştur. Her iki modelde de katmanlar arası her bağlantı için ağırlık vektörü (w) hesaplanmıştır. Her iki ağ yapısında da Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Ağ modeller kapsamında kullanılan eşitlikler verilmiştir.

Gizli katman hesaplamaları Eş. 8.1 ve Eş. 8.2’ de verilmiştir.

$$Net_i = \sum x_i w_{ij} \quad (8.1)$$

$$y_i = f(Net_i) \quad (8.2)$$

Çıktı katman hesaplamaları ise Eş. 8.3 ve Eş. 8.4’ de sunulmuştur.

$$Net_k = \sum y_i w_{jk} \quad (8.3)$$

$$O_k = f(Net_k) \quad (8.4)$$

Burada x_i giriş verilerini, y_i katman birden elde edilen sonuçları ve O_k ikinci katman sonuçlarını ifade etmektedir.

Modeller de hem çıktı fonksiyonun hesaplanmasında hem de gizli katman çıktılarının hesaplanmasında Fermi aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

$$F_i = \frac{1}{1 + e^{-4(Net_i - 0,5)}} \quad (8.5)$$

9. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu araştırma kapsamında, iş parçası olarak Ti6Al4V malzemesi kullanılmıştır. Çalışmanın birinci aşaması; söz konusu malzemenin kuru şartlar altında farklı kesme parametreleri ile ikinci aşaması; aynı malzemenin farklı soğutma yöntemleri ile ve üçüncü aşaması ise; farklı soğutucu akışkan basınçları eşliğinde delinmesini içermektedir. Böylece iş parçasının delinmesi için en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi ve soğutma yöntemlerinin etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda dört farklı kesme hızı (20, 30, 45 ve 60 m/dak) ve ilerleme oranı (0,05; 0,073; 0,10 ve 0,15 mm/dev) kullanılmıştır. Deneyler 6 mm çapında TiN kaplı karbür matkaplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kuru deneylerin ardından farklı soğutma yöntemlerinin etkisini ortaya koyabilmek için takım içinden geleneksel soğutma, takım içinden kuru hava ile soğutma, takım dışından geleneksel soğutma, kuru hava ile soğutma, vortex soğutma, MQL soğutma ve Kriyojenik soğutma olmak üzere yedi farklı soğutma yöntemi eşliğinde deneyler yapılmıştır. Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yöntemi farklı soğutucu basınçları (10, 20, 40 ve 60 bar) eşliğinde uygulanarak soğutucu akışkan basıncının operasyona katkıları da araştırılmıştır. Her deney için tek bir matkap kullanılmış ve deneyler iki kez tekrar edilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen ilerleme kuvvetleri, kesme momentleri, sıcaklıklar, yüzey pürüzlülükleri, dairesellik değerleri, delik çapı değerleri, silindiriklik değerleri ve takım ömürleri değerlendirilmiştir.

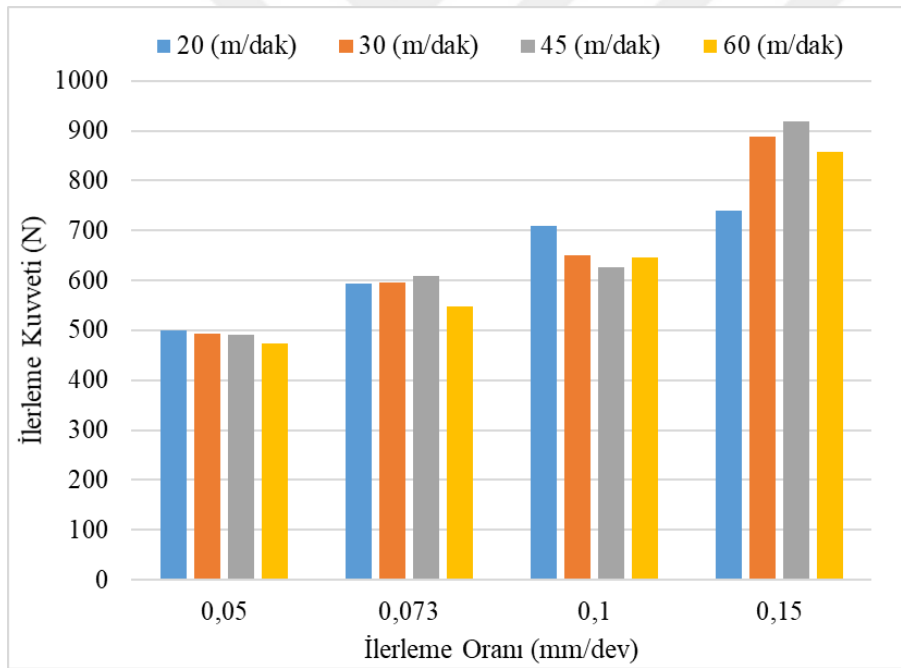
Bu bölümde söz konusu bu çıktı değerleri için elde edilen veriler grafiklere işlenerek yorumlanmıştır. Kuru kesme koşulları altında gerçekleştirilen deneyler, farklı soğutma yöntemlerinin etkinliğinin araştırıldığı deneyler ve farklı soğutucu basıncının etkilerinin araştırıldığı deneyler bu bölümün alt başlıklarını oluşturmuştur.

9.1. Kuru Kesme Şartları Altında Yapılan Deneyler

Kuru kesme şartları eşliğinde farklı kesme parametrelerinin operasyon çıktılarına etkilerinin test edildiği çalışmada çıktılarına ait değişimler bu başlık altında sunulmuştur.

9.1.1. Kesme parametrelerinin ilerleme kuvvetlerine etkisi

Kesme işlemi sırasında harcanan enerji önemli maliyet kalemlerinden biridir. Kesme kuvvetlerinin büyüklüğü harcanan enerjinin göstergesi olduğu için bu kuvvetlerin analizi büyük önem taşımaktadır. İlerleme kuvveti ile ilgili teknolojik bilgiler Bölüm 3.2.2’ de verilmiştir. Kuru kesme koşulları altında yapılan deneyler sonucunda ilerleme oranı ve kesme hızının ilerleme kuvveti üzerindeki etkileri Şekil 9.1.’ de sunulmuştur.

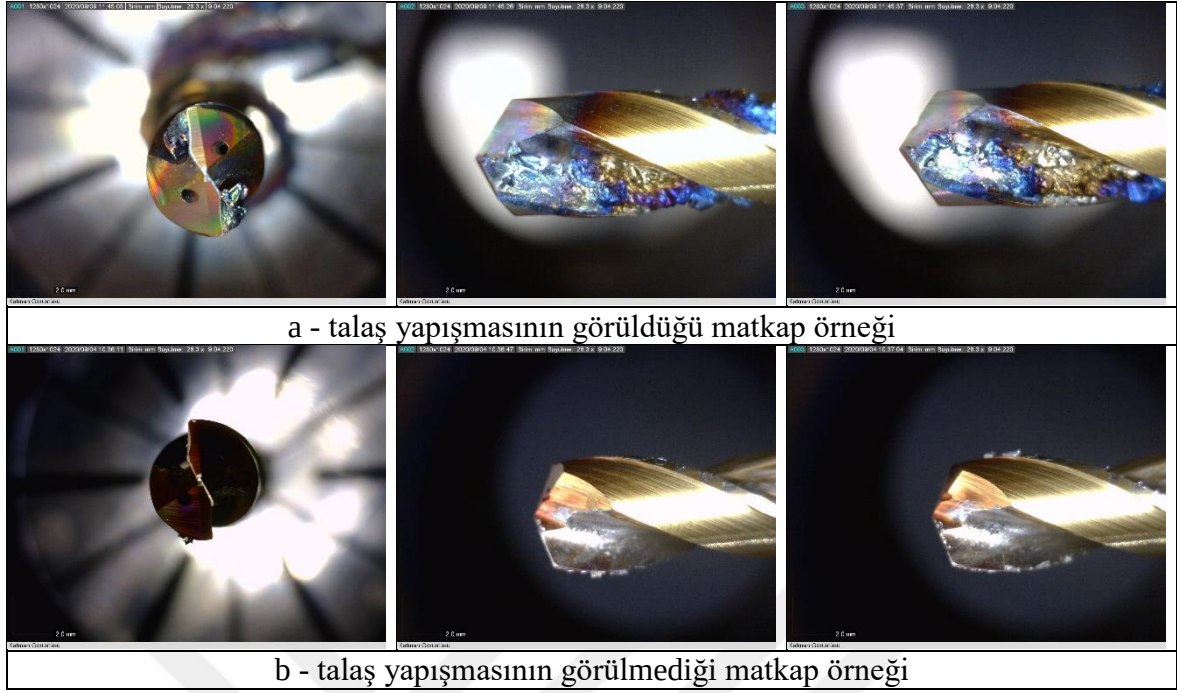


Şekil 9.1. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının ilerleme kuvvetlerine etkisi

Şekil 9.1. de sunulan grafikler incelendiğinde artan ilerleme oranı ile (0,050; 0,073; 0,100 ve 0,150 mm/dev) ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. 45 m/dak kesme hızıyla yapılan deneylerde; ilerlemenin en küçüğü ve en büyüğü arasında (0,050; 0,150 mm/dev) ilerleme kuvvetleri %87 oranında artmıştır. Artan ilerleme oranı ile birim zamanda kaldırılan talaş kesit alanı da artmaktadır [94, 127, 133]. Bu durum ilerleme oranının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur. En düşük ilerleme kuvveti; 0,050 mm/dev

ilerleme oranı ve 60 m/dak kesme hızı eşliğinde yapılan deneylerde 473,1 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kuvvet ise; 0,150 mm/dev ilerleme oranı ve 45 m/dak kesme hızı ile yapılan deney sırasında 919,5 N olarak ölçülmüştür.

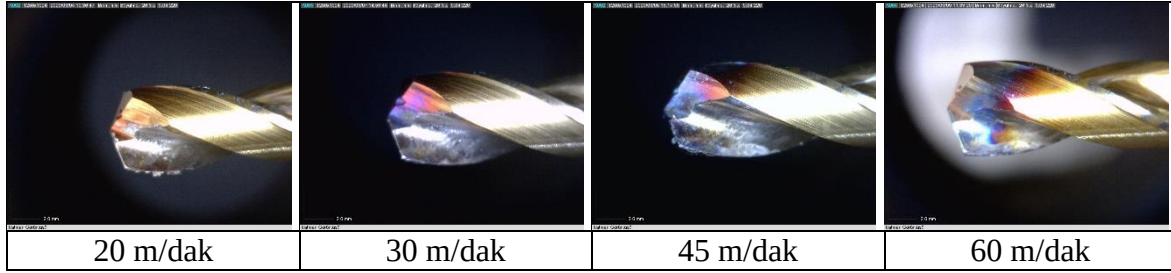
Aynı ilerleme oranları eşliğinde farklı kesme hızlarıyla yapılan deneyler sonucunda kesme hızının ilerleme kuvvetlerine etkileri belirlenmiştir. En yüksek ilerleme oranı kullanılarak yapılan deneyler hariç diğer deney gruplarında kesme hızının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinde azalma tespit edilmiştir. En düşük ilerleme oranında (0,05 mm/dev) kesme hızlarının artmasıyla (20, 30, 45 ve 60 m/dak) ilerleme kuvveti %5 oranında küçük bir azalma göstermiştir. İlerleme oranı 0,073 mm/dev değerine çıkarıldığında; 20, 30 ve 45 m/dak kesme hızlarında benzer kuvvet değerleri ölçülmüş, kesme hızının 60 m/dak olması ile kuvvet değerlerinde %9'luk bir azalma belirlenmiştir. İlerleme oranı 0,1 mm/dev değerine geldiğinde ise artan kesme hızı ile ilerleme kuvvetlerindeki düşüş daha belirgin olmuştur. Bu ilerleme oranında kesme hızının 20 m/dak' dan 45 m/dak' ya çıkmasıyla ilerleme kuvvetlerinde %12 'lik bir azalma görülmüştür. En düşük ilerleme oranı ve 20 m/dak kesme hızında 499,3 N ilerleme kuvveti ölçülmüştür. Bu değer 0,05 mm/dev ilerleme oranı ile ölçülen en yüksek ilerleme kuvvetidir. Aynı ilerleme oranı altında 60 m/dak kesme hızında 473,1 N ile en düşük ilerleme kuvveti belirlenmiştir. Sabit ilerleme oranı altında; artan kesme hızları ile kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkların arttığı gözlemlenmiştir [134]. Artan kesme bölgesi sıcaklıklarının etkisi ile malzemenin akma dayanımının düştüğü, düşen malzeme dayanımı sebebiyle de işlenen malzemenin şekillendirilmesinin kolaylaştığı literatürden anlaşılmaktadır [97, 133, 134]. Tüm bu sebepler 0,05; 0,073 ve 0,10 mm/dev ilerleme oranlarında artan kesme hızları ile ilerleme kuvvetlerinin düşmesiyle sonuçlanmıştır. Ancak ilerleme oranı 0,10 mm/dev ile yapılan deneylerde kesme hızının 60 m/dak' ya çıkması ile ilerleme kuvvetlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu duruma ise; matkaba yapışan talaş ve düzensiz kesme ortamının neden olduğu düşünülmektedir [97]. Değişen kesme parametrelerine bağlı olarak talaş yapışması gözlemlenmiştir. Kesme hızının 60 m/dak ve 20 m/dak, ilerleme oranının 0,15 mm/dev olduğu on altı numaralı ve dört numaralı deneye ait talaş-takım görselleri Resim 9.1.'de sunulmuştur.



Resim 9.1. Takım-talaş görselleri (a; 16 nolu deneye, b; 4 nolu deneye ait görseller)

En yüksek ilerleme oranında (0,15 mm/dev) kesme hızlarının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinde oluşan değişim diğer ilerleme oranlarına kıyasla farklılık göstermektedir. İlerleme kuvvetleri artan kesme hızı (20, 30 ve 45 m/dak) ile artmıştır. İlerleme kuvvetleri artan kesme hızı ile birlikte 0,15 mm/dev ilerleme oranında %24 artış göstermiştir. Söz konusu ilerleme oranında en yüksek ilerleme kuvveti 45 m/dak kesme hızıyla yapılan deneyde ölçülmüştür. En yüksek ilerleme kuvveti, ilerleme oranının 0,15 mm/dev olduğu deneyde 919,5 N olarak ölçülmüştür. Artan kesme hızı ve ilerleme oranı ile kesme bölgesi sıcaklıkları yükselmiştir. Bu kritik sıcaklıklar etkisi ile talaş tahliyesinin zorlaştığı ve talaşın matkap helis kanallarına yığılarak yapıştığı ve yığıntı talaşın olduğu görülmüştür [100]. Söz konusu yığıntı talaş oluşumu matkap geometrisini değiştirmiş ve kesme şartlarını olumsuz etkilemiştir. Tüm bu nedenler sonucunda artan kesme hızları ile birlikte ilerleme kuvvetlerinde de bir artış gözlemlenmiştir. Kesme hızının 60 m/dak' ya artırılması ile kesme bölgesi sıcaklıkları en yüksek değerine ulaşmıştır. Sıcaklıkların artması ile talaşın yapışma eğilimi azalarak, yığıntı talaş boyutları azalmaktadır [13, 30]. Yüksek sıcaklıklar yığıntı talaş oluşumunu düşürmektedir. Ayrıca kesme bölgesi sıcaklıklarının en yüksek değerlerine 60 m/dak kesme hızında ulaşması bu kesme hızlarında sıcaklık – malzeme dayanımı ilişkisini de etkilemiş ve böylece daha rahat bir kesme ortamı oluşmuştur. Bu durum 60 m/dak kesme hızında kuvvetlerin 45 m/dak kesme hızına göre düşmesine neden olmuştur. İlerleme oranının 0,15 mm/dev eşliğinde farklı kesme hızlarıyla yapılan deneylere dair takım görseli

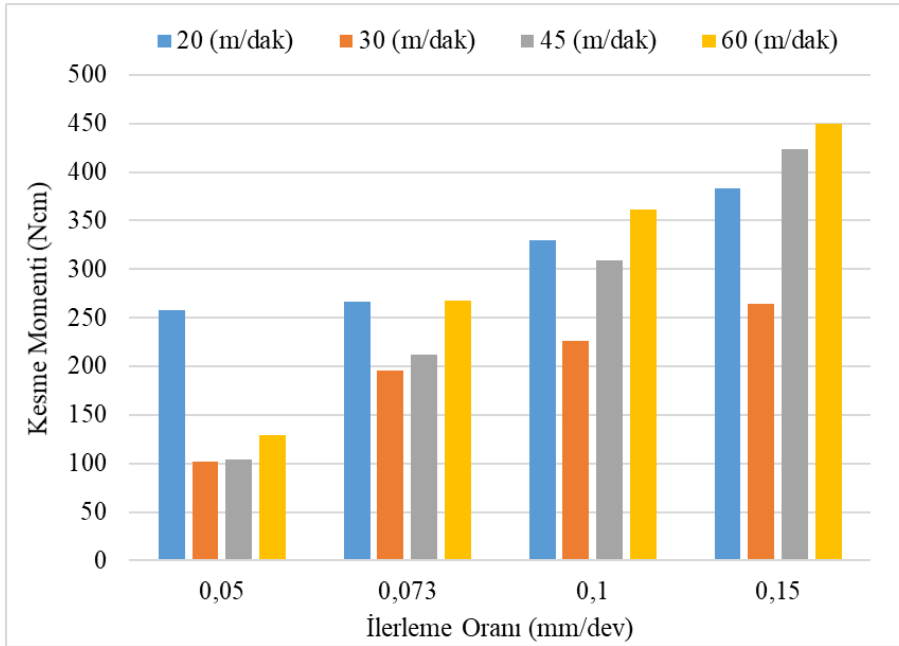
Resim 9.2.'de sunulmuştur.



Resim 9.2. Artan kesme hızı ile değişen matkap ucu görselleri

9.1.2. Kesme parametrelerinin kesme momentlerine etkisi

Kesme işlemi sırasında oluşan kesme momentleri, ilerleme kuvvetinde olduğu gibi kesme sırasında harcanan gücün ve kesme operasyonunun zorluğunu belirten bir göstergedir. Kesme momentlerinin oluşumunda da ilerleme oranı ve kesme hızı kombinasyonu büyük öneme sahiptir. Moment değerlerinin büyüklüğü önemli oranda ilerleme kuvveti ile ilişkili olsa da diğer kuvvet bileşenleri, takım – iş parçası ve takım – talaş arasındaki sürtünmeler de önem kazanmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilen kesme momentleri Şekil 9.2.'de sunulmuştur.



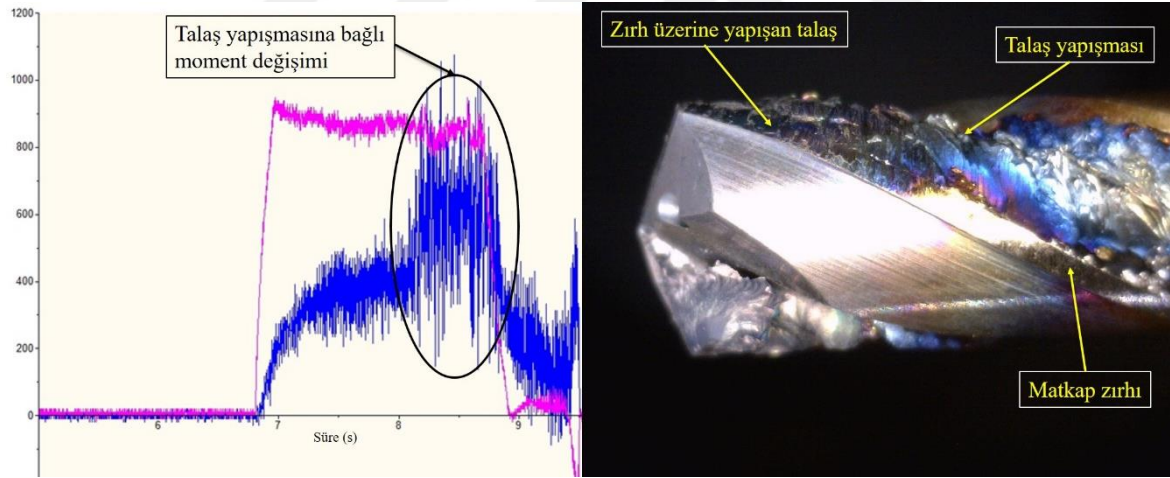
Şekil 9.2. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının kesme momentlerine etkisi

Kesme momenti değerlerine dair grafik incelendiğinde; ilerleme kuvvetlerinde olduğu gibi artan ilerleme oranları (0,05; 0,073; 0,100 ve 0,150 mm/dev) ile birlikte tüm kesme hızlarında moment değerleri artmıştır. İlerleme kuvvetlerinde olduğu gibi moment değerleri de ilerleme oranları ile doğru orantılıdır. Artan ilerleme oranları ile birlikte kesme momentleri yaklaşık olarak % 45 - % 250 artmıştır. Artan ilerleme oranları ile birim zamanda kaldırılan talaş kesit alanı artmaktadır. Bu durum ilerleme kuvvetlerinde olduğu gibi kesme momentlerinde de artışa neden olduğu düşünülmektedir [111, 123, 135]. En yüksek kesme momenti 450 Ncm olarak 60 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme oranı ile yapılan deneylerde ölçülmüştür. En düşük kesme momenti ise 101,5 Ncm değerinde 30 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme oranı eşliğinde yapılan deneyde belirlenmiştir.

Kesme hızlarının değişimine bağlı olarak kesme momentlerinin değişimi incelendiğinde; tüm ilerleme hızlarında en düşük moment değerleri 30 m/dak kesme hızıyla yapılan deneylerde ölçülmüştür. 0,05; 0,073; 0,1 ve 0,15 mm/dev ilerleme oranları ve 30 m/dak kesme hızı kullanılarak yapılan deneylerde ölçülen moment değerleri sırası ile 101,5; 195,3; 225,7 ve 263,8 Ncm ile en düşük kesme momentleri ölçülmüştür. Yüksek ilerleme oranları (0,1 ve 0,15 mm/dev) ile yapılan deneylerde en yüksek kesme momenti 60 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde, sırası ile 361,2 ve 450 Ncm olarak tespit edilmiştir. İlerleme oranının 0,073 mm/dev olduğu deneylerde ise en yüksek moment değeri 20 m/dak ve 60 m/dak kesme hızlarında yakın değerlerde sırası ile 267 ve 267,3 Ncm olarak belirlenmiştir. En düşük ilerleme oranı ile yapılan deneylerde ise en yüksek kesme momenti 20 m/dak kesme hızı ile yapılan deneyde 258,2 Ncm olarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar doğrultusunda en düşük kesme hızında (20 m/dak) moment değerlerinin nispeten yüksek değerlerde olduğu, kesme hızının 30 m/dak' ya artması ile kesme momentlerinin %59'lara varan oranlarda düştüğü görülmüştür. Artmaya devam eden kesme hızları (45 ve 60 m/dak) ile kesme momentlerinin %24 ile %79 oranları aralığında arttığı belirlenmiştir.

20 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde kesme bölgesi sıcaklıklarının nispeten düşük olması, talaşın düşük kesme hızı ve ilerleme oranlarında kesme bölgesinden daha uzun sürede tahliye edilmesi kesme momentlerinin yüksek çıkmasına zemin hazırladığı düşünülmüştür. Bu kesme hızında oluşan nispeten düşük sıcaklıklar ve düşük talaş tahliye hızı sonucunda oluşan yüksek sürtünme değerleri momentlerin artmasına neden olduğu düşünülmektedir [97, 111]. Artan kesme hızı ile kesme bölgesi sıcaklıklarının artması, talaş akışının hızlanması ve talaş tahliyesinin sorunsuz gerçekleşmesi ile kesme momentleri

önemli oranda düşmüştür [94, 135]. Kesme hızlarının artmaya devam etmesi ve kesme bölgesinde kritik sıcaklıklara ulaşılması ile talaşın tahliyesi zorlaşmıştır. Artan sıcaklık ve basınç etkisi ile talaşın, matkap helis kanallarına yapışma eğilimi artmaktadır. İlk yapışma matkap ucundan bir miktar yukarıda gerçekleşmiştir. Ardından akan talaş bir önceki yapışan talaş üzerine yığılarak matkap helis kanallarını doldurmuştur. Yapışan talaş matkap zırhı ve iş parçası arasına sıkışmaya başlamıştır. Söz konusu bu talaş yığılması ve etkileri yüksek kesme hızlarında kesme momentlerinin ciddi bir şekilde artmasına neden olmuştur. Talaş yapışmasına bağlı olarak moment değerlerinin genliğinin arttığı ve düzensiz bir şekilde olduğu görülmüştür. Talaş yapışması sonucunda kesme momentlerinde gözlemlenen değişimler Şekil 9.3.' de sunulmuştur. Şekilde, operasyon boyunca oluşan ilerleme kuvvetleri pembe renk ile kesme momentleri ise mavi renk ile gösterilmiştir. Şekil 9.3.'de sunulan grafik 16 nolu deneye (kesme hızı 60 m/dak, ilerleme oranı 0,15 mm/dev) aittir. Operasyonun yarısından sonra moment değerlerinde görülen yüksek genlikli dalgalanma talaşın takıma yapışmasının bir sonucudur.

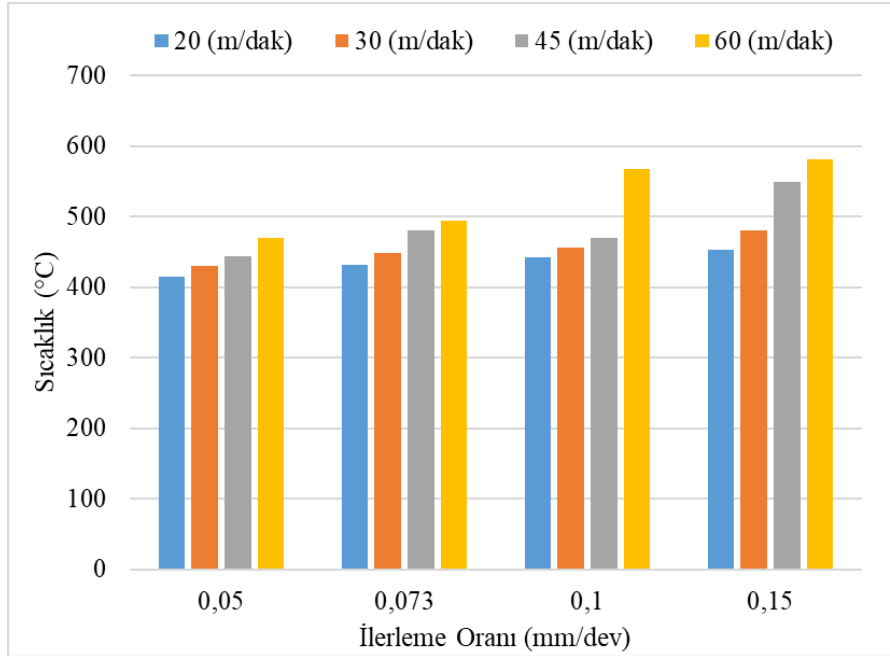


Şekil 9.3. Talaş yapışmasının momentler üzerine etkisi

9.1.3. Kesme parametrelerinin sıcaklık değişimine etkisi

Talaş kaldırma operasyonlarının tamamı iş parçasının plastik deformasyonu ile gerçekleşir. Bu plastik deformasyon sırasında harcanan enerjinin önemli bir bölümü ısıya dönüşür [26, 135]. Deformasyon bölgelerinde açığa çıkan bu yüksek ısı yüksek sıcaklıkları da beraberinde doğurur. Kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar takım aşınmasını doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklar operasyon güvenliğini de tehdit etmektedir. Yapılan çalışmada sıcaklık değerleri iş parçası yan yüzeyinden temassız bir

şekilde yapılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 9.4.' de grafiğe dökülmüştür.



Şekil 9.4 Kesme hızı ve ilerleme oranlarının sıcaklık değişimine etkisi

Sıcaklık grafiği incelendiğinde artan ilerleme oranları ile sıcaklık değerlerinin de artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda en düşük sıcaklıkların tüm kesme hızları için en düşük ilerleme oranı olan 0,05 mm/dev' de ortaya çıktığı görülmüştür. En yüksek sıcaklık değerleri ise en yüksek ilerleme oranı olan 0,15 mm/dev' de açığa çıkmıştır. Artan ilerleme oranları ile birlikte sıcaklık değerlerinin % 9 - 24 oranları aralığında arttığı görülmüştür. Talaşlı imalat uygulamalarında açığa çıkan ısıнын yaklaşık %80 'lik bir bölümünün talaş ile kesme bölgesinden uzaklaştırıldığı bilinmektedir. Tornalama ve frezeleme gibi uygulamalarda talaşın doğrudan hava ile teması bu ısıнын çok daha etkili ve hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasına zemin hazırlamaktadır. Ancak delme işleminin kapalı bir alanda gerçekleşmesi, talaşın hava ile temasını ve sıcaklık tahliyesini zorlaştırmıştır. Delme işleminde talaşın iş parçası yüzeyi ve matkap ile olan yüksek teması, iş parçası ve takıma olan ısı geçişini ve kesme bölgesinde ısıнын birikmesine neden olmaktadır [112]. Bu durum delme uygulamalarında sıcaklıklar açısından belirleyici olmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda oluşan takım görselleri incelendiğinde yüksek sıcaklıklara bağlı olarak takım ucunda gerçekleşen renk değişimleri takıma transfer olan yüksek sıcaklıkların bir sonucudur. Söz konusu renk değişimleri Resim 9.2.' de sunulan görselde belirgin bir

şekilde görülmektedir.

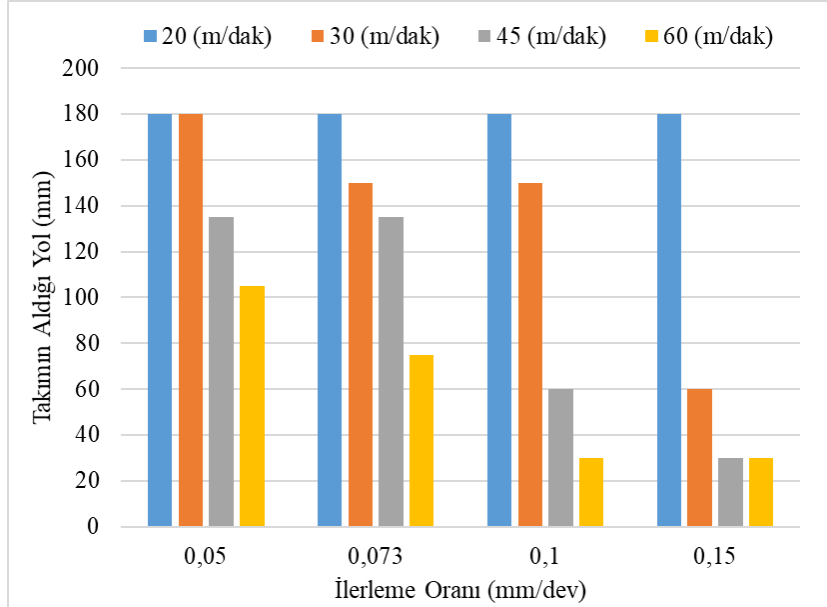
Tüm bu durumlara ek olarak Ti6Al4V malzemenin en belirgin özelliklerinden birisi düşük ısı iletkenliğidir. Bu durum iş parçası üzerinden ısının uzaklaştırılmasını büyük ölçüde zayıflatmakta ve kesme bölgesinde ısının birikmesine neden olmaktadır. Artan ilerleme oranları ile birim zamanda kaldırılan talaş kesit alanının artması ve takım – iş parçası sürtünmelerinin yükselmesi sıcaklıkların artmasına neden olmuştur. Artan ilerleme oranları ile talaş tahliyesinin hızlanması ve sıcaklıkların düşmesi literatürde yer alan bir beklenti [26, 50, 59, 136] olsa da iş parçasının termal özellikleri, yüksek ilerleme oranları ve kesme hızlarında talaşın helis kanallarına yığılarak kesme bölgesini terk etmemesi sıcaklık artışına neden olmaktadır.

Kesme hızlarının değişimi ile sıcaklık değerlerinin değişiminin doğru orantılı olduğu görülmüştür. Tüm ilerleme oranlarında artan kesme hızları ile sıcaklık değerleri de artmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek sıcaklık değeri 580,4 °C olarak, 60 m/dak kesme hızının ve 0,15 mm/dev ilerleme oranının kullanıldığı deneyde ölçülmüştür. En düşük sıcaklık ise 414,8 °C olarak en düşük kesme hızı ve ilerleme oranı kombinasyonu ile yapılan deneyde tespit edilmiştir. Artan kesme hızları ile birim zamanda oluşan deformasyonun artmasının, takım - talaş arasında oluşun temasın ve sürtünmelerin artmasının sıcaklıkların artmasına neden olduğu düşünülmektedir [108, 136].

9.1.4. Kesme parametrelerinin takım ömrüne etkisi

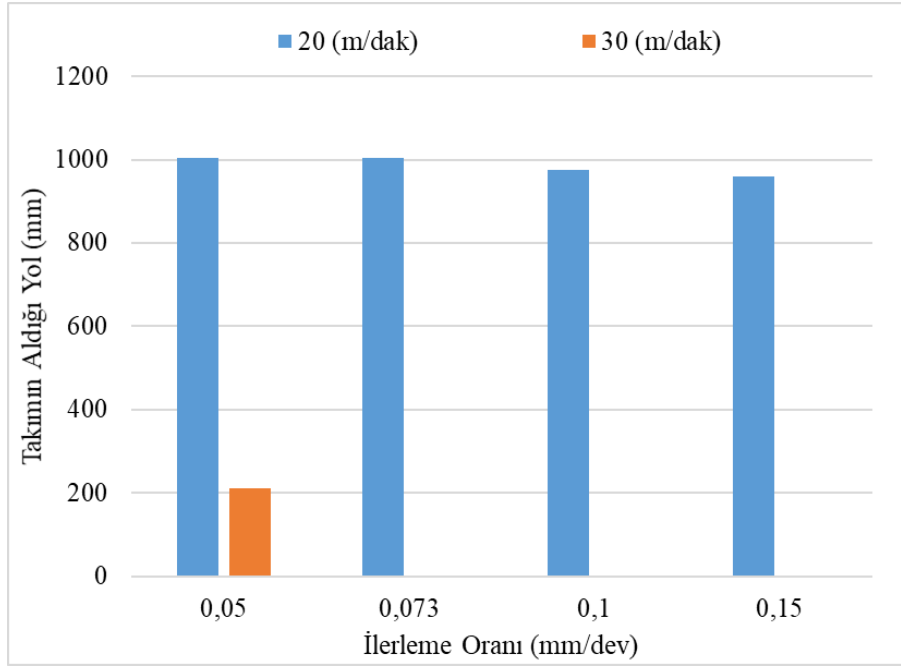
Talaşlı imalat operasyonlarında önemli maliyet kalemlerinden bir de kesici takım maliyetleridir. Operasyonun yüksek verimle gerçekleşmesi için kesici takımların uzun süreli performans sergilemesi arzu edilmektedir. Bu sebeple yüksek takım ömrü için uygun kesme parametrelerinin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sayesinde Ti6Al4V malzemenin delinmesi sırasında takım ömrüne kesme hızı ve ilerleme oranlarının etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 9.5.' de sunulmuştur. Şekil 9.5.' de sunulan grafik tek iş parçası üzerinde gerçekleştirilen deneyler dikkate alınarak çizilmiştir. Tek numune üzerinden yapılan deneylerde 20 m/dak kesme hızı eşliğinde yapılan deneylerde takım aşınması görülmemiştir. Takım performansının net bir şekilde ortaya konulması için ikinci bir numune bağlanarak aşınma testlerine devam edilmiştir. Bu devam testleri sonucunda takım 20 m/dak kesme hızı ve 0,05; 0,07; 0,1 ve 0,15 mm/dev ilerleme

oranında sırasıyla 1005, 1005, 975 ve 960 mm yol kat etmiştir. Benzer bir şekilde 30 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme oranı eşliğinde yapılan deneyde de ilave iki delik daha delinmiş ve böylece takım 210 mm yol kat etmiştir. 20 ve 30 m/dak kesme hızlarında elde edilen nihai veriler ilave bir grafik ile (Şekil 9.6.) sunulmuştur.



Şekil 9.5. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının takımın aldığı yol değerlerine etkisi

Şekil 9.5.' de takımın art arda gerçekleştirilen delme operasyonları sonucunda aldığı toplam yol mm cinsinden grafiğe dökülmüştür. Grafik değerleri incelendiğinde artan ilerleme hızı ile takım ömrünün azaldığı belirgin bir şekilde görülmektedir. En uzun takım ömrü 0,05 mm/dev ilerleme oranı eşliğinde yapılan deneylerde elde edilirken, ilerleme oranının 0,15 mm/dev' e çıkarılması ile takım ömründe %70 – 77 oranları arasında belirgin bir azalma görülmüştür. Artan ilerleme oranları ile mekanik yüklerin ve kesme bölgesi sıcaklıklarının artması, sıcaklık artışına bağlı olarak gelişen talaş yığılmaları takım performansını olumsuz etkilemiş ve takım ömrünün düşmesine neden olmuştur [94]. Yapılan deneyler neticesinde en yüksek takım performansı 0,05 mm/dev ilerleme oranı ve 20 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde tespit edilmiştir. Bu parametreler eşliğinde yapılan deneylerde 1005 mm delik mesafesi alınmıştır. Şekil 9.6. de sunulan grafik 20 ve 30 m/dak kesme hızı için takım performansını ortaya koymaktadır.



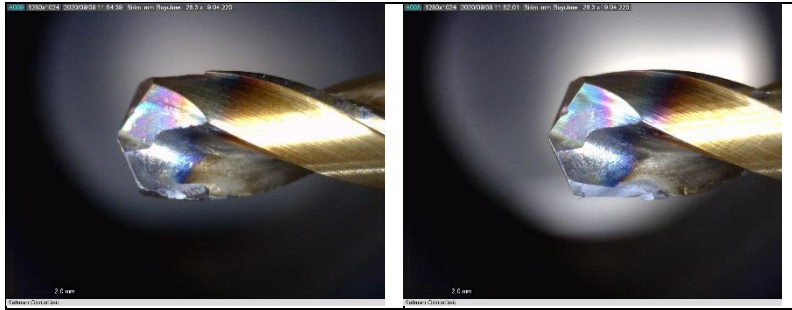
Şekil 9.6. Ek numuneler üzerinden yapılan nihai takımın aldığı yol değerleri

En kötü takım performansı ise 60 m/dak kesme hızı ve yüksek ilerleme oranları ile (0,1; 0,15 mm/dev) yapılan deneylerde görülmüştür. Bu şartlarda matkaplar sadece 30 mm kesme işlemi gerçekleştirebilmiştir. Aynı şekilde 45 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme oranı ile yapılan deneyde de 30 mm 'lik bir kesme mesafesi elde edilmiştir. Bu durumda yüksek kesme hızı ve ilerleme oranlarının takım performansı açısından olumsuz etkiler ortaya koyduğunu göstermektedir.

Tüm ilerleme oranları dikkate alındığında artan kesme hızları ile takımın aldığı yol değerlerinin düştüğü görülmektedir. 20 m/dak kesme hızında tüm ilerleme oranlarında takımın etkili bir kesme performansı ortaya koyduğu görülmüştür. Kesme hızının 30 m/dak değerine yükseltilmesi ile takımın 0,05 mm/dev ilerleme oranı ile 210 mm işlem yaptığı görülmüştür. Aynı ilerleme oranında yapılan delme işleminde kesme hızının artması ile takım performansının %90 – 97 arasında değişen oranlarda düştüğü görülmüştür. Artan ilerleme oranı ile birlikte yüksek kesme hızlarının takım üzerindeki olumsuz etkileri daha da belirgin hale gelmiştir. Artan kesme hızları ile birlikte kesme bölgesinde artan sıcaklıklar takım üzerinde termal ve mekanik yorulmaları artırmış ve aşınmaya karşı dayanımı düşürmüştür [99]. Bununla birlikte artan sıcaklık ile doğru orantılı olarak talaşın takım helis kanallarına yapışma eğiliminin artması takım performansını ciddi anlamda olumsuz etkilemiştir [95]. Takımın helis kanalına yığılarak yapışan talaş kütleleri hem takım

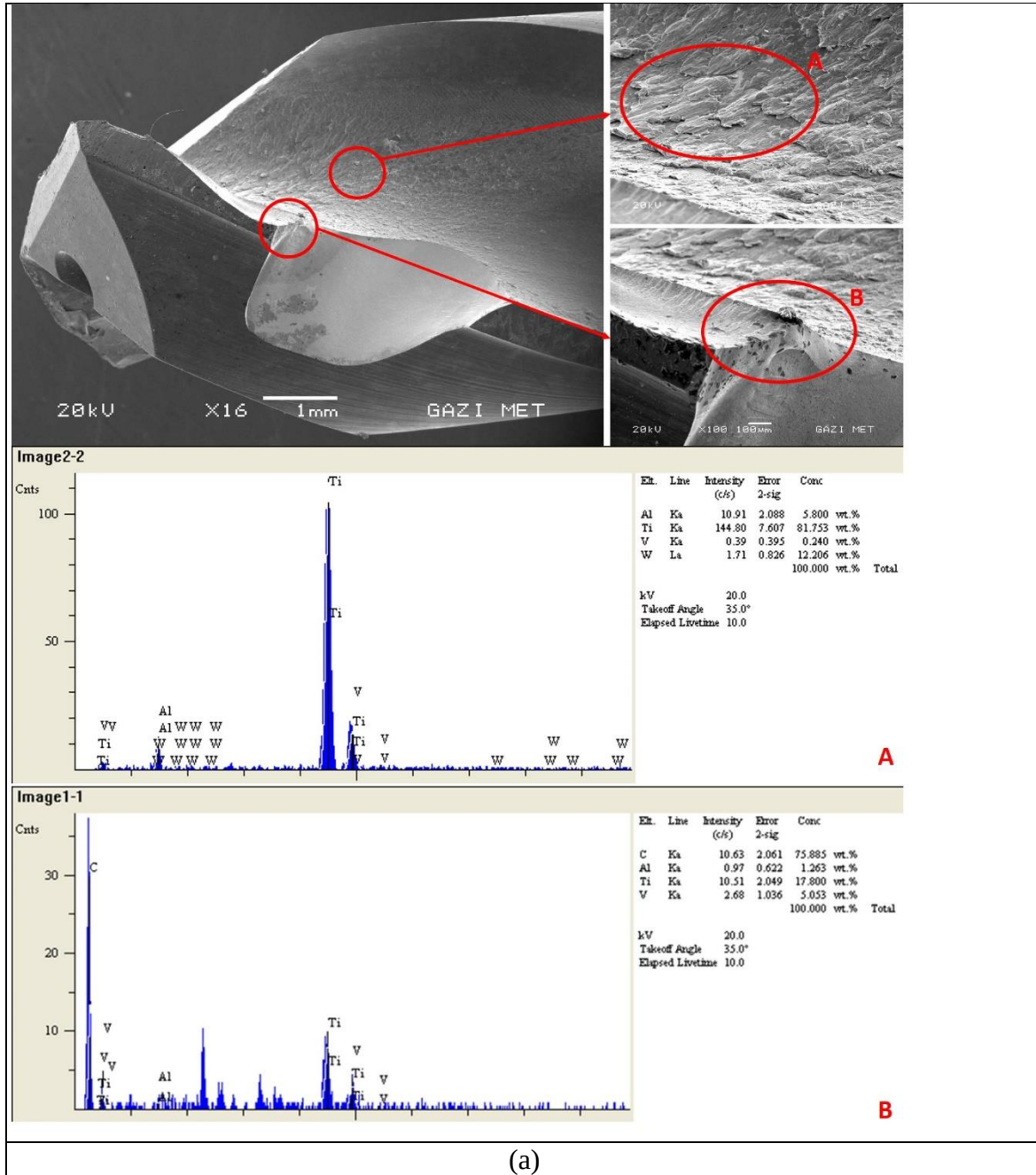
geometrisini olumsuz etkilemiş hem de talaş ile tahliye edilmesi gereken yüksek sıcaklığın doğrudan takıma nüfuz etmesine sebebiyet vermiştir.

Isı transferi zamana bağlı olarak gerçekleşen bir olaydır. Kesme bölgesinde oluşan yüksek ısı ve bu ısıya bağlı olarak açığa çıkan yüksek sıcaklıklar talaş aracılığı ile takıma transfer olmaktadır. Bu transfer için gerekli süre de dikkate alındığında takımda oluşan en yüksek sıcaklıklar takımın ucundan 4 - 5 mm yukarıda olduğu düşünülmektedir. Takım üzerinde oluşan renk değişimleri ve deformasyon izler bu durumu desteklemektedir. Takım üzerinde en yüksek sıcaklıkların olduğu bu bölge talaşın yapışması için de en elverişli bölge olmaktadır. Bu bölge yüksek sıcaklıklar, sürtünme ve mekanik yükler sebebi ile de takım üzerinde deformasyona en elverişli bölge konumuna gelmektedir. Yüksek sıcaklıkların ve mekanik yüklerin de etkisi ile talaş bu bölgede takıma kaynak olmaktadır [30, 100, 137, 138]. Dışarıdan müdahale ile ancak ayrılan talaşın bu bölgeden ayrılması sırasında takım üzerinden parça kopardığı ve takımın önemli bir deformasyona maruz kaldığı görülmüştür. Deney 16 da talaş yapışmasına bağlı olarak ortaya çıkan deformasyon görselleri Resim 9.3.'de sunulmuştur.

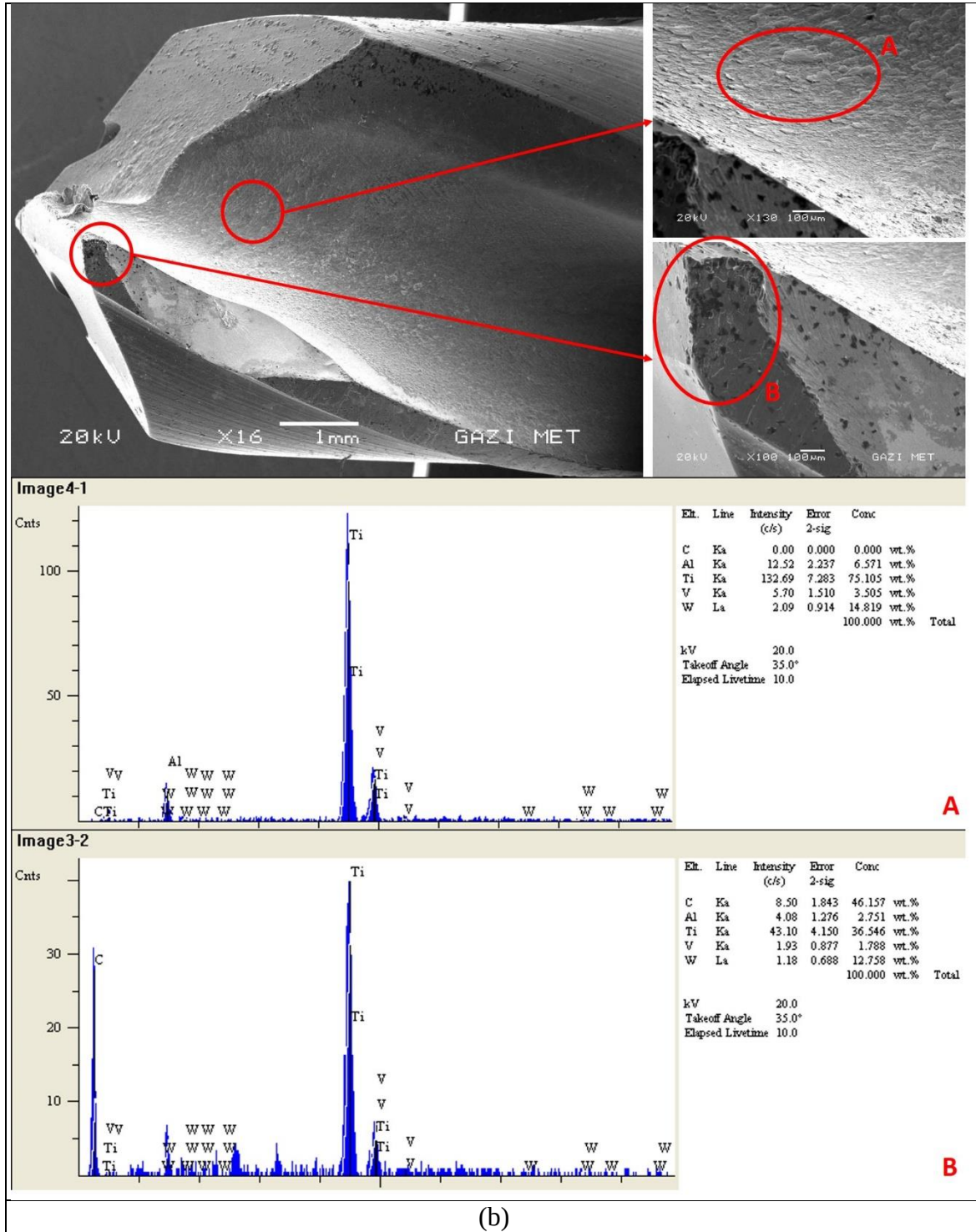


Resim 9.3. Talaş yapışması sonucunda takımda görülen hasar

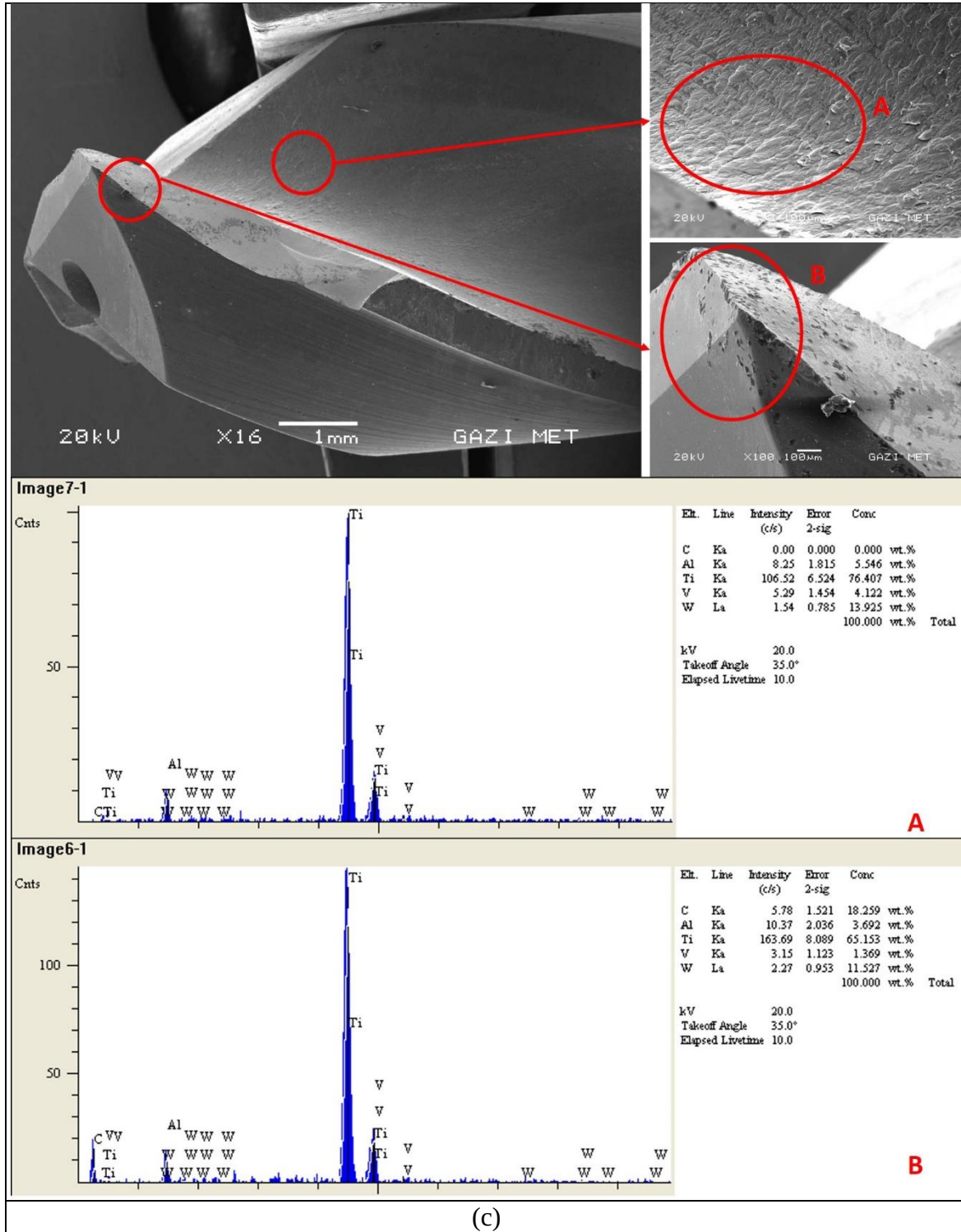
Takımda meydana gelen hasarın daha iyi irdelenmesi ve bu hasarın talaş yapışmasına bağlı olarak gerçekleştiğinin verilere dayanarak ortaya konulması için takım ve talaşlar üzerinden SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır. Aynı aşınma tipinin tüm süreçte etkili olduğunun ortaya konulması için üç farklı takım – talaş çiftine bu işlemler uygulanmıştır. Takımlar üzerinden alınan SEM görselleri ve EDS analizleri Resim 9.4.' de talaş üzerinden alınan SEM görselleri ve EDS analizleri ise Resim 9.5.'de verilmiştir.



Resim 9.4. Takım SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 8 nolu, (b); 11 nolu ve (c); 16 nolu deneylere ait takımlar



Resim 9.4. (devam) Takım SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 8 nolu, (b); 11 nolu ve (c); 16 nolu deneylere ait takımlar



Resim 9.4. (devam) Takım SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 8 nolu, (b); 11 nolu ve (c); 16 nolu deneylere ait takımlar

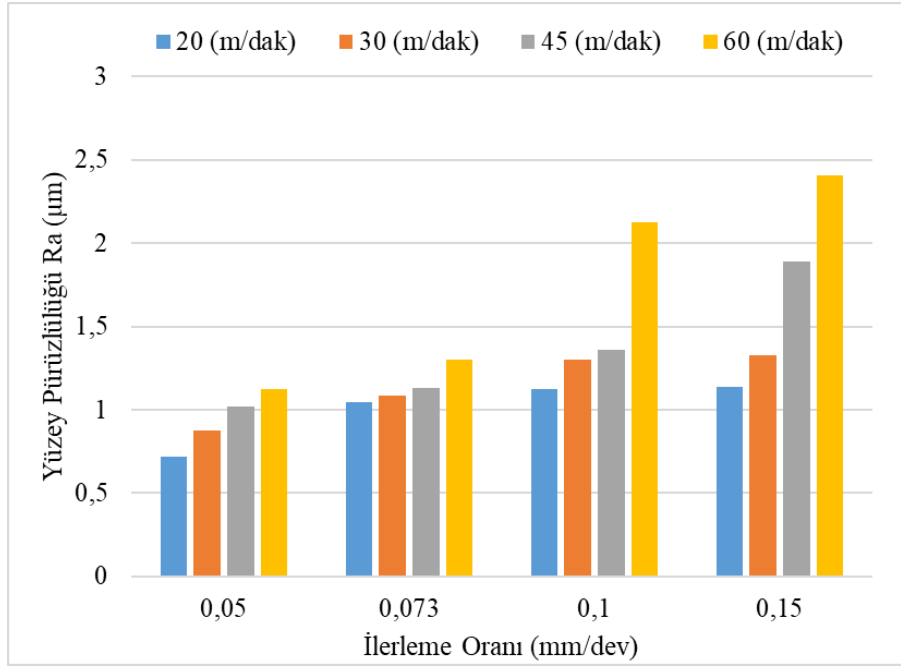
Resim 9.4. incelendiğinde takım üzerinde hasar bulunan bölgelerde ve takımın helis kanalları üzerinde titanyum, alüminyum ve vanadyum elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu elementlerin iş parçasını oluşturan temel elementler olduğu ve buraya talaş yapışması sayesinde kaynak olduğu görülmüştür. 8 nolu deneyde (30 m/dak ve 0,15

Resim 9.5.'de sunulan görsellerde talaş üzerinde tungsten (W) ve kobalt (Co) elementleri tespit edilmiştir. Bu elementler kesici takım yapısında bulunan elementlerdir. Talaş görselleri de takımda oluşan hasarın yapışmaya bağlı gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Ayrıca Resim 9.5. (a) incelendiğinde takımdan kopan parça üzerinde çatlak oluşumu görülmektedir. Yüksek termal ve mekanik yükler sonucunda başlayan çatlakların takım deformasyonuna neden olduğu görülmüştür.

Talaşlı imalat sırasında kesici kenar üzerinde etkili olan yüklerin bir sonucu olarak, temel aşınma mekanizmaları ortaya çıkmıştır. Adhezyon aşınma mekanizmasından termal, mekanik ve kimyasal yükler etkilidir. Bu aşınma mekanizmasında talaş, kesici kenar üzerine katmanlar halinde kaynaklanarak sertleşir ve takım üzerinde kalır. Bu kaynaklanma takımdan küçük parçaların kırılıp uzaklaşmasına neden olur. Bir diğer aşınma mekanizması olan difüzyon aşınmasında ise kimyasal, termal ve mekanik yükler etkilidir. Özellikle takım ve iş parçası arasındaki kimyasal uyumluluk atomik boyutta parçacık transferine neden olur. Yapılan deneylerin tamamında Adhezyon aşınma mekanizmasının belirgin etkileri ortaya çıkmış; difüzyon aşınma mekanizmasının ek olarak oluştuğu da gözlemlenmiştir. Bu iki aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak matkap kesici kenarında talaş yığılmasına bağlı olarak Built Up Edge aşınma meydana gelmiştir.

9.1.5. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi

Yüzey pürüzlülükleri iş parçası için önemli kalite göstergelerinden birisidir. Yüzey pürüzlülükleri; özellikle eşli çalışan parçaların yüksek verimlilikle çalışmaları için kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte yüzey pürüzlülükleri iş parçasının sızdırmazlık özellikleri, tribolojik özellikleri, elektrik ve ısı iletkenliği, yorulma dayanımı gibi birçok değişkene doğrudan etki etmektedir [16, 139]. Tüm bu özellikleri nedeni ile iş parçasının istenilen pürüzlülük değerlerinde üretilmesi ve bunun için uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu deneysel çalışma ile elde edilen pürüzlülük değerlerine kesme parametrelerinin etkileri Şekil 9.7.'de sunulmuştur.



Şekil 9.7. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkisi

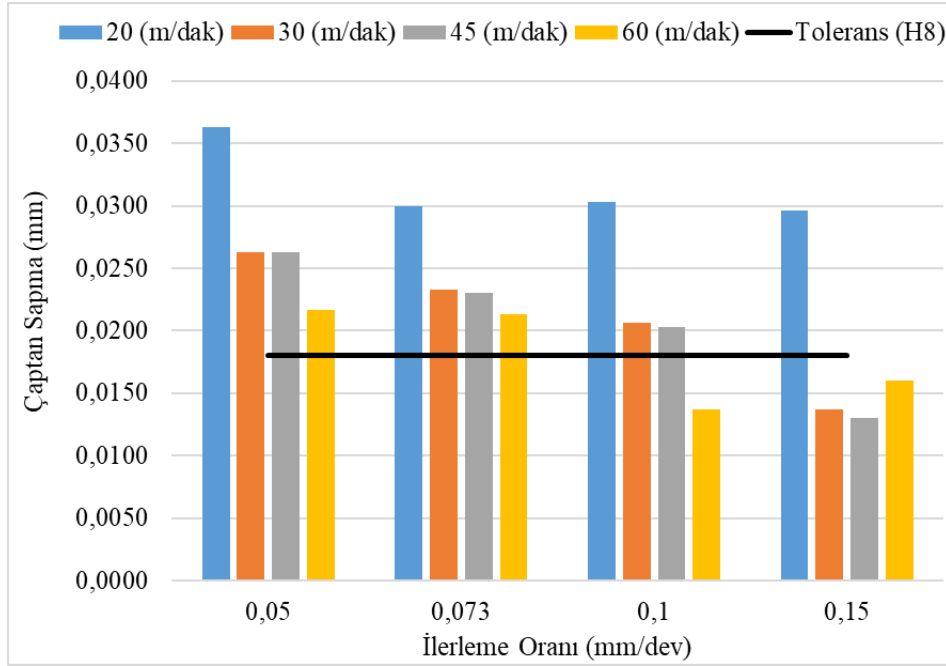
Yüzey pürüzlülüğü grafiği incelendiğinde artan ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülüklerinin de arttığı görülmektedir. 20 m/dak kesme hızında artan ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülükleri %58 oranında artarken bu değer diğer kesme hızlarında sırası ile %53, %85 ve %113 olarak hesaplanmıştır. En düşük pürüzlülük değerleri 0,05 mm/dev ilerleme oranı ile yapılan deneylerde ölçülürken, ilerleme oranının 0,15 mm/dev değerine çıkarılması ile tüm kesme hızlarında en yüksek pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Çalışma kapsamında ölçülen en düşük pürüzlülük değeri 0,05 mm/dev ilerleme oranı ve 20 m/dak kesme hızı ile yapılan deneyde $R_a = 0,72 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülüğü ise $R_a = 2,41 \mu\text{m}$ olarak en yüksek ilerleme oranı ve kesme hızı eşliğinde yapılan deneylerde ölçülmüştür.

Artan ilerleme oranlarına bağlı olarak pürüzlülük değerlerinin de artması literatürde de karşılığı olan bir durumdur. İlerleme oranının artması ile birim zamanda kaldırılan talaş hacmi artmaktadır. Bu durum kesme işlemi sırasında oluşan kuvvetleri artırdığı gibi daha zorlu bir kesme ortamı oluşturur. Bu durum yüzey pürüzlülüklerinin artmasına zemin hazırlayan etkilerden biridir. Bu duruma ek olarak artan ilerleme oranlarında talaşın matkap kenarına yapışarak yığılması kesme işlemini olumsuz etkilemektedir. Ti6Al4V malzemenin termal ve mekanik özellikleri nedeni ile ortaya çıkan bu yapışık talaş oluşumu yüzey pürüzlülüklerini önemli ölçüde artırmaktadır [107].

İlerleme oranına benzer bir şekilde, artan kesme hızlarında da yüzey pürüzlülüklerinin arttığı yapılan çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Tüm ilerleme oranlarında artan kesme hızları ile yüzey pürüzlülükleri artmıştır [103, 139]. Özellikle nispeten yüksek ilerleme oranları (0,1 ve 0,15 mm/dev) ile yapılan deneylerde artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülüklerinde %89 ve %111 oranlarında önemli bir artış görülmüştür. Bu duruma özellikle yüksek ilerleme oranları ve kesme hızları eşliğinde yapılan deneylerde görülen talaş yapışması ve bu yapışmaya bağlı olarak şekillen düşük takım performansı etkili olmuştur. Düşük kesme hızlarında talaş yapışması ve takım aşınması eğilimi düşük seviyelerde seyir ettiği için bu parametrelerin kullanıldığı deneylerde yüzey pürüzlülükleri nispeten düşük seviyelerde ölçülmüştür. Kesme hızının artması ile artan talaş yapışması ve bu yapışmaya bağlı gelişen takım aşınmaları yüzey pürüzlülüklerini olumsuz etkileyerek yüzey kalitesinin bozulmasına zemin hazırlamıştır [30].

9.1.6. Kesme parametrelerinin delik çapına etkisi

Delik çapındaki değişim değeri, iş parçası için önemli geometrik toleranslardan biridir. Eş çalışan parçaların montajında boşluklu geçmelerin önüne geçilmesi veya montajın istenilen şekilde gerçekleştirilmesi için deliklerin arzu edilen tolerans aralıklarında delinmesi gerekmektedir. Delik çaplarının istenilen boyutlarda olması için raybalama, delik büyütme, honlama vb. operasyonlar geliştirilmiştir. Ancak bu ikincil operasyonlar maliyetleri artırdığı için deliklerin tek seferde istenilen geometrik özelliklerde delinmesi arzu edilir. Delik çapı değerlerine kesme parametrelerinin etkileri bu çalışma kapsamında incelenen bir diğer konu olmuştur. Farklı operasyon parametreleri sonucunda ölçülen delik çapındaki değişim değerleri Şekil 9.8.' de sunulmuştur.



Şekil 9.8. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının delik çapındaki değişime etkisi

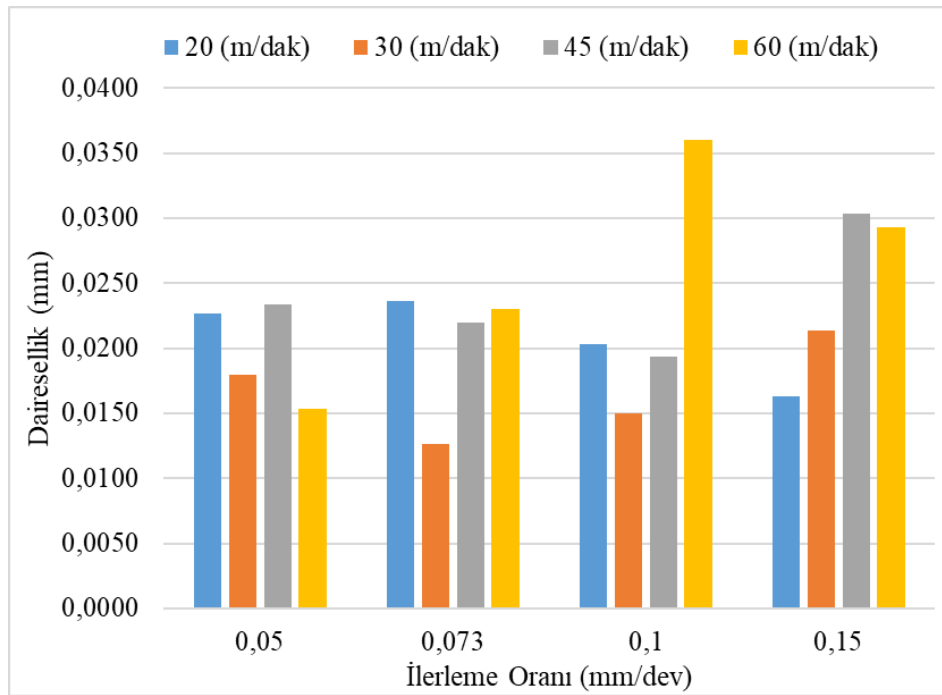
Delik çapı değişim grafiği incelendiğinde tüm deneyler sonucunda elde edilen delik çapları, nominal çap olan 6 mm'nin üstünde ölçülmüştür. Grafikte görüldüğü üzere artan ilerleme oranı ile delik çapındaki değişim değerlerinin azaldığı görülmüştür. En yüksek çaptan sapma değeri 0,0363 mm değeri ile 20 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme oranında ölçülmüştür. Artan ilerleme oranı ile delik çapındaki sapma değeri %18 oranında azalmıştır. En düşük delik çapındaki sapma değeri ise 0,15 mm/dev ilerleme oranında ve 45 m/dak kesme hızı ile yapılan deneyde 0,0130 mm olarak ölçülmüştür. Artan ilerleme oranları ile talaş tahliyesi kolaylaşmakta ve operasyon süreleri azalmaktadır. Bu durumla birlikte kesme bölgesinde oluşan yüksek ısı da kesme bölgesinden hızla uzaklaşmaktadır. Özellikle düşük ilerleme oranlarında talaşın yavaş tahliyesiyle birlikte iş parçasına ve kesici takıma geçen ısı miktarı da artmaktadır. Kesme işlemi sırasında iş parçasına geçen yüksek ısı, tolerans değerlerinin tutturulmasını zorlaştırmaktadır [112, 140, 141]. Ayrıca yüksek ilerleme oranları sayesinde hızlanan talaş tahliyesi delik çapındaki değişimlere olumlu katkılar sunmaktadır [142, 143]. Artan ilerleme oranları sayesinde talaş tahliyesinin hızlanmasına ek olarak, matkabın iş parçasına daha kolay batması sağlanmış olur [144]. Bu durum matkabın operasyon başında boşa gezinmesini azaltarak, merkezleme kabiliyetini artırmaktadır [142, 145]. Tüm bu durumların ilerleme oranının artması ile birlikte delik çapındaki değişimlerde görülen iyileşmeye zemin hazırladığı düşünülmüştür.

Değişen kesme hızlarının delik çapı değerlerine etkileri incelendiğinde, artan kesme hızları ile birlikte delik çapındaki değişim değerlerinin de azaldığı görülmüştür [146]. En yüksek çaptan sapma değerleri tüm ilerleme oranlarında 20 m/dak kesme hızında görülmüştür. Bu kesme hızlarında kesme momentlerinin de yüksek çıktığı daha önceki bölümlerde ifade edilmiştir. Söz konusu kesme hızında oluşan yüksek momentler ve düşük talaş tahliyesi hızları bu kesme hızlarında delik çapı değerlerinin yüksek çıkmasına zemin hazırlamıştır. Artan kesme hızları ile birlikte kısalan operasyon süreleri ve artan talaş tahliye hızı ile iş parçasından daha kolay talaşın kaldırılması delik çapı değişimlerinin bir nebze düşmesine neden olmuştur [142, 147]. Yüksek kesme hızlarının bir sonucu olarak açığa çıkan yüksek sıcaklıklar sayesinde sürtünme katsayıları azalarak operasyon verimliliğini artırmıştır [140]. Düşük sürtünme katsayılarının delik çapındaki değişimlere olumlu katkıları olduğu düşünülmektedir. Bunlara ek olarak yüksek devirlerde matkabın dengelenmesinin daha kolay olduğu ve yine yüksek devirlerde titreşimlerin azaldığı ifade edilmiştir [148]. En yüksek ilerleme oranı eşliğinde yapılan deneylerde 60 m/dak kesme hızı ile yapılan deneyde delik çapı değişiminin bir miktar artma olduğu görülmüştür. Takımda meydana gelen yüksek talaş yapışması ve takım hasarlarının bu şartlar altında delik çapı değerlerinin bir miktar artırdığı düşünülmektedir [146].

9.1.7. Kesme parametrelerinin dairesellik değerlerine etkisi

Delme uygulamalarında delik çapındaki değişimler kadar önemli bir diğer delik kalitesi göstergesi de dairesellik değerleridir. Deliğin tüm kesitlerinde arzu edilen dairesellikte olması eşli çalışan parçalar ve montaj uygulamaları için büyük önem taşımaktadır. Genel uygulamada deliklerde istenilen dairesellik değerlerinin elde edilmesi raybalama gibi ikincil işlemlerle mümkündür. Matkap ile delik açma uygulamalarında talaş yükünün tamamının iki ağız tarafından karşılanması, matkap için önemli bir yükü teşkil etmektedir. Raybalama işleminde, çok sayıda kesici ağız sayesinde, düşük miktardaki talaş yükü birçok ağız tarafından kaldırılmaktadır. Bu durum, ağız başına düşen yüklerin çok daha az olmasına ve üstün çap ve dairesellik toleranslarının elde edilmesine neden olmaktadır. Ancak, delik çapındaki değişim bölümünde de bahsedildiği gibi raybalama gibi ikincil işlemler operasyon sürelerini ve takım maliyetlerini önemli derecede artırmaktadır [50]. Bu yüzden matkap ile delme işleminde arzu edilen toleransların tek seferde elde edilmesi verimlilik adına önemli bir kazanımdır. Bu çalışmada kesme hızı ve ilerleme oranlarının dairesellik değerleri üzerinde etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen veriler ışığında Şekil 9.9.

hazırlanmıştır.



Şekil 9.9. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının dairesellik değerlerine etkisi

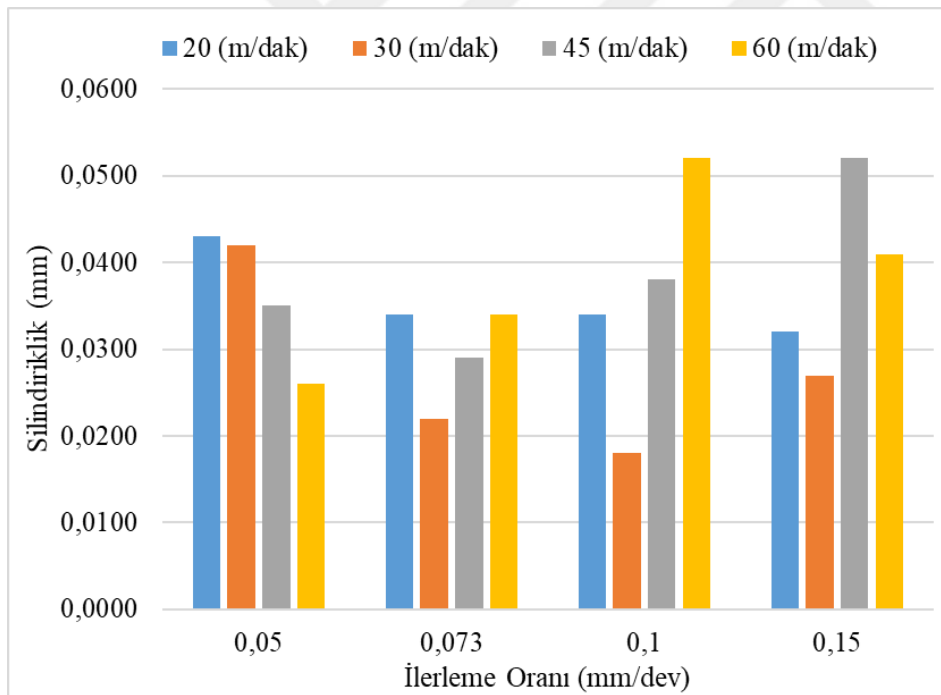
Dairesellikteki değişim grafiği incelendiğinde en düşük dairesellik değeri 0,073 mm/dev ilerleme oranı ve 30 m/dak kesme hızında 0,0127 mm olarak ölçülmüştür. En yüksek sapma değeri ise 0,036 mm olarak 0,1 mm/dev ilerleme oranı ve 60 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. 20 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde artan ilerleme oranı ile dairesellik %28 oranında azalmıştır. Artan kesme hızları ile birlikte ilerleme oranlarının da artmasıyla dairesellik değerleri artış eğilimi göstermektedir. Kesme hızları (30, 45 ve 60 m/dak) için artan ilerleme oranları ile birlikte dairesellik değerlerinde sırası ile %18, %30 ve %92 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Söz konusu bu artış artan ilerleme oranı ile birlikte ilerleme kuvvetlerinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. İlerleme kuvvetlerinin artması sonucu tezgâh fener milinin rijitliğinde meydana gelebilecek değişimler dairesellik değerlerini artırmaktadır [48, 149]. Artan kesme hızı ile birlikte talaşın yapışma ve takım aşınmaları eğilimi de artmıştır [149]. Düşük kesme hızında ise; artan ilerleme ve sıcaklıklara bağlı olarak nispeten kolaylaşan kesme işlemi, hızlanan talaş tahliyesi gibi etkiler, dairesellik değerlerinde bir nebze azalama görülmesine neden olmuştur.

Kesme hızı ve dairesellik ilişkisi değerlendirildiğinde; tüm ilerleme oranlarında artan kesme hızı ile birlikte dairesellik değerlerinde de bir artış eğilimi görülmüştür. 20 m/dak kesme hızı

ile yapılan deneylerde 30 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylere kıyasla % 20 ile % 80 arasında daha yüksek dairesellik değerleri ölçülmüştür. Bu duruma 20 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde ölçülen kısmen yüksek kesme momentlerinin neden olduğu düşünülmektedir. En yüksek ilerleme oranı (0,15 mm/dev) ile yapılan deneylerde kesme hızının artması ile dairesellik değeri %80 oranında artmıştır. Bununla birlikte kesme hızlarının 45 ve 60 m/dak' ya artması ile talaşın yapışma eğiliminin artması buna bağlı olarak artan moment ve ilerleme kuvvetleri dairesellik değerlerinin artması sonucunu doğurmuştur.

9.1.8. Kesme parametrelerinin silindiriklik değerlerine etkisi

Silindiriklik değerleri; delik çapı değişimi ve dairesellik değerlerinde olduğu gibi delik için kritik öneme sahip geometrik toleranslardan biridir. Kesme parametrelerinin silindiriklik değerlerine olan etkileri Şekil 9.10.'de sunulmuştur.



Şekil 9.10. Kesme hızı ve ilerleme oranlarının silindiriklik değerlerine etkisi

Şekil 9.10. değerlendirildiğinde en düşük silindiriklik değeri 0,1 mm/dev ilerleme oranı ve 30 m/dak kesme hızı eşliğinde yapılan deneylerde 0,018 mm olarak ölçülmüştür. En yüksek sapma değeri ise 0,052 mm olarak 60 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme oranı ile yapılan deneyde ve 45 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme oranı altında yapılan deneyde elde edilmiştir. İlerleme oranının artması ile düşük kesme hızlarında (20 ve 30

m/dak) silindiriklik değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Söz konusu şartlarda sırasıyla silindiriklik değerleri %29 ve %36 değerlerinde azalmıştır. Ancak kesme hızlarındaki artış ile birlikte (45 ve 60 m/dak) silindiriklik değerleri de artış eğilimine girmiştir. 45 m/dak ve 60 m/dak kesme hızları altında artan ilerleme oranı ile silindiriklik değerleri sırası ile %53 ve %58 oranlarında artmıştır. Nispeten yüksek kesme hızlarında artan ilerleme oranları ile birlikte artan ilerleme kuvvetleri ve kesme momentleri ile beraber zorlaşan talaş tahliyesi bu artışa zemin hazırlamıştır [48, 150]. Özellikle talaşın helis kanallarına yapışması ile kesme momentlerinde görülen yüksek frekanslı değişim silindiriklik değerlerinin artmasına neden olmuştur.

Değişen kesme hızlarının da silindiriklik üzerinde etkileri Şekil 9.10. ile görülmektedir. Düşük ilerleme hızları altında (0,05 mm/dev) artan kesme hızları ile birlikte silindiriklik değerleri %40 oranında azalmıştır. Bu duruma artan kesme bölgesi sıcaklığı ile bir miktar azalan ilerleme kuvvetleri ve kesme momentlerinin neden olduğu düşünülmektedir. İlerleme oranlarının artması ile birlikte artan kesme hızlarıyla silindiriklik değerleri de %63 oranında artmıştır. Özellikle 20 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde sapma değerlerinin yüksek çıkması yine bu kesme hızı ile yapılan deneylerde elde edilen yüksek kesme momentleri ile açıklanmaya çalışılmıştır. Öte yandan artan kesme hızları ile birlikte oluşan talaş yapısı ve zorlaşan kesme koşulları bu değerler ile yapılan deneylerde daha yüksek sapma değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur.

9.2. Deneysel Verilerin YSA ile Modellenmesi

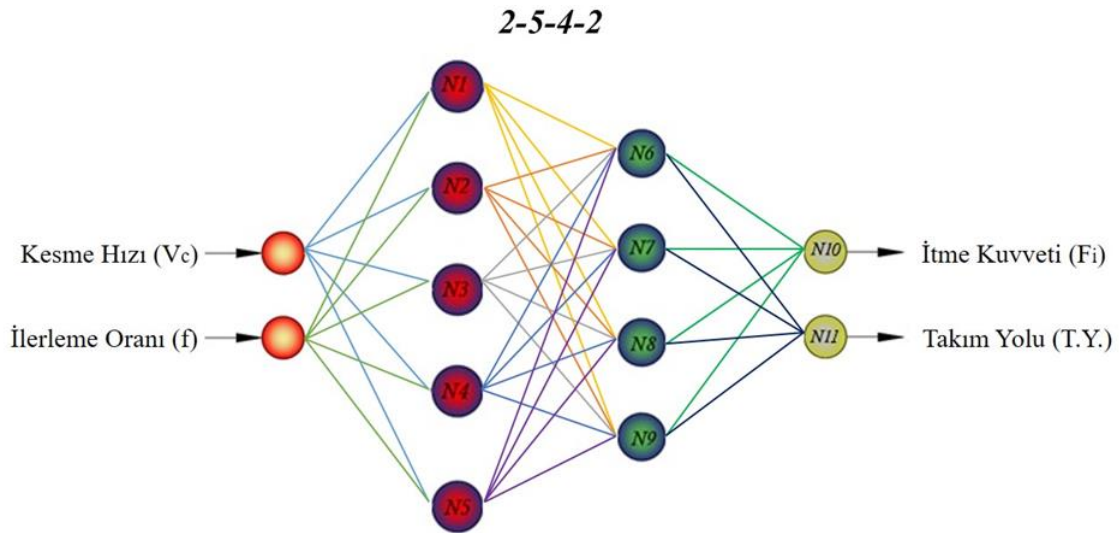
Verilerin modellenerek farklı girdi kombinasyonları için elde edilecek sonuçların tahmin edilebilmesi deneysel çalışmalarda büyük önem taşımaktadır. Seçilecek ara değerler sonucunda elde edilecek çıktıların bilinmesi deneysel çalışmanın kapsamını çok genişletecektir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel veriler modellenerek çalışma kapsamı genişletilmiştir. Bu modelleme işlemi yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler sınıflandırılarak üretim maliyetlerine ve ürün kalitesine yönelik çıktılar belirlenmiştir. Yapay sinir ağları ile yapılan modellemede de yine operasyon maliyetleri ve ürün kalitesi dikkate alınarak iki farklı model geliştirilmiştir. Operasyon maliyetleri dikkate alınarak geliştirilen yapay sinir ağı modelinde; modellenen çıktı değerleri ilerleme kuvveti

ve takımın aldığı yol olarak belirlenmiştir. İlerleme kuvvetlerinin büyüklüğü operasyon sırasında sarf edilen enerjinin bir ölçütüdür. Takımın aldığı yol değerinin büyüklüğü ise; takım performansı ve dolayısı ile takım maliyetlerinin bir karşılığıdır. Ürün ya da delik kalitesinin ön planda tutulduğu ikinci yapay sinir ağı modelinde ise; yüzey pürüzlülüğü ve delik çapındaki değişim değerleri modellenen çıktılar olarak belirlenmiştir. Yüzey kalitesi için yüzey pürüzlülüğü kritik öneme sahip iken boyutsal toleranslar açısından delik çapındaki değişim değeri büyük öneme sahiptir. Her iki modelde de girdi değerleri kesme hızı ve ilerleme oranı olarak belirlenmiştir.

9.2.1. Operasyon maliyetleri için YSA modeli

Operasyon maliyetleri dikkate alınarak geliştirilen yapay sinir ağları modelinde on altı deney verisi kullanılmıştır. Bu veriler kuru şartlarda, dört farklı kesme hızı ve ilerleme oranı kullanılarak elde edilen deneysel verilerdir. Bu verilerden on dört tanesi yapay sinir ağları modelinin öğrenme aşamasında, iki tanesi (6 ve 11 nolu deneyler) ise test aşamasında kullanılmıştır. Girdi verileri için ideal ağ yapısı belirlenmiş ve ağırlık oranları yazılım tarafından hesaplanmıştır. Söz konusu ağ yapısı on bir eleman ile “2-5-4-2” şeklinde belirlenmiş ve Şekil 9.11.’de sunulmuştur.



Şekil 9.11. Operasyon maliyetleri için geliştirilen ağ yapısı

Geliştirilen YSA modeline göre ilerleme kuvveti ve takımın aldığı yol değerlerinin tahmininde kullanılan giriş - birinci katman ağırlık değerleri (j:1,2,3,4 ve 5) ve birinci - ikinci katman ağırlık değerleri (k: 6,7,8 ve 9) Çizelge 9.1.’de verilmiştir. Ayrıca bu katmanlar için

oluşturulan denklemler de NET_{j(1-5)} ve NET_{k(6-9)} Çizelge 9.1.' de verilmiştir.

Çizelge 9.1. Operasyon maliyetleri için geliştirilen ağ modeli verileri

$NET_{j(1-5)} = w_{1j} * V_c + w_{2j} * f$					
j	w_{1j}	w_{2j}			
<i>Giriş ve ilk gizli katmanlar arasındaki ağırlık değerleri</i>					
1	0.589771	-2.713242			
2	-1.424403	0.279803			
3	-0.932841	0.258088			
4	-2.687148	0.488385			
5	-0.530498	0.752861			
$NET_{k(6-9)} = w_{1k} * F_1 + w_{2k} * F_2 + w_{3k} * F_3 + w_{4k} * F_4 + w_{5k} * F_5$					
k	w_{1k}	w_{2k}	w_{3k}	w_{4k}	w_{5k}
<i>Birinci ve ikinci gizli katmanlar arasındaki ağırlık değerleri</i>					
6	1.224440	0.884662	2.196824	0.846166	0.103093
7	-0.704997	0.661776	0.092102	2.717719	0.075146
8	1.006334	-0.880672	0.750385	-0.643262	-0.365673
9	0.343181	-1.632271	-1.414605	-2.168180	1.645611

Kesme hızı ve ilerleme oranı girdi değerleri için oluşturulan modelde fermi transfer fonksiyonu ile ilerleme kuvveti (F_i) ve takım yolu (T.Y.) çıktıları için Eş. 9.1 ve Eş. 9.2 geliştirilmiştir.

$$F_i = 1 + e^{(-4*)} (-1.512949 * F_6 + 2.072499 * F_7 - 0.579549 * F_8 + 2.394918 * F_9) \quad (9.1)$$

$$T.Y. = 1 + e^{(-4*)} (1.675852 * F_6 + 1.654181 * F_7 - 0.941067 * F_8 - 3.211983 * F_9) \quad (9.2)$$

Yapılan YSA çalışmaları sonucunda geliştirilen modelin belirlilik katsayısı (R^2), hata kareleri ortalaması (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) belirlenmesi gerekmektedir. Bu veriler geliştirilen modelin başarısı hakkında bilgiler vermektedir. R^2 değerinin yüksek, RMSE ve MAPE değerlerinin düşük değerler alması arzu edilir. Geliştirilen model için hesaplanan R^2 , RMSE ve MAPE değerleri Çizelge 9.2. 'de verilmiştir.

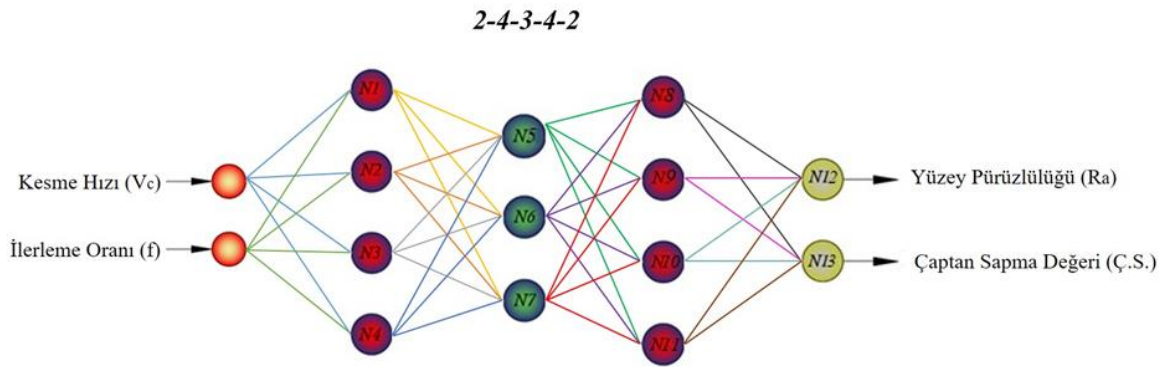
Çizelge 9.2. Operasyon maliyetleri için geliştirilen modele ait doğruluk göstergeleri

	R^2	RMSE	MAPE
İlerleme Kuvveti (Fi)	0,99164	0,84029	11,2974
Takımın Aldığı Yol (T.Y.)	0,99683	0,9281	13,782

Geliştirilen modelin performans değerleri (R^2 , RMSE ve MAPE), modelin çıktıları (ilerleme kuvveti ve takımın aldığı yol) tahmin etme konusunda başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

9.2.2. Ürün (Delik) kalitesi için YSA modeli

Ürün kalitesinin ön planda tutulduğu YSA modelinin geliştirilmesinde de bir önceki modelde olduğu gibi on altı deney verisi kullanılmıştır. Bu verilerin on dördü modelin öğrenme aşamasında iki tanesi (4 ve 5 nolu deneyler) ise test aşamasında değerlendirilmiştir. Girdi verileri dikkate alınarak en uygun ağ yapısı ve ağırlık oranları Phyta yazılımınca hesaplanmıştır. Ürün kalitesi için geliştirilen ağ yapısı, on üç elemandan oluşmakta ve 2-4-3-4-2 dizilimine sahiptir. Ürün kalitesi için belirlenen bu ağ yapısı Şekil 9.12.' de verilmiştir.



Şekil 9.12. Ürün (delik) kalitesi için geliştirilen ağ yapısı

Yüzey pürüzlülüğü ve delik çapı değişim değerlerinin çıktı olarak belirlendiği bu modelde giriş - birinci katman arası ağırlıklar (j : 1,2,3 ve 4), birinci – ikinci katman arası ağırlıklar (k :5,6 ve 7) ve ikinci – üçüncü katman arası ağırlıklar (l :8,9,10 ve 11) değerleri Çizelge 9.3.'de sunulmuştur. Çizelge 9.3.'de ek olarak bu katmanlar kullanılarak hesaplanan $NET_j(1-4)$, $NET_k(5-7)$ ve $NET_l(8-11)$ denklemleri de verilmiştir.

Çizelge 9.3. Ürün (delik) kalitesi için geliştirilen ağ modeli verileri

$NET_{j(1-4)} = w_{1j} * V_c + w_{2j} * f$					
j	w_{1j}	w_{2j}			
<i>Giriş ve ilk gizli katmanlar arasındaki ağırlık değerleri</i>					
1	-0,714367	3,404989			
2	-0,667140	-0,001755			
3	3,902817	-2,905917			
4	0,637822	0,240260			
$NET_{k(5-7)} = w_{1k} * F_1 + w_{2k} * F_2 + w_{3k} * F_3 + w_{4k} * F_4$					
k	w_{1k}	w_{2k}	w_{3k}	w_{4k}	
<i>Birinci ve ikinci gizli katmanlar arasındaki ağırlık değerleri</i>					
5	0,496183	2,323815	-0,804194	-0,770826	
6	-1,352272	4,114837	-0,845672	1,985610	
7	-0,264428	-6,794969	-1,498783	3,308288	
$NET_{l(8-11)} = w_{1l} * F_5 + w_{2l} * F_6 + w_{3l} * F_7$					
l	w_{1l}	w_{2l}	w_{3l}		
<i>İkinci ve üçüncü gizli katmanlar arasındaki ağırlık değerleri</i>					
8	-1,193802	-3,349603	1,692285		
9	0,390290	-0,003192	0,118034		
10	0,301210	1,746796	-2,004028		
11	-3,155755	-1,850182	0,758618		

Fermi transfer fonksiyonunun kullanıldığı model ile yüzey pürüzlülüğünün ve delik çapı değişim değerlerinin tahminine yönelik Eş. 9.3 ve Eş. 9.4 geliştirilmiştir.

$$Ra = 1 + e^{(-4*)} (-0,067853 * F_8 + 1,658206 * F_9 - 0,969538 * F_{10} + 1,80499 * F_{11}) \quad (9.3)$$

$$Ç.S. = 1 + e^{(-4*)} (-1,445268 * F_8 + 1,928452 * F_9 + 1,407713 * F_{10} + 1,737843 * F_{11}) \quad (9.4)$$

Ürün kalitesine yönelik geliştirilen YSA modelinin mutlak belirlilik katsayısı (R^2), hata kareleri ortalaması (RMS) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) bilinmesi modelin başarısının önemli bir ölçütüdür. Modelin R^2 , RMSE ve MAPE değerleri Çizelge 9.4. 'de verilmiştir.

Çizelge 9.4. Ürün (delik) kalitesi için geliştirilen modele ait doğruluk göstergeleri

	R^2	RMSE	MAPE
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	0,99323	0,79067	10,0026
Delik Çapı Değeri (Ç.S.)	0,99777	0,74575	8,89833

Geliştirilen modelin performans değerleri, modelin çıktıları (yüzey pürüzlülüğü ve delik çapı değişim değerleri) tahmin etme konusunda başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

9.3. Farklı Soğutma Yöntemleri Eşliğinde Yapılan Deneyler

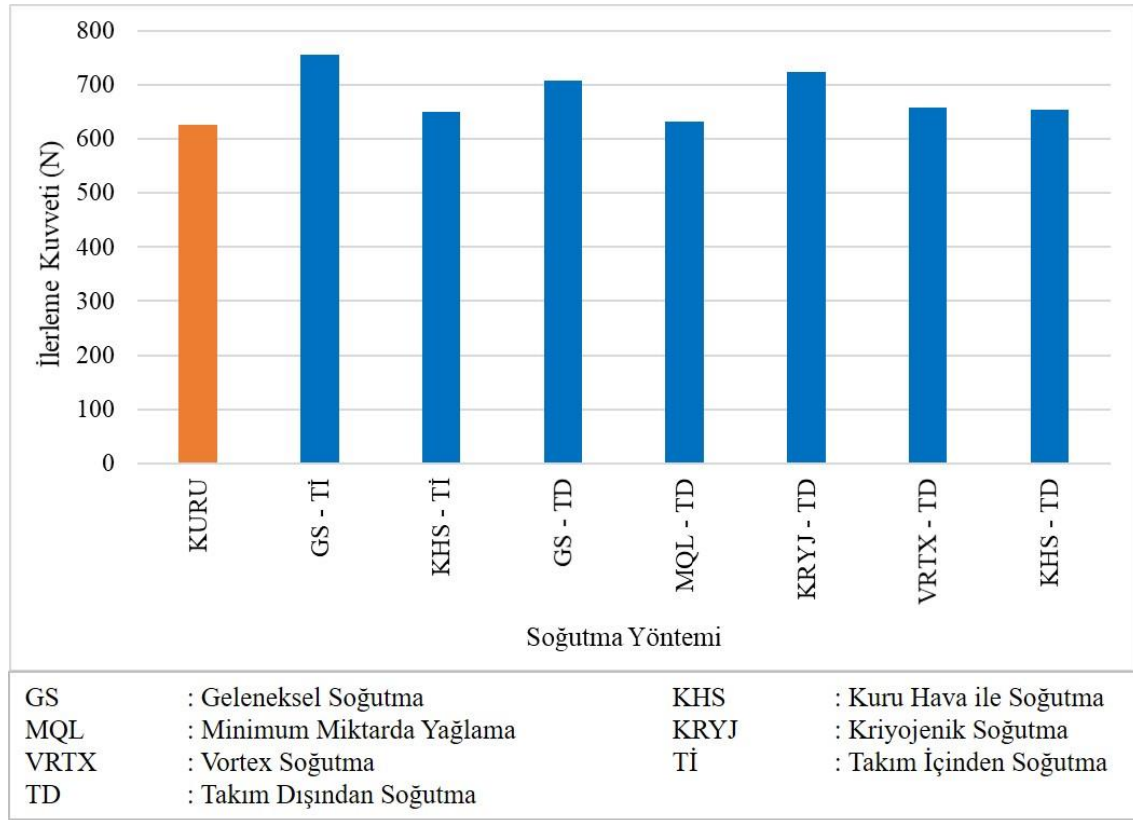
Soğutma işlemi; talaşlı imalat uygulamalarında verimliliğin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Soğutma ve yağlama gibi iki temel özelliği olan soğutma uygulamalarının talaş kesme bölgesinden etkili bir şekilde uzaklaştırmak gibi olumlu etkileri de vardır. Bununla birlikte soğutucu maliyetleri ve soğutma sıvılarının çevre ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri soğutma yöntemleri üzerinde araştırmalar yapmayı gerekli kılmıştır [8]. Bu araştırmalarda temel amaç soğutma işleminin avantajlarını muhafaza ederek dezavantajlarını minimize etmektir. Bu amaç doğrultusunda farklı soğutucu akışkanların farklı uygulamalarla kullanıldığı çeşitli soğutma yöntemleri açığa çıkmıştır. Bu çalışmada farklı soğutma yöntemlerinin delme operasyonuna olan katkıları araştırılmıştır. Bu araştırma çerçevesinde geleneksel soğutma (GS), kuru hava ile soğutma (KHS), vortex soğutma (VRTX), minimum miktarda yağlama ile soğutma (MQL) ve Kriyojenik soğutma (KRYJ) yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden geleneksel soğutma ve kuru hava ile soğutma uygulamaları takım içinden (Tİ) ve takım dışından (TD) olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmıştır.

Tüm soğutma yöntemleri aynı kesme koşullarında (40 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme oranı) test edilmiştir. Çalışmalar sırasında GS – Tİ, KHS – Tİ, VRTX – TD ve KHS – TD 10 bar, KRYJ – TD 5 bar, MQL – TD 4 bar ve GD – TD 3 bar basınç ile uygulanmıştır. Aynı kesme koşullarında ve kuru şartlarda elde edilen verilere referans değer olarak grafiklerde yer verilmiştir.

9.3.1. Soğutma yöntemlerinin ilerleme kuvvetine etkisi

Farklı soğutma yöntemleri eşliğinde gerçekleştirilen deneylerde elde edilen ilerleme kuvveti

değerleri Şekil 9.13.' de sunulmuştur.



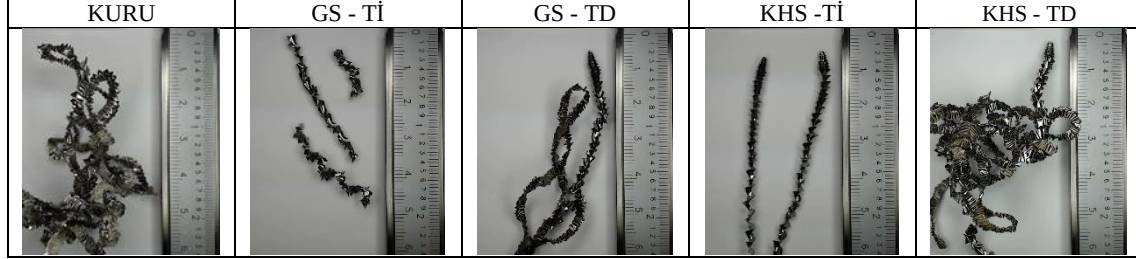
Şekil 9.13. Farklı soğutma yöntemlerinin ilerleme kuvvetine etkisi

Farklı soğutma yöntemleri ve ilerleme kuvveti grafiği incelendiğinde tüm soğutma yöntemlerinde elde edilen kuvvet değerlerinin kuru kesme şartlarında elde edilen kuvvet değerlerinden fazla olduğu görülmektedir. En düşük kuvvet oluşumu minimum miktarda yağlama ile soğutma (MQL) uygulamasında 632,6 N, en yüksek kuvvet oluşumu ise 755,8 N ile takım içinden yapılan geleneksel soğutma yönteminde (GS-Tİ) ölçülmüştür.

Geleneksel soğutma yönteminin takım içinden (GS-Tİ) uygulandığı deneyde en yüksek ilerleme kuvveti görülmüştür. Geleneksel soğutma uygulaması hem soğutma hem de yağlama açısından diğer soğutma yöntemlerinden bir adım öne çıkmaktadır. Takım içinden yapılan etkili soğutma ile kesme bölgesi sıcaklıkları önemli oranda düşmektedir. Diğer soğutma yöntemlerine göre kesme bölgesi sıcaklıklarının nispeten düşük olması, malzemenin üstün mekanik özelliklerini sergilemesine fırsat vermiş ve kesme kuvvetleri diğer soğutma yöntemlerine göre yükselmiştir [127, 151]. Bu duruma ilave olarak soğutma sıvısının yüksek basıncı da ölçülen kuvvet değerlerinin yükselmesine neden olduğu

düşünülmektedir.

Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma uygulaması ile talaş boyutlarının küçüldüğü ve etkili bir talaş tahliyesinin gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Resim 9.6. Takım içinden yapılan soğutmanın talaş boyutlarına etkisi

Kriyojenik soğutma yönteminin kullanıldığı deneyde ilerleme kuvveti 724,2 N olarak ölçülmüştür. Bu değer en yüksek ikinci kuvvet değeri olarak belirlenmiştir. Kriyojenik soğutma uygulamasında gerçekleşen aşırı soğuma neticesinde kesme bölgesi sıcaklıklarının da belirgin bir şekilde düşmesi ilerleme kuvvetlerinin yükselmesine neden olmuştur [127, 152]. Geleneksel soğutma uygulamasında soğutma sıvısı basıncının kuvvete olan katkısından söz edilmişti. Bu yöntemde soğutucu akışkanın (LN_2) takım dışından ve nispeten düşük basınçta uygulanması, kuvvetler üzerinde benzer bir katkının oluşmasının önüne geçmiştir. Bu durum Kriyojenik soğutmanın takım içinden uygulanan geleneksel soğutmanın gerisinde kalmasına neden olmuştur.

Bu yöntemde de talaşın küçük parçacıklar halinde kesme bölgesinden uzaklaştığı görülmüştür. Özellikle düşük sıcaklıkların talaşın kırılgenliğini artırdığı düşünülmüştür.

Geleneksel soğutma yönteminin takım dışından (GS - TD) uygulandığı deneyde ilerleme kuvveti 707,9 N olarak ölçülmüştür. Bu yöntemde soğutmanın takım dışından uygulanması soğutma sıvısının kesme bölgesine ulaşmasını zorlaştırmıştır. Bu durum kesme bölgesi sıcaklıklarının önceki iki soğutma yöntemine göre bir nebze artmasına neden olmuştur. Böylece kesme kuvvetleri biraz da olsa düşmüştür. Buna ek olarak Kriyojenik soğutmada da olduğu gibi soğutmanın takım dışından yapılması soğutma sıvısı basıncının kuvvetler üzerindeki etkisini sınırlandırmıştır.

Takım dışından yapılan soğutma uygulamasında matkap helis kanalları üzerinden talaş tahliyesi gerçekleştirildiği için kesme bölgesine etkili bir soğutma

gerçekleştirilememektedir. Bu durum sıcaklıkların ve talaşın takıma yapışma eğilimini artırmaktadır.

Vortex tüp sayesinde elde edilen soğutulmuş havanın kesme bölgesine gönderilmesi ile gerçekleşen soğutma (VRTX) işlemi ile yapılan deneyde 657,9 N ilerleme kuvveti belirlenmiştir. Önceki soğutma yöntemleri ile kıyaslandığında vortex ile soğutma yöntemi hem soğutma hem de yağlama açısından geride kalmıştır. Kesme bölgesindeki yetersiz soğutmaya bağlı oluşan yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ilerleme kuvvetlerinin önceki soğutma yöntemlerine kıyasla daha düşük olmasına zemin hazırlamıştır. Artan kesme bölgesi sıcaklıkları ile malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişim bu duruma zemin hazırlamıştır.

Vortex tüp ile elde edilen soğuk hava takım dışından operasyonla aynı yönde (yukarı – aşağı) uygulanmıştır. Delme işleminin doğası gereği talaş, operasyona zıt yönde (aşağıdan – yukarı) tahliye edilmektedir. Takım dışından uygulanan soğutma, talaşın hareket yönüne ters yönde olduğu için talaş çıkışını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle talaşın takım üzerindeki olumsuz etkileri ve yapışma eğilimi artmaktadır. Bu durumun ilerleme kuvvetlerini bir miktar artırdığı düşünülmektedir.

Takım dışından kuru hava ile yapılan soğutma uygulamasında (KHS - TD) ilerleme kuvveti 654,8 N olarak ölçülmüştür. Kuru hava ile takım dışından yapılan soğutma uygulamasında vortex tüp ile yapılan soğutma uygulamasına benzer bir kuvvet değeri elde edilmiştir. İki soğutma yöntemi de içerik ve uygulanış olarak bir birine yakın özellikler göstermektedir.

Kuru havanın takım içinden uygulanması (KHS - Tİ) ile ilerleme kuvveti 649,6 N değerine düşmüştür. Kuru hava; soğutma ve yağlama açısından diğer soğutucu akışkanlardan geri planda kalmaktadır. Bu yüzden kesme bölgesi sıcaklıkları geleneksel soğutmaya oranla yüksek kalmaktadır. Bu durum geleneksel soğutma uygulamalarına göre daha düşük ilerleme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmuştur. Ancak takım dışından kuru hava ile soğutma ve vortex ile soğutma yöntemlerine göre doğrudan kesme bölgesine etki etmesi nedeniyle takım içinden kuru hava ile soğutma yöntemini soğutma açısından avantajlı kılmıştır. Takım içinden yapılan soğutma neticesinde soğutucu akışkan talaş akış yönünde (aşağıdan - yukarıya) kesme bölgesini terk etmektedir. Bu durum talaş tahliyesini hızlandırmakta, talaşı daha hızlı soğutmakta ve talaşın daha küçük parçalar halinde

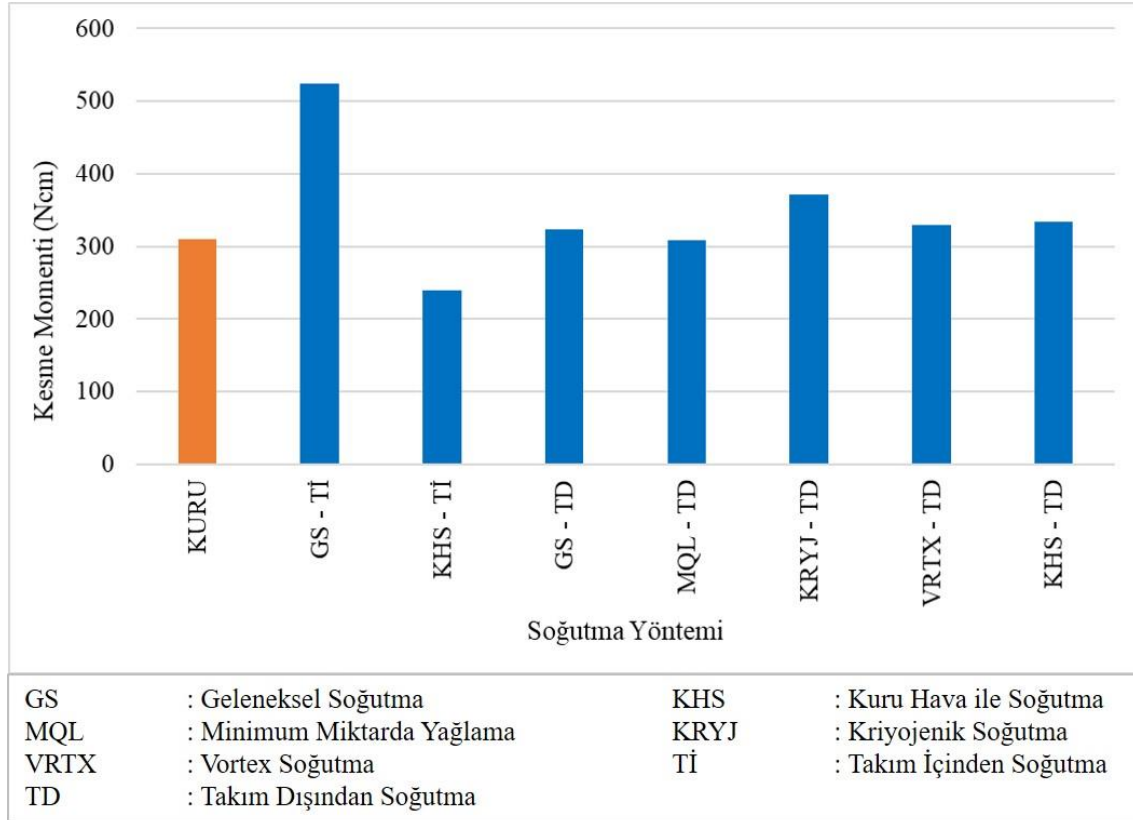
çıkmasına neden olmaktadır. Bu durumun da kuvvetlerin düşmesinde önemli bir rolü olduğu düşünülmektedir. Özellikle takım dışından kuru hava ile soğutma ve vortex soğutma uygulamasına göre daha düşük sıcaklıklara rağmen daha düşük kuvvetlerin oluşmasına bu durumun neden olduğu düşünülmüştür. Buna ek olarak takım içinden 10 bar basınç ile uygulanan soğutucu akışkanın (kuru hava) basıncı etkisiyle kuvvetlerin bir nebze yükseldiği düşünülmektedir. Bu durum takım dışından yapılan kuru hava ile soğutma ve vortex ile soğutma değerlerinde ölçülen kuvvet değerlerine yakın bir kuvvet değerinin elde edilmesine neden olmuştur.

Minimum miktarda yağlama uygulamasının takım dışından uygulandığı (MQL - TD) soğutma işleminde en düşük ilerleme kuvveti (632,6 N) ölçülmüştür. Minimum miktarda yağlama operasyonu kuru havanın kesme yağı ile desteklendiği bir soğutma yöntemidir. Böylece kuru havanın yağlama etkisi artırılmıştır. Yağlama katkısı ile birlikte takım – talaş arasında bir yağ filmi oluşmuş ve bu durum takım ve talaş arasındaki teması ve yapışma eğilimini düşürmüştür [7, 127]. Bu duruma ilaveten takım dışından yapılan soğutma uygulaması kesme bölgesi sıcaklıklarının takım dışından kuru hava soğutma ve vortex soğutma ile benzer seviyelerde olmasına neden olmuştur. Bu yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları da ilerleme kuvvetlerinin düşmesine zemin hazırlamıştır. Kesme bölgesinde oluşan bu sıcaklık oluşumu, takım içinden kuru hava ile soğutma yöntemine göre daha düşük sıcaklıkların elde edilmesine yol açmıştır.

Minimum miktarda yağlama ile yapılan soğutma yönteminin uygulama basıncının (4 bar) takım dışından yapılan kuru hava ile soğutma ve vortex soğutma yönteminde kullanılan basınçtan (10 bar) daha düşük olması talaş tahliyesini kısmen kolaylaştırmıştır. Talaşın düşük basınç ile kısmen daha rahat akması ve yağlama etkisi diğer iki yöntemle göre bu yöntemde kuvvetlerin bir nebze düşmesine neden olmuştur.

9.3.2. Soğutma yöntemlerinin kesme momentlerine etkisi

Farklı soğutma şartlarında yapılan deneyler sonucunda belirlenen kesme momentleri Şekil 9.14.' de sunulmuştur.



Şekil 9.14. Farklı soğutma yöntemlerinin kesme momentlerine etkisi

Kesme Momentleri incelendiğinde takım içinden uygulanan kuru hava ile soğutma uygulamalarında (KHS - Tİ) kuru şartlara kıyasla daha düşük moment değerleri ölçülmüştür. Minimum miktarda yağlama (MQL) eşliğinde yapılan çalışmada kuru koşullar ile benzer moment değerleri belirlenmiştir. Bunun dışında kalan tüm soğutma yöntemlerinde ölçülen kesme momentleri kuru şartlardan yüksek olmuştur. Deneysel çalışmalar neticesinde en yüksek kesme momenti 524,3 Ncm olarak geleneksel soğutmanın takım içinden uygulandığı (GS - Tİ) soğutma şartlarında elde edilmiştir. En düşük kesme momenti ise 239,1 Ncm ile takım içinden uygulanan kuru hava ile soğutma yönteminde belirlenmiştir.

Geleneksel soğutmanın takım içinden uygulandığı kesme şartlarında en yüksek kesme momenti ölçülmüştür. Söz konusu şartlarda ortaya çıkan yüksek ilerleme kuvvetlerinin ve düşük kesme bölgesi sıcaklıklarında malzemenin sergilediği yüksek dayanımın bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Bu duruma ek olarak yüksek basınç ile kesme bölgesine gönderilen soğutma sıvısının uyguladığı basınç da moment değerlerini bir miktar artırmıştır.

Kriyojenik soğutma eşliğinde yapılan deneyde kesme momenti 371,4 Ncm ölçülmüştür.

Aynı kesme şartlarında ölçülen yüksek ilerleme kuvvetleri ölçülen moment değerlerinin de yüksek çıkmasına zemin hazırlamıştır [153]. Kriyojenik soğutmanın oluşturduğu düşük sıcaklık değerleri de kesme şartlarını zorlaştırarak kesme momentlerinin yüksek çıkmasına zemin hazırladığı kanaati oluşmuştur.

Takım dışından kuru hava ile yapılan soğutma uygulaması ve vortex tüp ile yapılan soğutma uygulamalarında elde edilen kesme momentleri sırası ile 333,7 Ncm ve 330,2 Ncm 'dir. Bu iki soğutma yönteminde de kuru kesme şartlarına göre elde edilen kesme momentleri bir miktar artmıştır. Söz konusu soğutma şartlarında, kuru kesme koşullarına kıyasla daha fazla ölçülen ilerleme kuvvetleri bu artışa neden olmuştur. Ayrıca talaş tahliyesinde yaşanan güçlükler ve talaşın takıma yapışma eğilimi bu duruma zemin hazırlamıştır [127]. Diğer yandan takım içinden uygulanan geleneksel soğutma ve Kriyojenik soğutma şartlarına kıyasla moment değerleri düşmüştür. Bu düşüşün de temelinde yine ilerleme kuvvetlerinde meydana gelen değişim ve yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları gelmektedir.

Takım dışından yapılan geleneksel soğutma uygulamasında 324,2 Ncm kesme momenti ölçülmüştür. Geleneksel soğutma uygulamalarında kullanılan soğutma sıvılarının üstün soğutma ve yağlama özellikleri mevcuttur. Takım dışından uygulanan geleneksel soğutmada, takım dışından kuru hava ile soğutma ve vortex soğutma yöntemlerine göre oluşan düşük sıcaklıklara bağlı olarak ilerleme kuvvetleri artmıştır. Yüksek ilerleme kuvvetine rağmen takım dışından yapılan geleneksel soğutmanın yağlama özellikleri takım üzerinde bir film tabakası oluşturarak takım – talaş temasını sınırlandırır. Bu durum talaş tahliyesini kolaylaştırır ve talaşın yapışma eğilimini diğer iki yöntemle göre (KHS - TD ve VRTX) önemli ölçüde azaltır. Böylece moment değerlerinin bir miktar düşük çıkması sağlanmış olur.

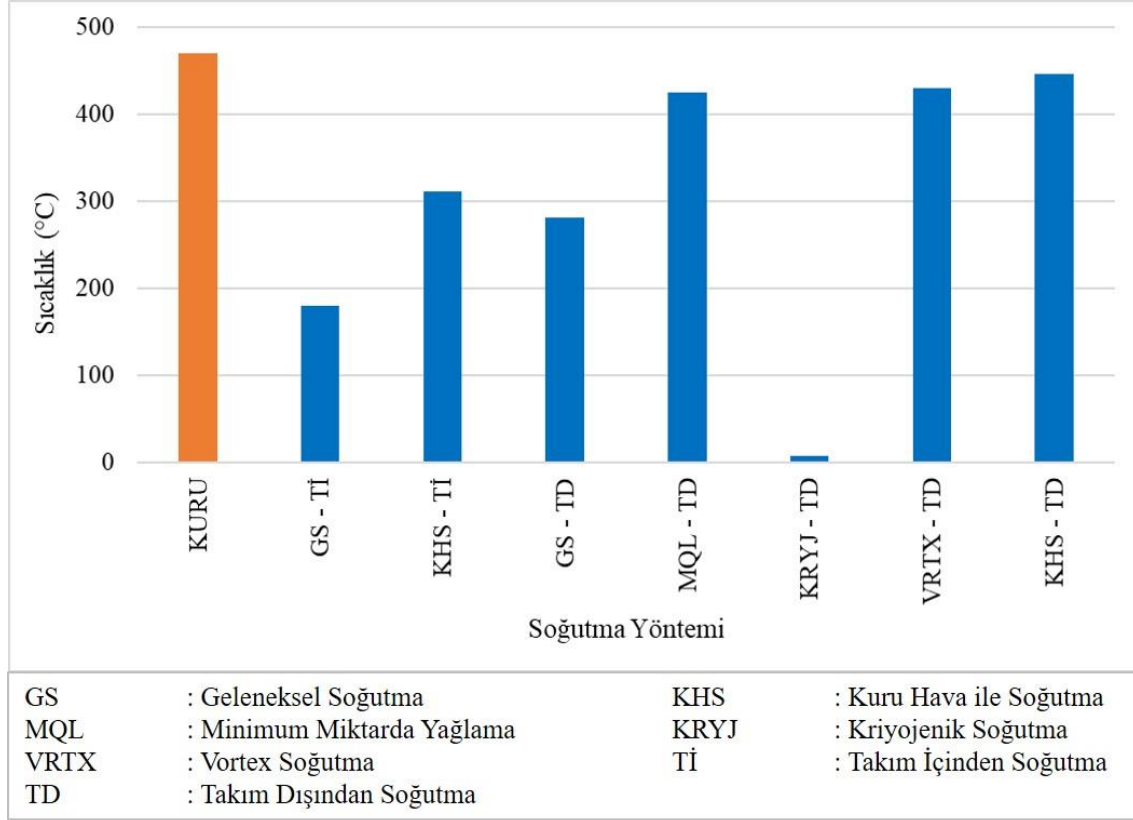
Minimum miktarda yağlama yönteminin eşlik ettiği deneysel çalışmada 308,2 Ncm kesme momenti ölçülmüştür. Minimum miktarda yağlama ile yapılan soğutma işleminde de takım dışından yapılan geleneksel soğutmaya benzer bir durum mevcuttur. Minimum miktarda yağlama uygulaması yağlama özelliği üstün bir soğutma yöntemidir. Söz konusu etkili yağlama momentin bir miktar düşmesine neden olmuştur. Ayrıca takım dışından yapılan geleneksel soğutmaya göre daha düşük olan ilerleme kuvvetleri de moment değerinin takım dışından yapılan geleneksel soğutmaya göre düşük çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Takım içinden yapılan kuru hava ile soğutma yönteminde en düşük kesme momenti 239,13 Ncm olarak ölçülmüştür. Takım içinden yapılan basınçlı hava ile soğutma sayesinde talaş tahliyesi hızlanmış, talaşların daha küçük parçalar halinde kesme bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Bu durum talaş yapışma eğilimini de azaltmıştır. Bununla birlikte kuru hava ile soğutma yönteminin takım içinden uygulanması, talaşı hızla soğutarak yapışma için kritik sıcaklık seviyesinin altında tutmaktadır. Bu durum, moment değerlerinde belirgin bir azalmaya neden olmuştur.

Bu kesme şartlarında ölçülen ilerleme kuvvetleri de minimum miktarda yağlama ile soğutma şartlarından bir miktar yüksektir. Takım içinden uygulanan kuru hava ile soğutma uygulamasında daha yüksek ilerleme kuvvetlerine rağmen daha düşük moment değerleri elde edilmiştir. Kesme bölgesine yüksek basınçla takım içinden yapılan soğutmanın ilerleme kuvvetine olan etkisi bu duruma neden olmuştur.

9.3.3. Soğutma yöntemlerinin sıcaklık değişimine etkisi

Soğutma yöntemlerinin delme uygulaması üzerindeki etkinliğinin araştırıldığı çalışmada ölçülen sıcaklık değerlerinin değişimi Şekil 9.15.' de sunulmuştur.



Şekil 9.15. Farklı soğutma yöntemlerinin sıcaklık değerlerine etkisi

Aynı kesme şartlarında farklı soğutma yöntemleri ile yapılan bir dizi deney sonucunda ölçülen tüm sıcaklık değerleri kuru şartlarda ölçülen sıcaklık değerinden daha düşüktür. En düşük sıcaklık değeri Kriyojenik soğutma (KRYJ) eşliğinde 7,7 °C olarak ölçülmüştür. En yüksek sıcaklık değeri ise takım dışından kuru hava ile gerçekleştirilen soğutma (KHS - TD) yönteminde 445,4 °C olarak ölçülmüştür.

Kriyojenik soğutma uygulaması takım dışından -40 °C değerinde uygulanmıştır. Soğutucu akışkanın bu çok düşük sıcaklığı iş parçası ve takımın etkili bir şekilde soğutulmasına neden olmuştur [123, 153]. Benzer bir şekilde kesme bölgesini terk etmekte olan talaşın da çok hızlı bir şekilde soğumasını sağlamıştır. Böylece yapılan deneysel çalışmalar sırasında ölçülen en düşük sıcaklık değeri elde edilmiştir. Ayrıca uygulanan soğutma iş parçasının da önemli derecede soğumasına neden olmuştur.

Geleneksel soğutmanın takım içinden uygulandığı (GS - Tİ) deneyde sıcaklık değeri 180,4 °C olarak ölçülmüştür. Soğutma sıvısının doğrudan kesme bölgesine yönlendirilmesi bu yöntemde sıcaklıkların belirgin bir şekilde düşmesine yol açmıştır. Talaşlı imalat

uygulamasında ısının olduğu deformasyon bölgesinin doğrudan soğutulması, ısının büyük bölümünü taşıyarak kesme bölgesinden uzaklaştıran talaşın etkili bir şekilde soğutulması, soğutma sıvısı basıncı sayesinde talaş tahliyesinin hızlanması ve talaşın yine akışkan basıncı yardımıyla kırılması ısının hızla uzaklaştırılmasına ve sıcaklıkların düşmesine neden olmuştur.

Geleneksel soğutmanın takım dışından (GS - TD) yapıldığı soğutma yönteminde ise sıcaklık değeri 281,3 °C olarak ölçülmüştür. Takım dışından uygulanan soğutma işleminin doğrudan kesme bölgesine etki edememesi kesme bölgesinde oluşan yüksek ısının etkili bir şekilde düşürülebilmesine neden olmuştur. Bu durum takım içinden yapılan geleneksel soğutmaya nazaran daha yüksek sıcaklık değerinin ölçülmesine zemin hazırlamıştır. Soğutma sıvısının operasyon boyunca takımı, iş parçasını ve kesme bölgesini terk eden talaşı başarılı bir şekilde soğutması hava ve hava destekli soğutma yöntemlerine göre takım dışından yapılan geleneksel soğutmayı başarılı kılmıştır [119].

Delme işlemi sırasında uygulanan bir diğer soğutma yöntemi de kuru havanın takım içinden kesme bölgesine transferidir. Geleneksel soğutma yöntemlerinde kullanılan soğutma sıvısı, Kuru hava ile mukayese edildiğinde soğutma ve yağlama özelliklerinin üstün olduğu görülmektedir. Bu nedenle geleneksel soğutma uygulamalarında daha düşük sıcaklıklar ölçülmüştür. Buna rağmen oda sıcaklığında bulunan kuru havanın, yüksek ısının olduğu kesme bölgesine doğrudan gönderilmesi ısının önemli bir bölümünün uzaklaştırılmasına neden olmuştur. Takım içinden uygulanan soğutmanın talaş tahliyesini hızlandırması ve talaşı da soğutması sıcaklık değerlerinin diğer soğutma yöntemlerine göre (MQL, VRTX, KHS - TD) daha düşük ölçülmesini sağlamıştır.

Takım dışından uygulanan minimum miktarda yağlama (MQL) ile soğutma işleminde sıcaklık değeri 424,6 °C olarak ölçülmüştür. Minimum miktarda yağlama (MQL) yöntemi ile yapılan soğutma uygulaması kuru hava ve vortex soğutma uygulamalarına göre üstün bir yağlama özelliği ortaya koyarken, geleneksel soğutma uygulamalarına göre düşük bir soğutma performansı sergilemektedir. Takım dışından yapılan soğutma kesme bölgesine doğrudan etki edememiştir. Bu duruma bağlı olarak iş parçasının kısmen soğutulabildiği uygulamada sıcaklık değerleri belirgin bir şekilde artmıştır [119, 154].

Vortex tüp yarımı ile soğutulan havanın takım dışından kesme bölgesine gönderildiği

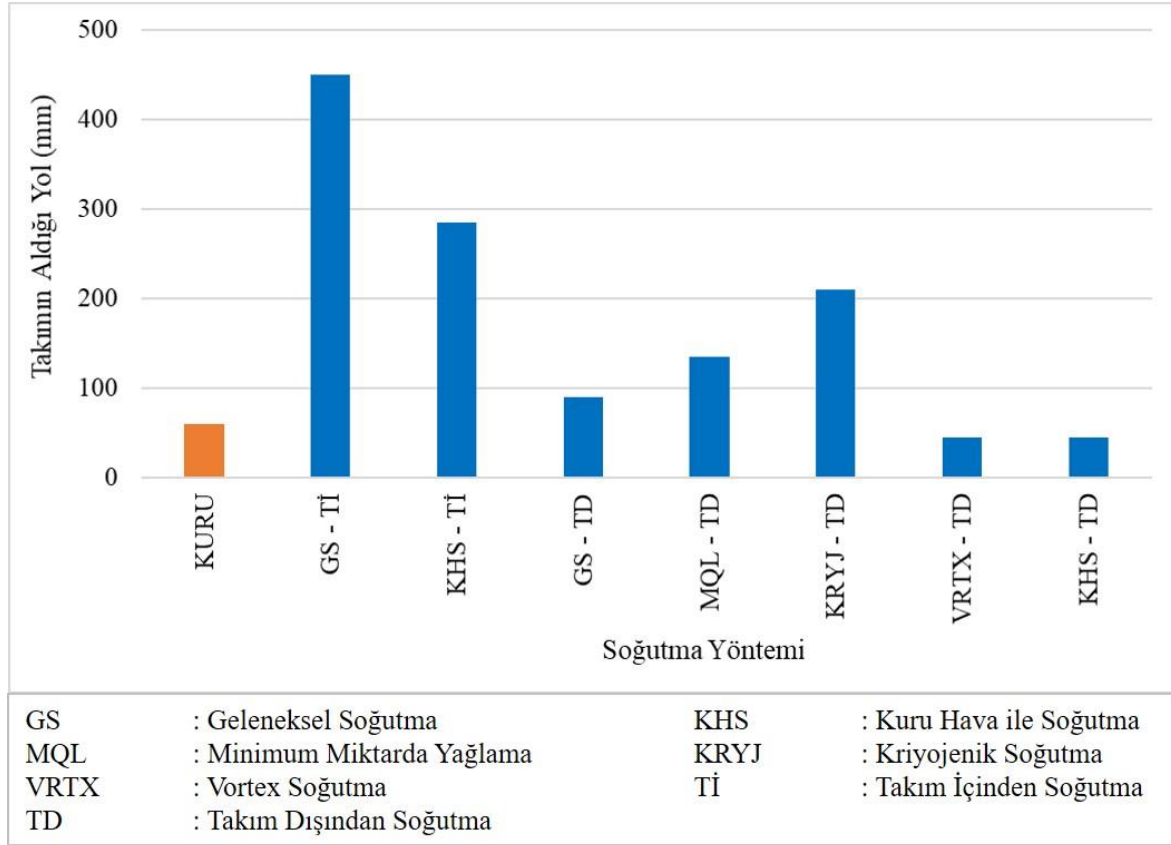
soğutma işleminde (VRTX.) minimum miktarda yağlama (MQL) ile soğutma uygulamasına yakın bir sıcaklık değeri (429,5 °C) ölçülmüştür. Her iki deneyde de kesme bölgesine doğrudan etki edemeyen soğutucu akışkan, sıcaklıkları düşürme konusunda üstün bir performans ortaya koyamamıştır.

Kuru havanın takım dışından uygulandığı soğutma yönteminde en yüksek sıcaklık değeri (445,4 °C) ölçülmüştür. Kuru havanın düşük soğutma performansı, soğutucu akışkanın kesme bölgesine ulaşamaması gibi etkenler bu durumu doğurmuştur. Vortex soğutma yönteminde kullanılan akışkanın nispeten soğuk olması bu yöntem de ölçülen sıcaklık değerini kuru hava ile soğutma yöntemine göre bir nebze düşürmüştür. Kuru havanın takım dışından uygulandığı durumda talaş tahliyesi soğutucu tarafından yavaşlatılmaktadır. Bu durumun ise, sıcaklıkların bir miktar artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Takım dışından yapılan soğutma uygulamalarında iş parçası yüzeyinin soğutucu akışkana sürekli maruz kalması parça yüzeyinin, kesme bölgesine göre daha çok soğutulmasına neden olmuştur. İş parçası malzemesinin düşük ısı iletim katsayısı takım dışından yapılan soğutma yöntemlerinde yüzeyin hızlı ısınmasının önüne geçmiştir. Bu durum parça yüzeyinden yapılan sıcaklık ölçümlerinde, ölçülen sıcaklıkların bir nebze daha düşük çıkmasına neden olabileceği düşünülmektedir.

9.3.4. Soğutma yöntemlerinin takım ömrüne etkisi

Talaşlı imalat operasyonlarında en büyük maliyet kalemlerinden biri olan takım ömrüne farklı soğutma yöntemlerinin katkısı Şekil 9.16.' da gösterilmiştir. Takım performansı operasyon sırasında takım aldığı yol (mm) üzerinden değerlendirilmiştir.



Şekil 9.16. Farklı soğutma yöntemlerinin takım ömrüne etkisi

Kesme hızının 40 m/dak ve ilerleme oranının 0,1 mm/dev olarak belirlendiği deneylerde kuru şartlarda takım 60 mm yol almıştır. Yapılan vortex soğutma (VRTX - TD) ve kuru hava ile takım dışından soğutma eşliğinde yapılan deneylerde kuru şartlardan da düşük takım performansı elde edilmiştir. Söz konusu soğutma yöntemlerinde takım 45 mm yol almış ve en düşük takım performansı gözlemlenmiştir. Diğer soğutma yöntemlerinin tamamı kuru şartlardan daha üstün bir takım performansı sergilemiştir. Kuru koşullarda görüldüğü gibi soğutma yöntemleri eşliğinde yapılan deneylerde de talaş yapışmasına bağlı olarak gelişen takım hasarları gözlemlenmiştir.

Yapılan vortex soğutma ve takım dışından yapılan kuru hava ile soğutma işlemlerinde kuru şartlardan da düşük takım performansı elde edilmiştir. Bu şartlarda diğer soğutma yöntemlerine kıyasla görülen yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ve ilerleme kuvvetleri talaşın takıma yapışma eğilimini artırmıştır. Gelişen olumsuz kesme şartları takım performansının diğer soğutma yöntemlerine göre düşük seviyelerde olmasına neden olmuştur.

Kuru kesme koşulları bu iki soğutma yönteminden nispeten daha yüksek performans sergilemiştir. Soğutma uygulamalarında soğutucu akışkanın talaş tahliye yönüne (aşağıdan – yukarıya) zıt yönde (yukarıdan – aşağıya) uygulanması talaşın tahliyesini yavaşlatmış ve zorlaştırmıştır. Söz konusu yavaşlama ile takım-talaş temas süreleri nispeten artmış bu durumda talaş yapışması için elverişli şartları ortaya çıkardığı düşünülmüştür.

Geleneksel soğutma yönteminin takım dışından uygulanmasında (GS - TD) takım toplam 90 mm yol almıştır. Geleneksel soğutma uygulaması kuru şartlar, takım dışından uygulanan kuru hava ile soğutma ve vortex soğutmaya nazaran sergilediği üstün soğutma ve yağlama performansı nedeniyle yüksek performans sergilemiştir. Takım dışından yapılan geleneksel soğutma, önceki iki soğutma yöntemine (KHS - TD ve VRTX) göre takımın aldığı yolu %100 artırmıştır. Ancak soğutma işlemi doğrudan kesme bölgesine etki edemediği için artan kesme bölgesi sıcaklıkları ile takımda talaş yapışması görülmüştür. Bu yapışma takımda hasara neden olmuştur [153].

Minimum miktarda yağlama (MQL) yöntemi ile yapılan soğutma uygulamasında takım 135 mm yol almıştır. Minimum miktarda yağlama yöntemi, takım dışından yapılan geleneksel soğutmaya göre %50 oranında yüksek katkı sağlamıştır. Söz konusu soğutma uygulaması sırasında ölçülen kısmen düşük ilerleme kuvvetleri ve kesme momentleri üstün takım performansına neden olmuştur. Minimum miktarda yağlama uygulamasının üstün yağlama özellikleri basınçlı hava etkisiyle daha da etkili olmuştur. Takım ve talaş arasında oluşan yağ filmi talaşın takıma yapışma eğilimini azaltmış ve talaş tahliyesini kolaylaştırmıştır. Tüm bu durum daha üstün bir takım performansını ortaya çıkarmıştır [120, 155].

Kriyojenik soğutmanın (KRYJ) uygulandığı deneysel çalışmada takım 210 mm mesafe kat etmiştir. Kriyojenik soğutma uygulaması, minimum miktarda yağlama yöntemi ile yapılan soğutmaya göre takım ömrünü yaklaşık olarak %56 oranında artırmıştır. Kriyojenik soğutma ile sağlanan etkili soğutma sıcaklıkların önemli oranda düşmesine ve ısının hızla uzaklaştırılmasına neden olmuştur [9, 134]. Bu düşük sıcaklıklar talaşın takım üzerine yapışması için gerekli sıcaklıkların altında kalmıştır. Bu durum talaş – takım arasındaki yapışmayı önemli ölçüde sınırlandırmış ve üstün bir takım performansını ortaya koymuştur [156]. Kriyojenik soğutmanın bu yüksek soğutma performansına rağmen doğrudan kesme bölgesine nüfuz edememesi sıcaklıklara olan etkisini sınırlandırmıştır [153].

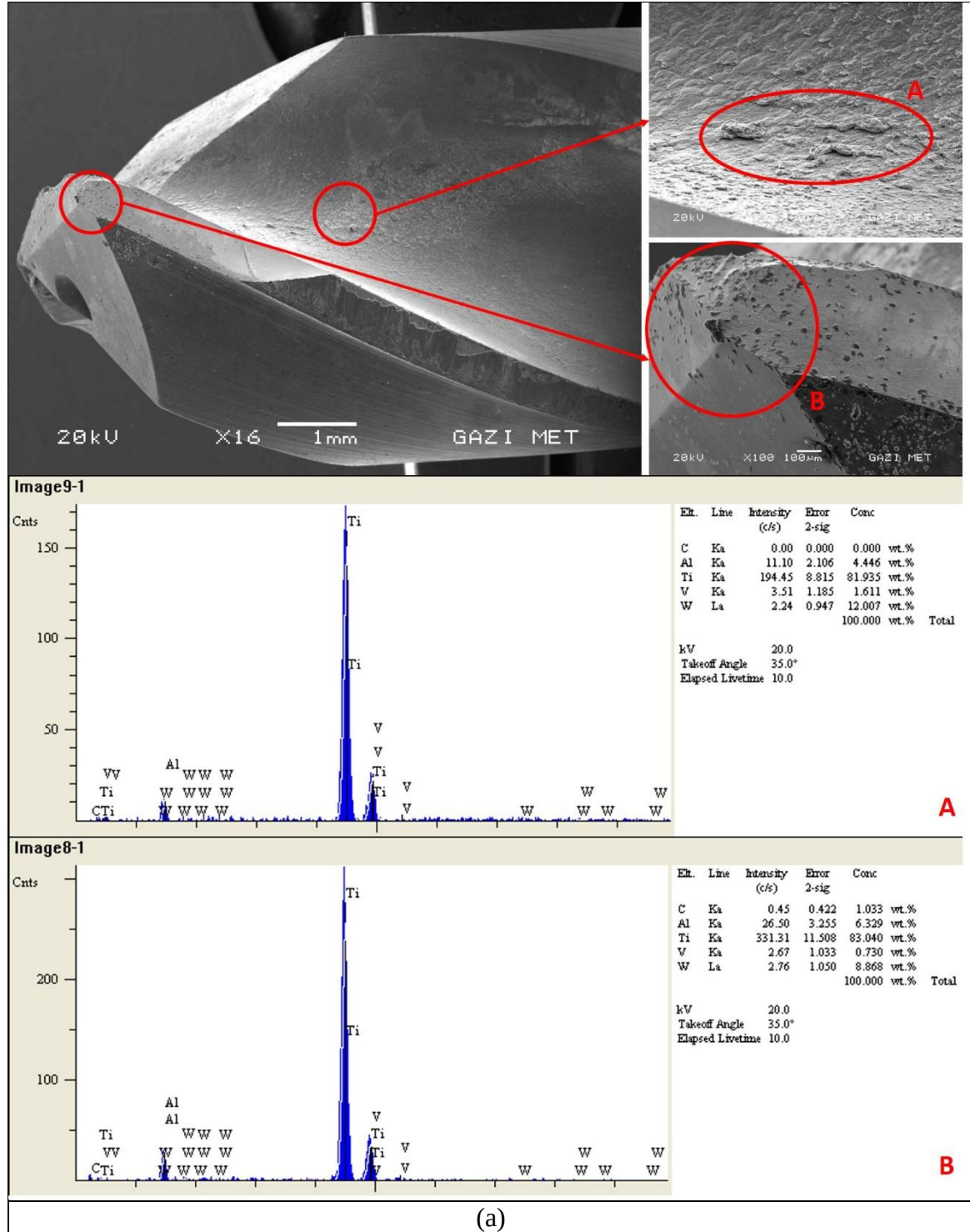
Kuru havanın takım içinden kesme bölgesine gönderilmesi ile gerçekleştirilen soğutma işlemi ile takım 285 mm yol almıştır. Takım içinden kuru hava ile soğutma yöntemi Kriyojenik soğutma uygulamasına göre yaklaşık %36 oranında takım performansını artırmıştır. Takım içinden yapılan soğutma ile soğutucu akışkanın (kuru hava) doğrudan kesme bölgesine gönderilmesi kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklığın bir nebze kontrol altına alınmasına yol açmıştır. Ancak daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi kuru havanın üstün bir soğutma performansı yoktur. Soğutma etkisinden ziyade yüksek basınç ile kesme bölgesine gönderilen kuru havanın talaş tahliyesini hızlandırması takım ve talaş arasındaki temas sürelerini kısaltarak ısı transferini sınırlandırmıştır. Ayrıca talaşın daha küçük paçalar halinde tahliye edilmesini sağlamıştır. Tüm bu şartlar talaşın takıma yapışma eğilimini azaltmış ve yapışmaya bağlı deformasyon oluşumunu kısmen önlemiştir.

Geleneksel soğutmanın takım içinden uygulandığı yöntemde ilk yapılan çalışmalarda 450 mm yol alınmıştır. Bu çalışmalar ardından yapılan incelemelerde takım üzerinde belirgin bir aşınma oluşumu gözlemlenmemiştir. Devam eden takım aşınma deneyleri sonucunda toplam 418 adet delme işlemi gerçekleştirilmiş ve bu işlemler neticesinde toplam 6270 mm yol alınmıştır. Takımın aldığı yol dikkate alındığında takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yöntemi en yakın takipçisi takım içinden kuru hava ile soğutma yöntemine göre 22 kat yüksek performans sergilemiştir. Bu bariz üstünlük soğutma sıvısının, kuru havaya kıyasla çok üstün ve etkili olan soğutma ve yağlama özelliği nedeniyle ortaya çıkmıştır. Takım içinden uygulanan geleneksel soğutmanın kesme bölgesi sıcaklıklarını başarılı bir şekilde düşürmesi, talaş tahliyesini hızlandırması, operasyon sırasında hem takımı hem de talaşı soğutması, talaşı kırarak etkili talaş kontrolü sağlaması ve yağlama özelliği ile takım – talaş arasındaki teması sınırlandırması yüksek takım performansına neden olmuştur.

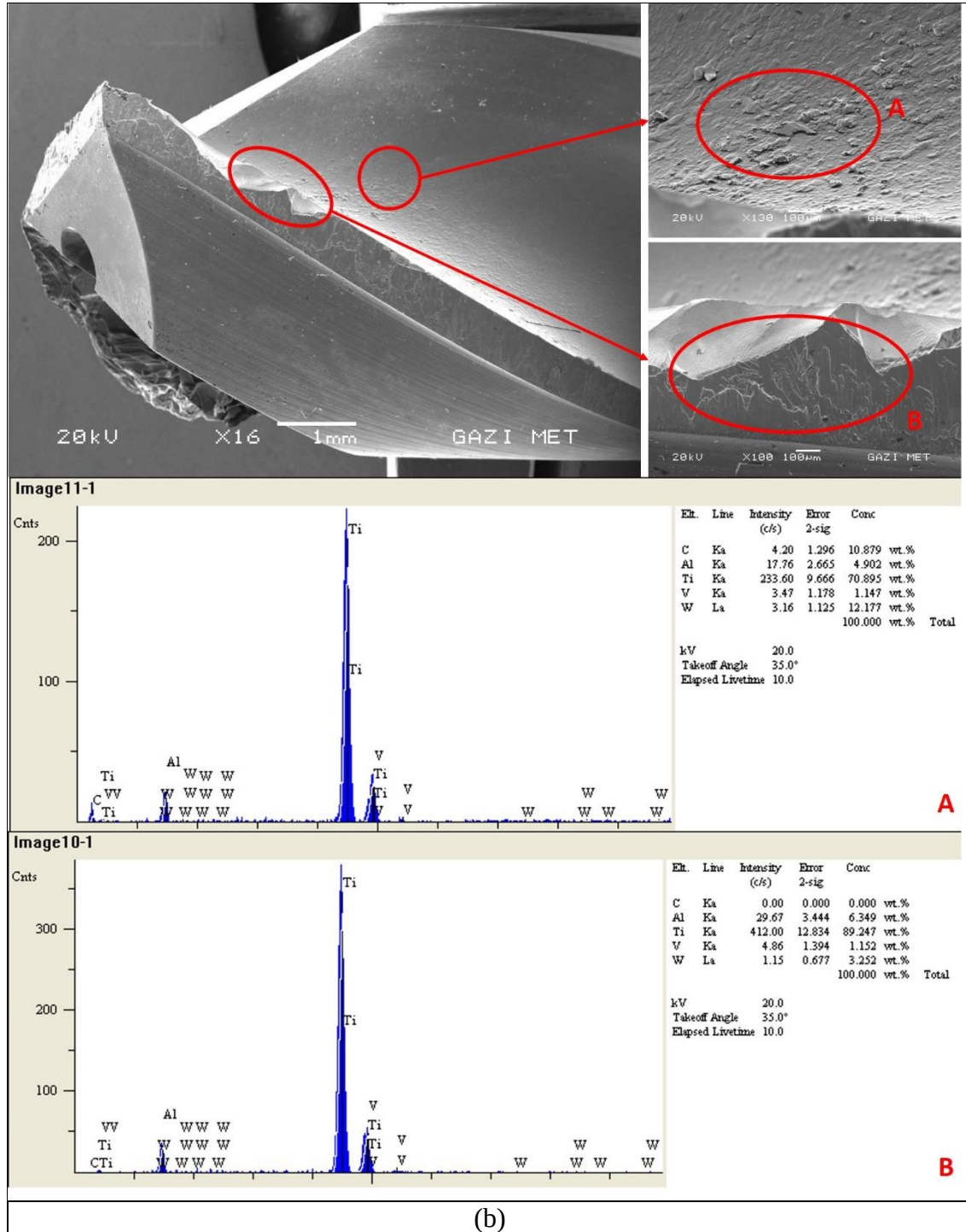
Takım performansı değerlendirildiğinde takım içinden uygulanan soğutma yöntemlerinin takım dışından yapılan soğutma yöntemlerine göre çok daha başarılı olduğu görülmüştür. Bu başarıda etkili soğutma ve yüksek talaş tahliye hızı büyük rol oynamaktadır. Takım dışından yapılan soğutma işlemlerinde soğutucu akışkan doğrudan kesme bölgesine etki edememesi ve talaş tahliyesine olumlu bir katkı sunamaması bu yöntemlerin bir adım geride kalmasına yol açmıştır.

Takımda meydana gelen aşınmalar değerlendirildiğinde kuru kesme şartlarında olduğu gibi talaş yapışması ve bu yapışma sonucu takımdan parça kopmalarına bağlı olarak gerçekleşen

deformasyonlar gözlemlenmiştir. Bu deformasyonlara dair SEM görselleri ve EDS analizleri Resim 9.7.'de takımlar üzerinden, Resim 9.8. de ise talaşlar üzerinden verilmiştir.

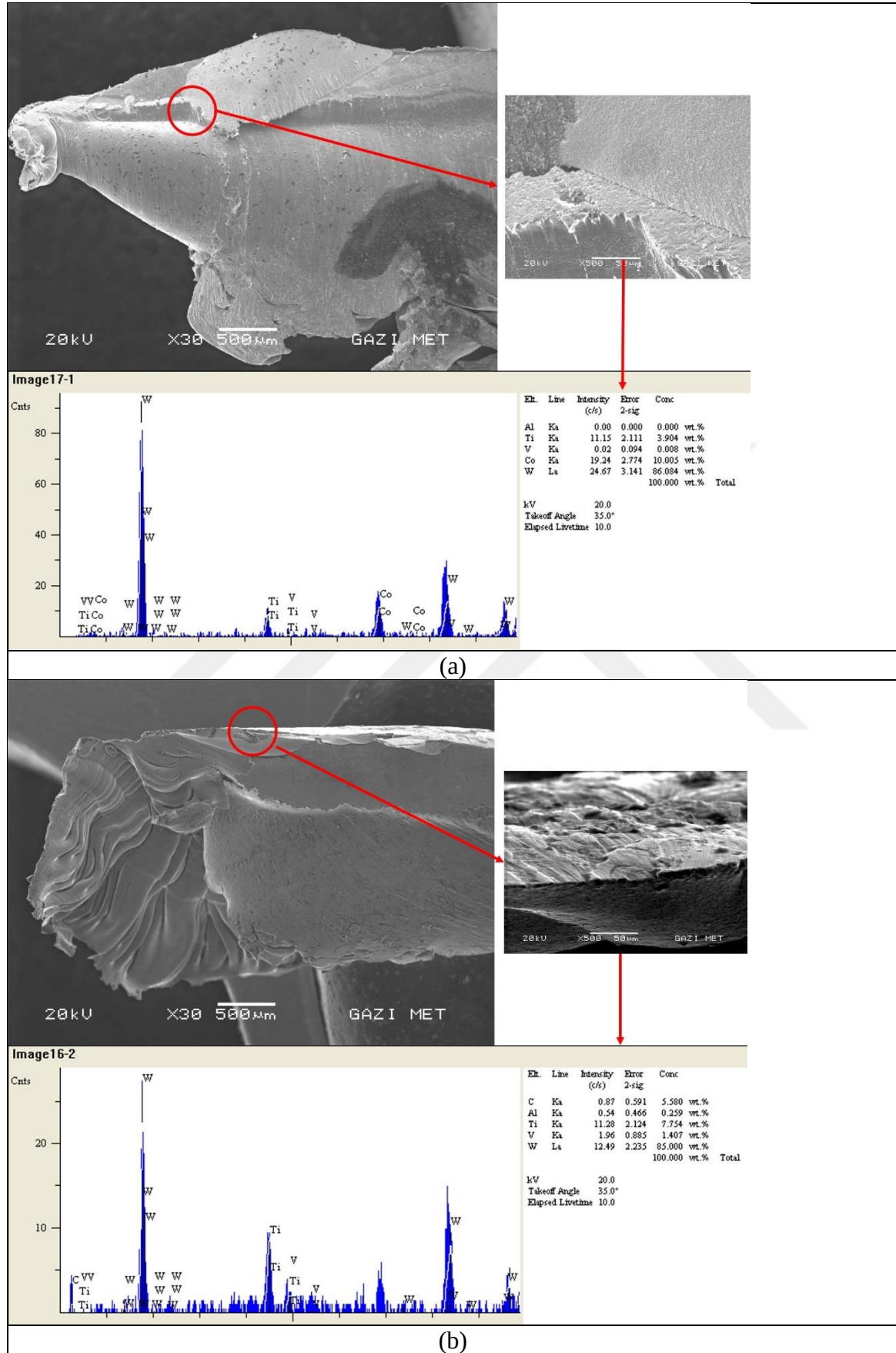


Resim 9.7. Takım SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 24 nolu ve (b); 25 nolu deneylere ait takımlar



Resim 9.7. (devam) Takım SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 24 nolu ve (b); 25 nolu deneylere ait takımlar

Vortex soğutma yöntemi ile yapılan 24 nolu deney ve minimum miktarda yağlama ile soğutma yöntemi ile yapılan 25 nolu deneye dair takım SEM görselleri Resim 9.7.'de verilmiştir. Her iki görselde de kuru kesme şartlarına benzer deformasyonlar görülmüştür. Takımın helis kanalında ve hasar bölgesinde iş parçası yapışmaları EDS analizleri ile tespit edilmiştir.

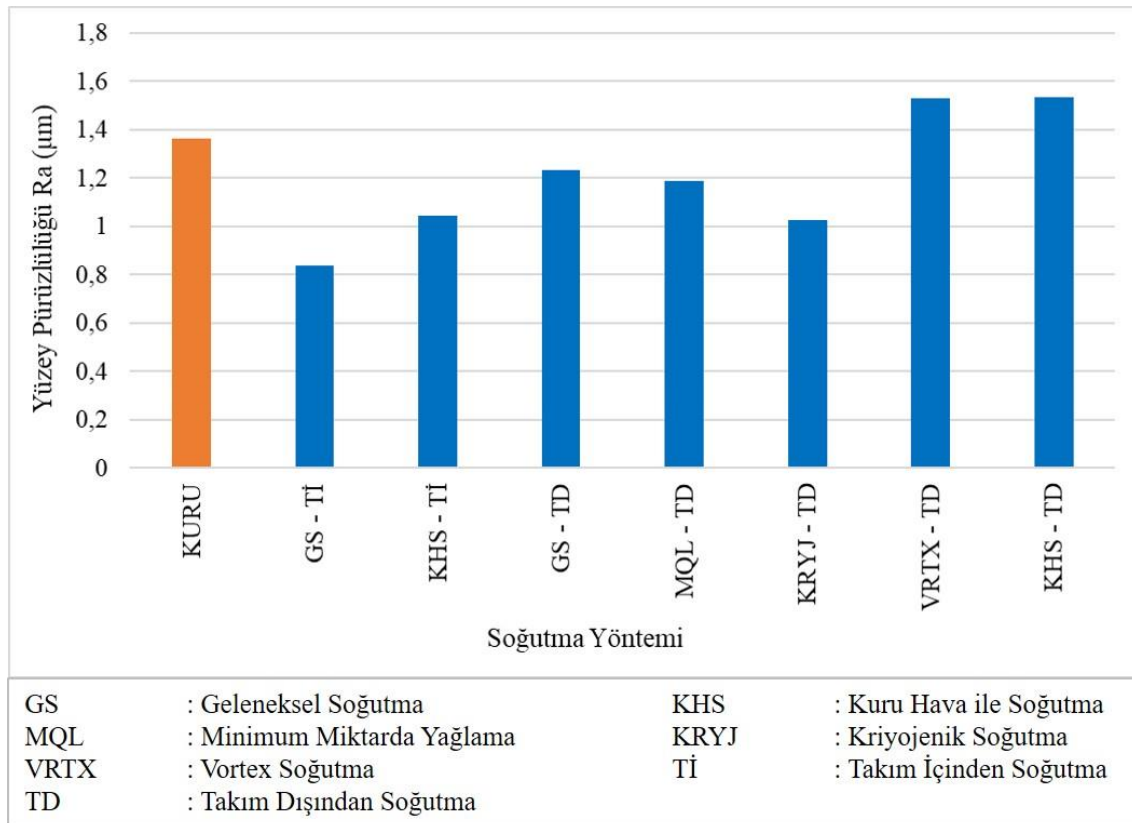


Resim 9.8. Talaş SEM görselleri ve EDS analizleri (a); 24 nolu ve (b); 25 nolu deneylere ait talaşlar

Farklı soğutma yöntemlerinin kullanıldığı deneylerde elde edilen talaş görselleri üzerinde yapılan incelemeler sonucunda talaşlar üzerinde tungsten (W) ve kobalt (Co) varlığı tespit edilmiştir. Bu durum kuru kesme şartlarında olduğu gibi takımda meydana gelen hasarın yapışma kaynaklı olduğunu göstermektedir.

9.3.5. Soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülük değerine etkisi

Değişen soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüklerine etkisi Şekil 9.17. aracılığı ile ortaya konulmuştur.



Şekil 9.17. Farklı soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri

Yapılan soğutma uygulamaları sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yönteminde $R_a = 0,84 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü ise $R_a = 1,54 \mu\text{m}$ değerinde kuru hava ile takım dışından yapılan soğutma yönteminde görülmüştür. Vortex soğutma ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri de en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerine çok yakın ölçülmüştür. Bu iki soğutma yöntemi ile yapılan çalışmalarda elde edilen pürüzlülük değerleri kuru kesme şartlarında elde edilen pürüzlülük değerinin üstüne çıkmıştır.

Geleneksel soğutmanın takım içinden yapıldığı deneyde en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Delme işleminde kesme parametrelerinin sabit tutulması durumunda sağlıklı talaş tahliyesi ve yüksek takım performansı yüzey pürüzlülükleri açısından büyük önem taşımaktadır. Geleneksel soğutmanın takım içinden uygulanmasında etkili talaş tahliyesi talaşın delik yüzeyinde oluşturduğu olumsuz etkiyi minimize etmektedir. Ayrıca yüksek basınçla uygulanan soğutma etkisi ile talaş küçük parçacıklar halinde uzaklaştırılmıştır. Bununla birlikte takım aşınmalarının ve takıma talaş yapışmasının önüne geçilerek takım performansının düşmesinin önüne geçilmiştir. Soğutma sayesinde oluşturulan bu verimli kesme şartları yüzey pürüzlülüğünün düşmesine yol açmıştır [119, 134].

Kriyojenik soğutma uygulamalarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü $R_a = 1,03 \mu m$ olarak saptanmıştır. Geleneksel soğutmanın takım içinden uygulandığı soğutma şartlarına göre yüzey pürüzlülüğü %22,6 oranında artmıştır. Kriyojenik soğutmanın sağladığı düşük sıcaklıklar talaşın yapışma eğilimini azaltarak takım performansını artırsa da bu etki takım içinden uygulanan geleneksel soğutmanın gerisinde kalmıştır [153]. Kriyojenik soğutmanın bir sonucu olarak artan talaş sertliği iş parçası yüzeyinde daha fazla hasara neden olmuştur [126, 156]. Bu durum takım içinden yapılan geleneksel soğutmaya göre pürüzlülükleri artırmıştır.

Kuru havanın takım içinden uygulandığı soğutma yönteminde ise yüzey pürüzlülüğü $R_a = 1,05 \mu m$ olarak ölçülmüştür. Söz konusu yüzey pürüzlülüğü Kriyojenik soğutma şartlarında elde edilen yüzey kalitesine çok yakın bir değerdedir. Kriyojenik soğutma etkili bir soğutma performansı sergilerken, takım içinden yapılan soğutma ise talaşın etkili bir şekilde kesme bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Soğutma yöntemlerinin farklı karakteristik özellikleri yüzey kalitesinin benzer seviyelerde ortaya çıkmasına neden olmuştur.

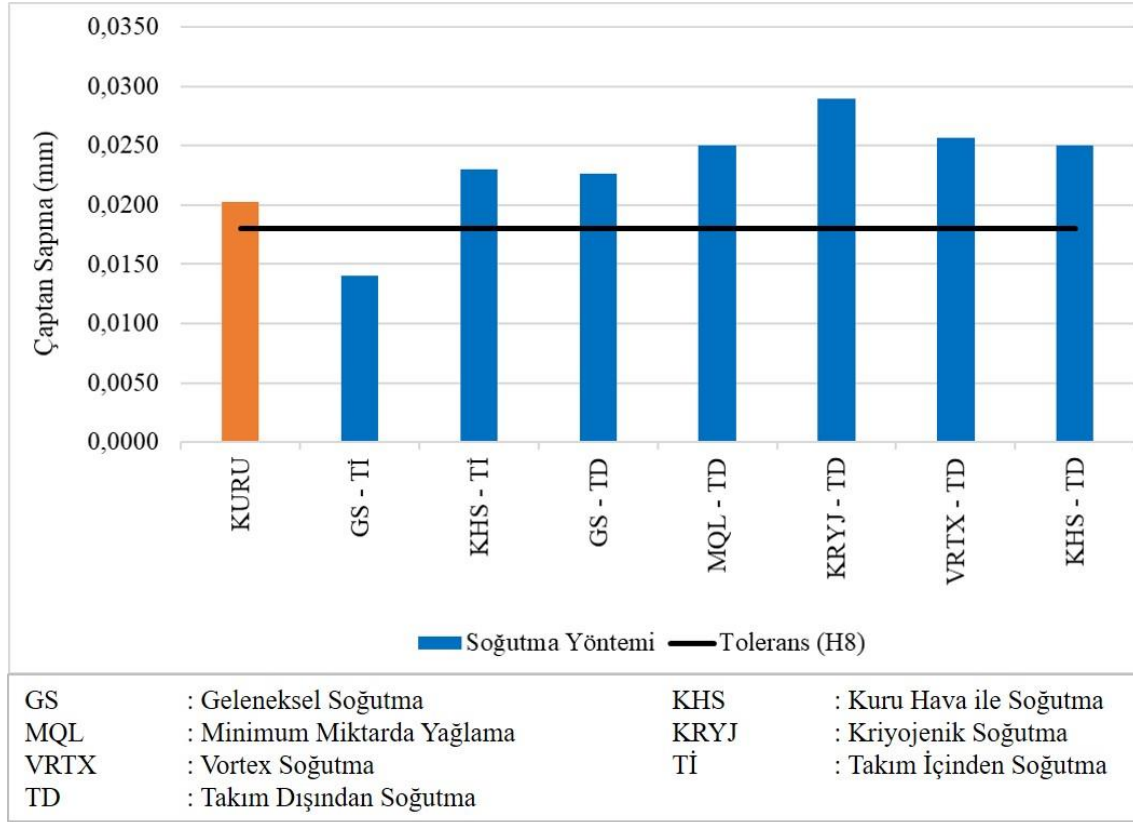
Minimum miktarda yağlama katkısı ile gerçekleştirilen çalışmada yüzey pürüzlülüğü $R_a = 1,19 \mu m$ değeri ile belirlenmiştir. Minimum miktarda yağlama ile soğutma uygulamasının üstün yağlama özelliği sayesinde kuru kesme şartlarına göre yüzey pürüzlülüğünde azalma görülmüştür [134]. Ancak talaş tahliyesi ve soğutma özelliklerine bağlı olarak gelişen düşük takım performansı minimum miktarda yağlama ile soğutma yöntemini yukarıda bahsedilen diğer soğutma yöntemlerine göre yüzey pürüzlülükleri açısından dezavantajlı kılmıştır. Minimum miktarda yağlama ile yapılan soğutmada yüzey pürüzlülüğü, takım içinden kuru hava ile soğutma yöntemine göre %13,3 oranında artmıştır.

Geleneksel soğutmanın takım dışından uygulanması ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü $R_a = 1,23 \mu\text{m}$ değerinde olmuştur. Takım dışından geleneksel soğutma ve minimum miktarda yağlama ile soğutma yöntemlerinde yakın yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Geleneksel soğutmanın başarılı soğutma ve yağlama özellikleri kuru şartlara göre yüzey kalitesinin yükselmesine neden olmuştur [119, 154]. Gerçekleşen etkili soğutmanın doğrudan kesme bölgesine nüfuz edememesi, bu duruma bağlı olarak azalan takım performansı ve zorlaşan talaş tahliyesi özellikle takım içinden yapılan soğutma yöntemlerine göre yüzey pürüzlülüklerinin artmasına yol açmıştır [153].

Vortex soğutma ve kuru hava ile takım dışından yapılan soğutma uygulamalarında sırası ile $R_a = 1,53$ ve $R_a = 1,54 \mu\text{m}$ değerinde yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Söz konusu pürüzlülük değerleri kuru kesme koşulunda ölçülen $R_a = 1,36 \mu\text{m}$ pürüzlülük değerinin üstündedir. Bu iki soğutma yöntemi takımın aldığı yol değerlerinde olduğu gibi kesme koşullarını olumsuz etkilemiştir. Takım dışından uygulanan yüksek basınçlı soğutma talaş tahliyesini zorlaştırmakta ve takım performansını düşürmektedir. Talaşın kesme bölgesinden daha yavaş atılması talaş ve iş parçası yüzeyi temasını artırmakta ve böylece yüzeyde talaş kaynaklı çizilmeler oluştuğu düşünülmektedir. Tüm bu etkenler bu soğutma yöntemlerinde yüzey kalitesinin kuru şartlara göre %13,2; takım dışından yapılan geleneksel soğutmaya göre ise %25,2 oranında artmasına neden olmuştur.

9.3.6. Soğutma yöntemlerinin delik çapı ölçüsüne etkisi

Farklı soğutma yöntemleri eşliğinde yapılan deneyler sonucunda ölçülen delik çapı değişim değerleri ile oluşturulan grafik Şekil 9.18.' de sunulmuştur.



Şekil 9.18. Farklı soğutma yöntemlerinin delik çapı ölçüsüne etkisi

Veriler incelendiğinde takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yöntemi dışında gerçekleştirilen tüm delme operasyonlarında elde edilen delik çapları belirlenen tolerans değeri dışında kalmıştır. Çalışmalar sonucunda ölçülen delik çapı değerlerinden biri hariç (GS - Tİ) tamamı kuru kesme şartlarından yüksek çıkmıştır. Bu durumu soğutma uygulaması ile kuru kesme şartlarına göre daha yüksek kesme momenti ve ilerleme kuvveti oluşumu sağlamıştır. Farklı soğutma yöntemleri ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen çaplar arasında 15 μm 'lık bir fark tespit edilmiştir. En yüksek çaptan sapma değeri 0,0290 mm olarak kriyojenik soğutma şartları ile yapılan deneyde ölçülmüştür. En düşük delik çapı değişimi ise takım içinden yapılan geleneksel soğutma yöntemi ile 0,0140 mm olarak belirlenmiştir.

Takım içinden yapılan geleneksel soğutma uygulamasında takım performansının çok yüksek olması delik çapı değerlerinde de kendini göstermiştir. En düşük çap değişimi takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yönteminde ölçülmüştür. Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yönteminde görülen yüksek ilerleme kuvveti ve kesme momentine rağmen takım performansının çok yüksek olması delik çapı doğruluğunun artmasına neden

olmuştur.

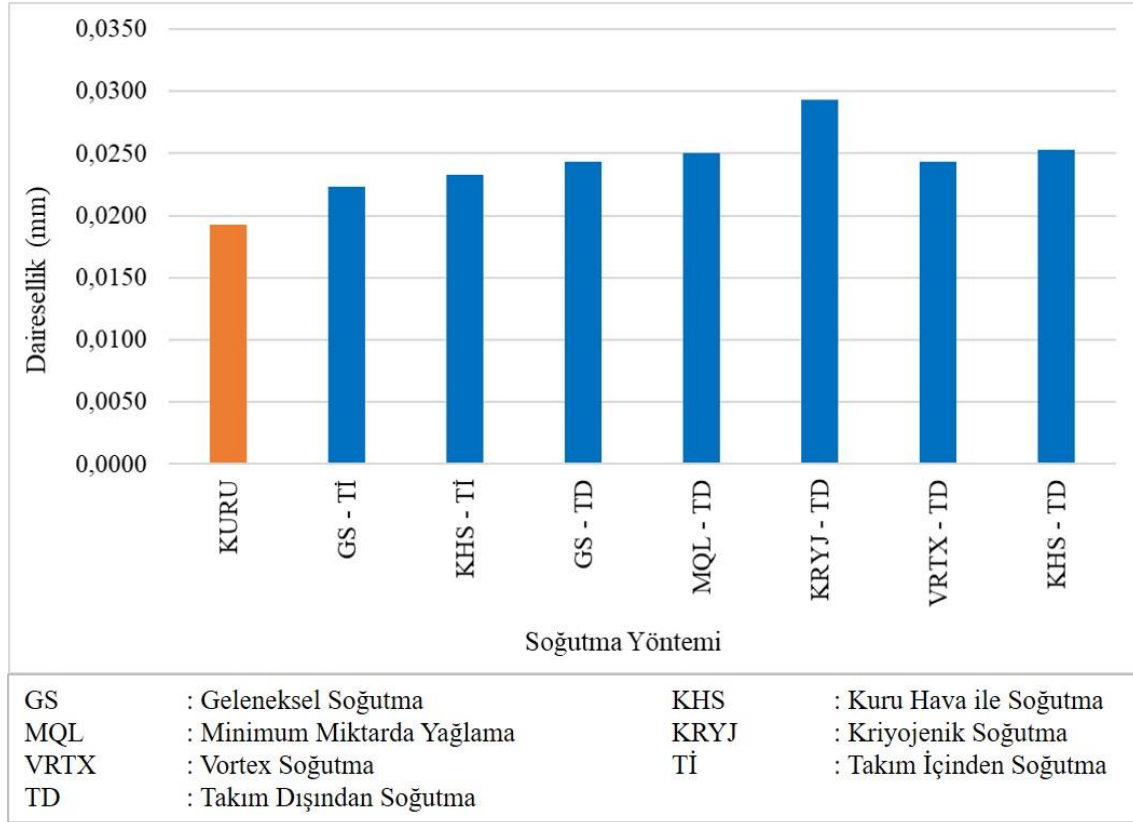
Geleneksel soğutmanın takım dışından uygulandığı soğutma yönteminde 0,0227 mm çaptan sapma değeri ölçülmüştür. Takım içinden uygulanan kuru hava ile soğutma yönteminde takım dışından geleneksel soğutma yöntemine yakın bir çap ölçüsü (0,0230 mm) belirlenmiştir. Geleneksel soğutma yönteminde etkili olan soğutma ve yağlama özellikleri, takım içinden kuru hava ile soğutma yönteminde görülen hızlı talaş tahliyesi düşük talaş yapışma eğilimine sebep olmuştur. Takım performansındaki bu iyileşme delik çapındaki değişim değerlerinin diğer soğutma yöntemlerine kıyasla çok az düşmesine sebep olmuştur [157].

Takım dışından uygulanan kuru hava ile soğutma, minimum miktarda yağlama ve vortex soğutma ile yapılan deneylerde bir birine yakın delik çapı değerleri ölçülmüştür. Bu değerler sırası ile 0,0250 mm, 0,0250 mm ve 0,0257 mm olarak belirlenmiştir.

Kriyojenik soğutma şartlarında ise en yüksek delik çapı değişim değeri (0,0290 mm) belirlenmiştir. Söz konusu şartlarda oluşan yüksek ilerleme kuvvetleri ve kesme momentlerinin bu sonuca zemin hazırladığı düşünülmüştür.

9.3.7. Soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkisi

Soğutma yöntemlerinin etkinliğinin test edildiği deneyler sonucunda elde edilen dairesellik verileri ile oluşturulan grafik Şekil 9.19.' de sunulmuştur.



Şekil 9.19. Farklı soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkileri

Soğutma katkısı ile yapılan deneylerin tamamında ölçülen dairesellik değerleri kuru şartlar altında elde edilen dairesellik değerinden daha yüksektir. Yapılan çalışma neticesinden en yüksek dairesellik değeri 0,0293 mm olarak kriyojenik soğutma eşliğinde yapılan deneyde ölçülmüştür. En düşük dairesellik değeri ise 0,0223 mm olarak takım içinden uygulanan geleneksel soğutma ile yapılan deneyde elde edilmiştir. Farklı soğutma yöntemlerinin kıyaslandığı çalışmada dairesellik değerleri 7 μ m 'lik bir aralığa yayılmıştır.

Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma uygulamasında görülen üstün takım performansı sayesinde dairesellik değeri, delik çapı değişim değerinde de olduğu gibi en düşük seviyede ölçülmüştür. Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma talaşlı imalat performansını artırmıştır. Bu durum dairesellik değerlerine de yansımıştır. Düşük dairesellikten ve delik çapı değişim değerlerinin bu soğutma yönteminde elde edilmesi aynı soğutma koşullarında elde edilen yüksek ilerleme kuvvetlerine soğutma sıvısının yüksek basıncının önemli bir katkısı olduğunu da ortaya koymuştur.

Takım içinden yapılan kuru hava ile soğutma ve takım dışından yapılan geleneksel soğutma

uygulamaları delik çapı değişim değerlerinde de olduğu gibi bir birine yakın değerler (0,0233 ve 0,0243 mm) ortaya koymuştur. Takım dışından soğutma ile sağlanan soğutma ve yağlama etkisi, takım içinden kuru hava ile elde edilen takım performansı bu durumu ortaya koymuştur.

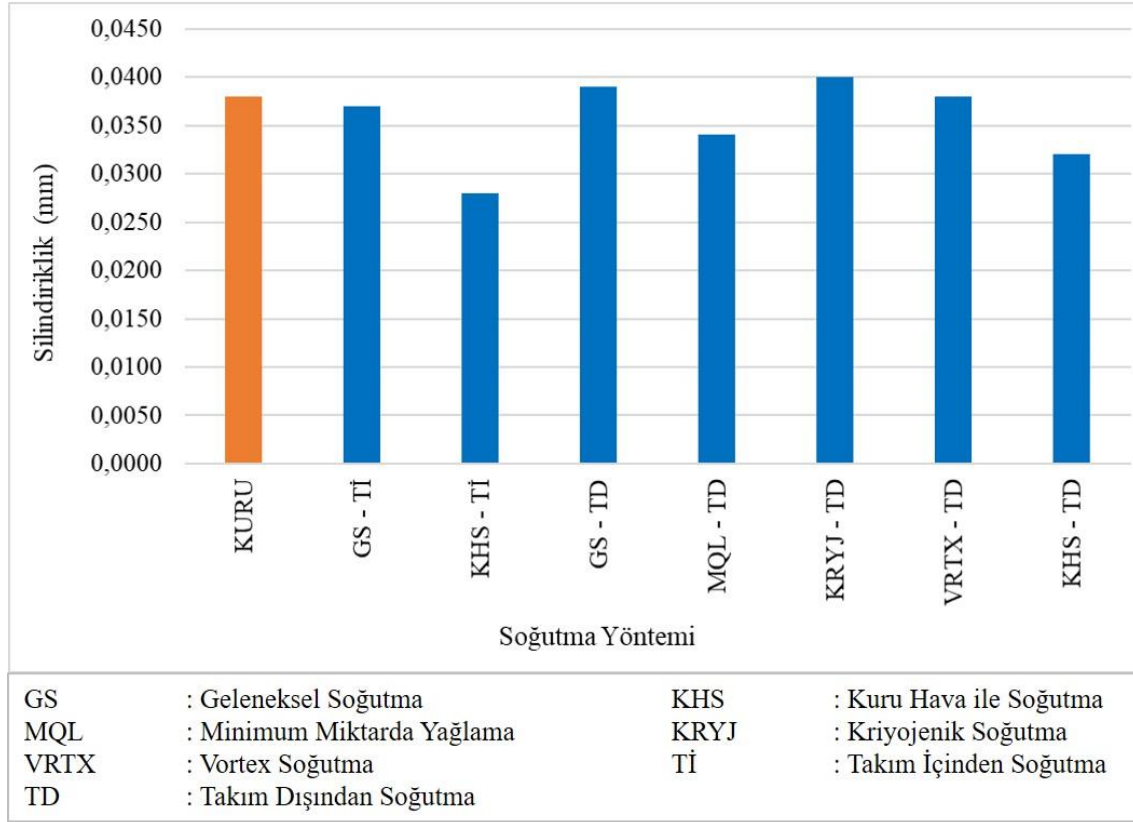
Vortex soğutma, minimum miktarda yağlama ile soğutma ve kuru havının takım dışından uygulandığı soğutma yöntemlerinde sırası ile (0,0243; 0,0250 ve 0,0253 mm) dairesellik değerleri ölçülmüştür.

Soğutma uygulaması kriyojenik soğutma olarak belirlendiği deneyde en yüksek dairesellik değeri ölçülmüştür. Bu şartlarda oluşan düşük kesme sıcaklıkları ve yüksek ilerleme kuvvetleri dairesellik değerlerinin bir miktar artmasına zemin hazırlamıştır. Kriyojenik soğutma uygulamasında görülen yoğun termal etkiler dairesellik değerleri üzerinde etkili olmuştur [124, 126].

Tüm bu çıktılar değerlendirildiğinde; farklı soğutma şartlarında dairesellik değerlerinin birbirine yakın elde edildiği görülmektedir.

9.3.8. Soğutma yöntemlerinin silindiriklik değerlerine etkisi

Farklı soğutma yöntemlerinin delik kalitesi üzerine etkinliğinin belirlendiği bu çalışmada bir diğer kalite kriteri ise silindirikliktir. Değişen soğutma yöntemlerinin silindiriklik değerlerine etkisi Şekil 9.20.'de sunulmuştur.



Şekil 9.20. Farklı soğutma yöntemlerinin silindiriklik değerleri üzerinde etkileri

Grafik değerlendirildiğinde soğutma yöntemlerinin katkısı ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen silindiriklik değerleri, kuru deney sonucunda elde edilen silindiriklik değerine yakın değerlerde görülmüştür. Soğutma uygulaması sonucunda elde edilen en yüksek silindiriklikten sapma değeri 0,040 mm ile kriyojenik soğutma şartlarında ölçülmüştür. Dairesellik değerlerinde olduğu gibi Kriyojenik soğutma uygulamasında görülen termal etkiler silindiriklik değerlerinin de artmasına neden olduğu düşünülmektedir [124, 126]. En düşük silindiriklik değeri ise kuru havanın takım içinden uygulandığı soğutma koşulunda 0,028 mm olarak ölçülmüştür. Aynı kesme koşullarında kuru şartlarda yapılan deneylerde ise silindiriklik değeri 0,038 mm olarak belirlenmiştir.

Geleneksel soğutmanın takım içinden ve takım dışından uygulandığı yöntemlerde, takım dışından uygulanan kuru hava ile soğutmada, vortex soğutmada, MQL soğutma ve kriyojenik soğutma uygulamalarında elde edilen silindiriklik değeri 5 μ m 'lık bir sapma ile yakın sonuçlar vermiştir. Kuru havanın takım içinden uygulandığı soğutma şartlarında ise 10 μ m 'lık bir azalma görülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda farklı soğutma yöntemlerinin silindiriklik değerlerine doğrudan bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

9.3.9. Soğutma yöntemlerinin değerlendirilmesi

Yapılan bir dizi deneysel çalışma sonucunda farklı soğutma yöntemlerinin delme işlemine katkıları araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda operasyon maliyetleri ve ürün (delik) kalitesi açısından soğutma yöntemleri kıyaslanmıştır.

Operasyon maliyetleri dikkate alınarak yapılan değerlendirmede soğutma yöntemlerinin ilerleme kuvvetleri, kesme momentleri ve takım performansları üzerindeki etkileri kıyaslanmıştır. İlerleme kuvvetleri ve kesme momenti çıktıları incelendiğinde en iyi performansı, kuru hava ile takım içinden yapılan soğutma (KHS - Tİ) ve minimum miktarda yağlama (MQL - TD) ile yapılan soğutma yöntemleri göstermiştir. Takım içinden yüksek basınç ile gönderilen kuru havanın talaşı hızla uzaklaştırması ve minimum miktarda yağlama yönteminin üstün yağlama etkisi bu sonucu doğurmuştur. Kesici takım performansı dikkate alınarak yapılan değerlendirmede ise en iyi performansı takım içinden yapılan geleneksel soğutma (GS - Tİ) ve kuru hava ile soğutma (KHS - Tİ) yöntemleri sergilemiştir. Takım içinden yapılan geleneksel soğutma sayesinde takım performansı en yakın soğutma yöntemine göre 22 kat yüksek performans sergilemiştir. Hızlı talaş tahliyesi, etkili soğutma ve yağlama özellikleri takım içinden yapılan geleneksel soğutmayı diğer yöntemlere kıyasla öne çıkarmıştır.

Ürün kalitesi dikkate alınarak yapılan kıyaslamada ise yüzey pürüzlülüğü, delik çapı değişim değeri ve dairesellik değeri için takım içinden yapılan geleneksel soğutmanın (GS - Tİ) diğer soğutma yöntemlerine göre yüksek performans sergilediği görülmüştür. Silindiriklik değerleri kıyaslandığında ise takım içinden yapılan kuru hava ile soğutma (KHS - Tİ) yüksek performans sergilemiştir.

Takım içinden yapılan geleneksel soğutma (GS - Tİ) her iki değerlendirme kriterinde de yüksek katkı sergilemiştir. Ancak geleneksel soğutma yöntemi soğutma sıvısı maliyetleri, insan sağlığı ve çevresel etkiler gibi dezavantajlara da sahiptir. Takım içinden kuru hava ile yapılan soğutma (KHS – Tİ) yöntemi; düşük soğutucu maliyetleri ve çevreci yapısı dikkate alındığında önemli bir alternatif olmuştur.

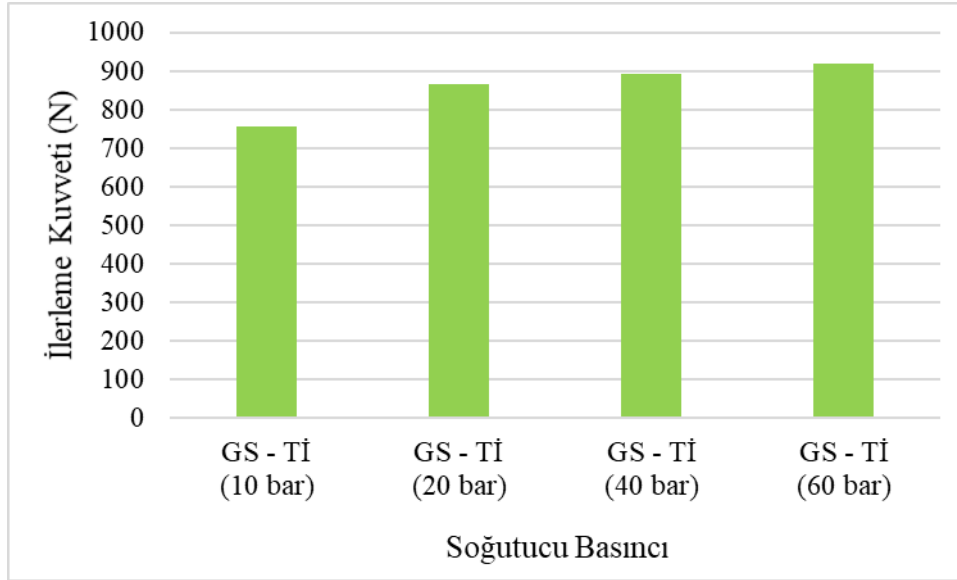
9.4. Değişen Soğutucu Basıncı Eşliğinde Yapılan Deneyler

Soğutma uygulamalarının operasyon verimliliğine katkıları değerlendirilmiştir. Soğutma işleminin operasyona katkılarının artırılması için farklı uygulamalar mevcuttur. Soğutucu akışkanların kimyasal bileşimi, uygulanma şekli ve uygulama basıncı soğutma yöntemlerinin verimliliğini artırmak için araştırılan konuların başında gelmektedir. Soğutucu akışkan basıncı katkısı ile kesme bölgesinin daha etkili soğutulması ve yağlanması takım üzerindeki termal yüklerin azalmasına ve takım performansının yükselmesine neden olacağı düşünülmektedir. Ayrıca yüksek basınç ile uygulanan soğutucu akışkan sayesinde talaş kırılarak etkili bir talaş kontrolü sağlanacaktır. Böylece operasyon verimliliği artırılması düşünülmektedir [158]. Çalışmamızın bu bölümünde değişen soğutucu akışkan basıncının operasyona olan katkıları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda farklı soğutma yöntemlerinin de test edildiği kesme parametreleri (kesme hızı 45 m/dak ve ilerleme oranı 0,1 mm/dev) ile aynı parametreler kullanılmıştır. Değişen soğutucu akışkan basıncı takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Takım içinden soğutma sistemini destekleyen soğutma pompasının yüksek basınçlara çıkabilmesi ve takım içinden uygulanan soğutmanın operasyona katkıları bu durumu doğrulamıştır. Bu çerçevede 60 bar basınç kapasitesine sahip pompanın basınç değeri ise kurulan sistem ile farklı basınçlara ayarlanabilir hale getirilmiştir. Çalışma içeriğinde, 10, 20, 40 ve 60 bar basınçlar uygulanmıştır. 10 bar basınç farklı soğutma yöntemlerinin kıyaslandığı çalışmada da kullanılmıştır.

Değişen soğutucu akışkan basıncının operasyona farklı çıktılar üzerinden katkıları bu bölümde incelenmiştir.

9.4.1. Soğutucu basıncının ilerleme kuvvetlerine etkisi

Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma işleminde artan soğutucu basıncının ilerleme kuvvetlerine etkisi Şekil 9.21.'da sunulmuştur.



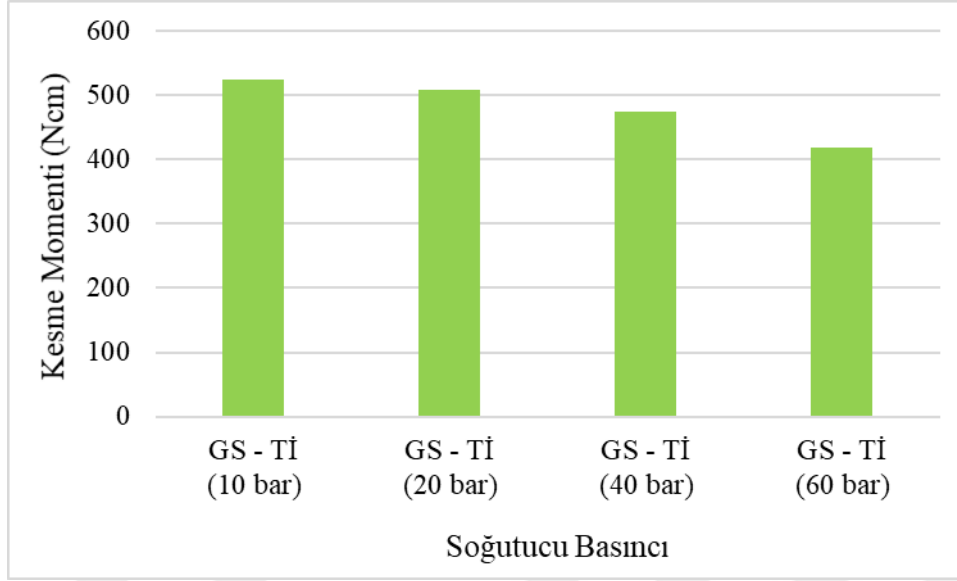
Şekil 9.21. Değişen soğutucu basıncının ilerleme kuvvetleri üzerinde etkileri

Şekil 9.21.'da sunulan grafik incelendiğinde artan soğutucu basıncı ile ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Bu kapsamda yapılan deneyler sonucunda en düşük ilerleme kuvveti 755,8 N olarak 10 bar basınç ile gerçekleştirilen deneyde ölçülmüştür. Soğutucu basıncının 20 ve 40 bar olduğu çalışmalarda ise sırası ile 865,5 N ve 893,9 N olarak ölçülmüştür. En yüksek ilerleme kuvveti ise 60 bar soğutucu basıncı eşliğinde yapılan deneyde 919,7 N olarak belirlenmiştir. Deneyler, soğutucu basıncının 10 bar 'dan 60 bar 'a çıkması ile ilerleme kuvvetlerinin %22 oranında arttığını göstermiştir.

Takım içinden yüksek basınç ile uygulanan soğutma birinci kesme bölgesinde oluşan ısının daha hızlı uzaklaştırılmasına neden olmuştur. Hızla tahliye edilen ısı iş parçası dayanımının korunmasına ve ilerleme kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur [158]. Bu duruma ek olarak takım içinden uygulanan yüksek basınçlı soğutma operasyonla aynı yönlüdür. Bu durum soğutma uygulaması ile birlikte akışkanın delik içinde bir itme etkisi oluşturmaya neden olmuştur. Soğutucu akışkanın bu itme etkisi artan basınç ile artmış ve ilerleme kuvvetlerinin basınç ile birlikte artmasına neden olmuştur.

9.4.2. Soğutucu basıncının kesme momentlerine etkisi

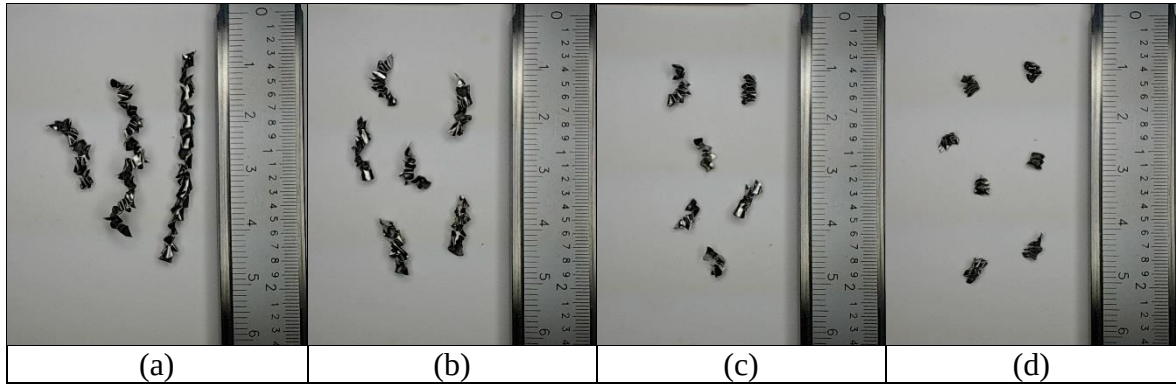
Delme işlemi sırasında oluşan kesme momentlerinin soğutucu akışkan basıncına bağlı olarak değişimi Şekil 9.22. de sunulmuştur.



Şekil 9.22. Değişen soğutucu basıncının kesme momentlerine etkisi

Farklı soğutucu basınçlarına bağlı olarak değişen kesme momentleri incelendiğinde artan soğutucu basıncı ile kesme momentinin azaldığı görülmüştür. Soğutucu akışkan basıncının 10 bar olduğu çalışmada en yüksek kesme momentini 524,26 Ncm olarak ölçülmüştür. Soğutucu akışkan basıncı 20 ve 40 bar değerlerine çıkarıldığında kesme momentleri sırası ile 507,87 ve 474,61 Ncm değerlerine düşmüştür. En düşük kesme momentini ise 60 bar soğutucu akışkan basıncı eşliğinde yapılan deneyde 417,83 Ncm olarak belirlenmiştir. Operasyon sırasında uygulanan soğutucu akışkan basıncının artması ile kesme momentlerinin %20 oranında azaldığı görülmüştür.

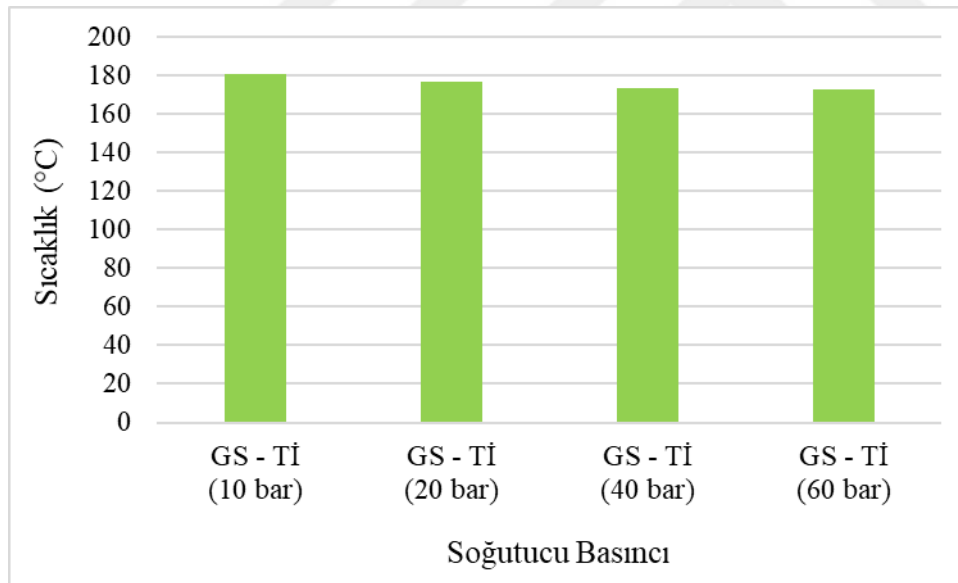
Delme işlemi sırasında artan soğutucu akışkan basıncıyla talaş boyutları önemli oranda düşmüştür. Daha küçük parçacıklar halinde oluşan talaşın tahliyesi kolaylaşmış ve etkili bir talaş kontrolü sağlamıştır [159–161]. Bu durum talaşın moment değerleri üzerindeki etkisini en aza indirmiştir. Ayrıca artan soğutucu akışkan basıncı sayesinde talaş tahliyesi de hızlanmıştır. Tüm bu etkiler kesme momentlerinin azalmasına zemin hazırlamıştır. Artan soğutucu akışkan basıncı ile değişen talaş boyutları Resim 9.9.'da sunulmuştur.



Resim 9.9. Artan soğutucu basıncı ((a): 10 bar, (b): 20 bar, (c): 40 bar, (d): 60 bar) ile değişen talaş görselleri

9.4.3. Soğutucu basıncının sıcaklık değişimine etkisi

Takım içinden uygulanan geleneksel soğutmada, soğutucu akışkanın sahip olduğu basıncın sıcaklık değerlerine etkisi Şekil 9.23.'de sunulmuştur.



Şekil 9.23. Değişen soğutucu basıncının sıcaklık değerleri üzerinde etkileri

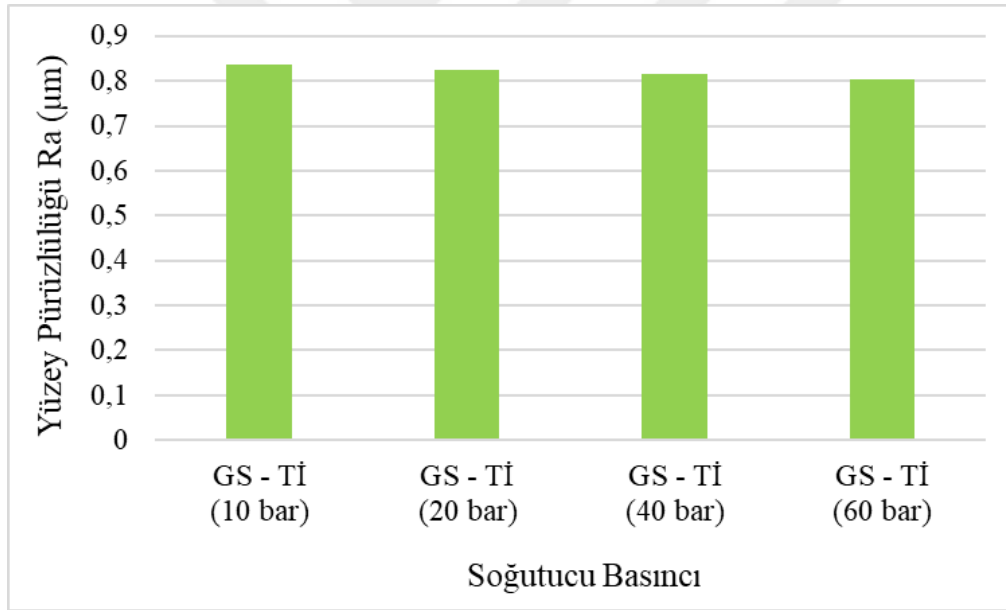
Yapılan deneyler sonucunda artan soğutucu basıncı ile sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmüştür. Takım içinden 10 bar basınç ile uygulanan soğutucu akışkan ile yapılan deneyde 180,4 °C ile en yüksek sıcaklık değeri ölçülmüştür. Soğutucu basıncı artırılarak 20 ve 40 bar değerlerine ulaştığında sırası ile 176,6 °C ve 173,1 °C sıcaklıklar ölçülmüştür. En düşük sıcaklık değeri 60 bar basınç eşliğinde yapılan deneyde 172,8 °C olarak belirlemiştir. Artan basınç ile birlikte sıcaklık değerleri %4,2 oranında azalmıştır. Söz konusu bu azalma

çok belirgin bir düşüş olmasa da artan soğutucu basıncının sıcaklıklar üzerinde olumlu katkıları olduğunu ortaya koymuştur.

Artan soğutucu basıncı ile birlikte talaş tahliyesinin hızlanması, talaşın daha hızlı ve etkili soğutulması kesme bölgesinde oluşan yüksek ısının kesme bölgesinden büyük bir hızla uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Bu durum ölçülen sıcaklık değerlerine yansımıştır [158].

9.4.4. Soğutucu basıncının yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi

Basınç etkisi ile yüzey pürüzlülüğünün değişimi Şekil 9.24.'de sunulmuştur. Diğer bölümlerde olduğu gibi bu bölümde de yüzey pürüzlülükleri R_a ; ortalama yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilmiştir.



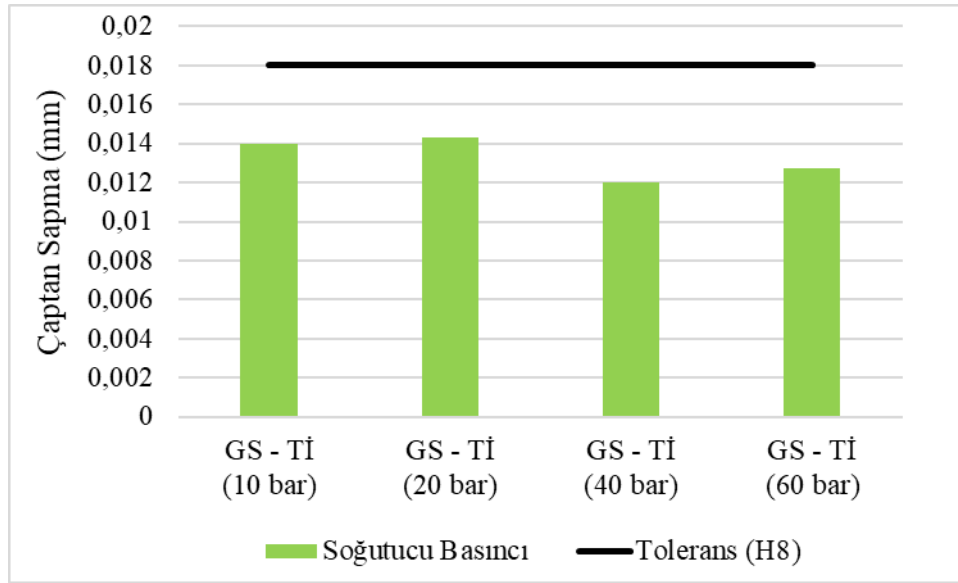
Şekil 9.24. Değişen soğutucu basıncının yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde etkileri

Yüzey pürüzlülükleri, artan soğutucu akışkan basıncı ile bir miktar azalma göstermiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü $R_a = 0,837 \mu m$ olarak 10 bar basınç eşliğinde ölçülmüştür. Basınç değerinin artarak 20 ve 40 bar 'a ulaşması ile yüzey pürüzlülükleri sırası ile $R_a = 0,825 \mu m$ ve $R_a = 0,815 \mu m$ olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü ise 60 bar basınç ile yapılan deneyde $R_a = 0,804 \mu m$ olarak belirlenmiştir. Artan soğutucu akışkan basıncı ile yüzey pürüzlülüğünde görülen azalma %4 oranında kalmıştır. Sıcaklık değerlerinde olduğu gibi yüzey pürüzlülüklerinde de değişim düşük seviyelerde kalmıştır.

Yüksek basınç ile birlikte görülen etkili talaş kontrolü, etkili soğutma ve yüksek takım performansı, soğutucu akışkan basıncının, yüzey kalitesine olumlu etkiler göstermesine yol açmıştır [90].

9.4.5. Soğutucu basıncının delik çapı ölçüsüne etkisi

Delik çapının nominal çap ölçüsünden sapmasına ilişkin değerleri Şekil 9.25.'de verilmiştir.

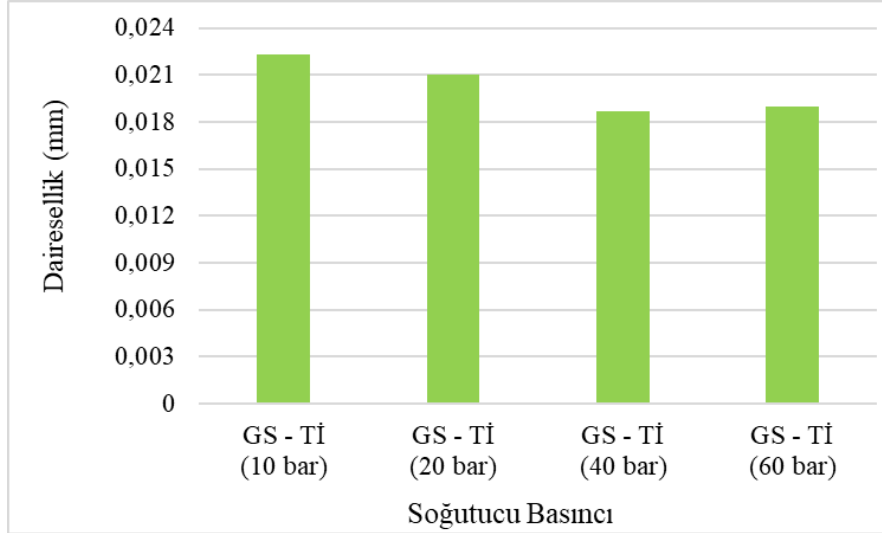


Şekil 9.25. Değişen soğutucu basıncının delik çapı üzerinde etkileri

Delik çapındaki değişim değerleri artan soğutucu akışkan basıncı ile belirgin bir değişim göstermemiştir. En yüksek delik çapı değişimi 10 bar ve 20 bar basınç altında 0,014 mm ve 0,0143 mm olarak ölçülmüştür. 40 bar basınç eşliğinde yapılan deneyde ise delik çapı değişim değeri 0,0120 mm olarak belirlenmiştir. Soğutucu akışkan basıncının 60 bar 'a çıkmasıyla 0,0127 mm delik çapı değeri elde edilmiştir. Artan soğutucu akışkan basıncı ile delik çapındaki sapma değerinde bariz bir değişme görülmemiştir. Değişen basınç değerlerine bağlı olarak delik çapı değerlerinde sadece bir mikron (1 μ m) değerinde bir fark tespit edilmiştir. Bu farklılık matkabin sahip olduğu boyutsal tolerans aralığından düşüktür. Soğutucu basıncının değişimi sonucunda elde edilen delik çapı değerlerinin tamamı delik çapı için arzu edilen tolerans değerinin altındadır.

9.4.6. Soğutma yöntemlerinin dairesellik değerlerine etkisi

Değişen soğutucu akışkan basıncının deliklerde meydana gelen dairesellik değerlerine etkisi Şekil 9.26.'da sunulmuştur.

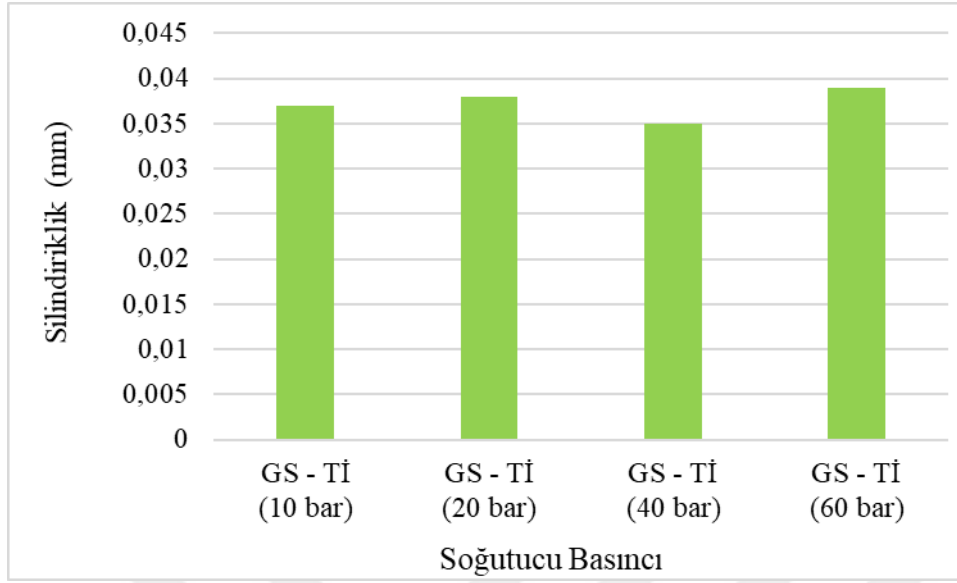


Şekil 9.26. Değişen soğutucu basıncının dairesellik değerleri üzerinde etkileri

Dairesellik değerlerinde, soğutucu akışkan basıncının etkisiyle bir miktar azalma görülmüştür. Grafik incelendiğinde; düşük basınçlarda (10 ve 20 bar) 0,0223 ve 0,0210 mm değerinde dairesellik olduğu görülmektedir. Basıncın artırılması ile (40 ve 60 bar) 0,0187 ve 0,0190 mm değerinde yine benzer dairesellik değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda en yüksek dairesellik değeri 0,0223 mm ile 10 bar basınç eşliğinde gerçekleştirilen deneyde tespit edilmiştir. En düşük dairesellikten sapma değeri ise 0,0187 mm olarak, 40 bar basınç altında yapılan deneyde ölçülmüştür. En yüksek ve en düşük dairesellikten sapma değerleri arasında 4,3 μm 'lık bir fark oluşmuştur. Bu fark ile birlikte artan basınç etkisiyle dairesellik verilerinde %21 oranında iyileşme görülmüştür. Bu oran yüksek gibi görülmesine rağmen, takımın boyutsal toleransları ve verilerin büyüklüğü dikkate alındığında, basıncın dairesellik üzerinde yüksek bir etkisi olmadığı düşünülmektedir.

9.4.7. Soğutma yöntemlerinin Silindiriklik değerlerine etkisi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda soğutucu akışkan basınçlarının silindiriklik değerlerine etkileri Şekil 9.27.'de verilmiştir.



Şekil 9.27. Değişen soğutucu basıncının silindiriklik değerleri üzerinde etkileri

Veriler ışığında silindiriklik değerleri ve soğutucu akışkan basıncının ilişkisinin ortaya koyulması hedeflenmiştir. Grafik incelendiğinde en düşük silindiriklik değeri 0,035 mm olarak, 40 bar basınç altında ölçülmüştür. En yüksek silindiriklik değeri ise 60 bar basınç ile yapılan deneyde 0,039 mm olarak belirlenmiştir. Düşük basınç değerlerinde (10 ve 20 bar) ise silindiriklikten sapma değeri 0,037 ve 0,038 mm olarak tespit edilmiştir. Silindiriklik değerleri arasında 4µm 'lik bir değişim görülmüştür. Söz konusu değişim silindiriklik değerlerine soğutucu akışkan basıncının önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir.



10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ti6Al4V malzemenin delindiği çalışmada kesme hızı, ilerleme oranı, soğutma yöntemleri ve soğutucu akışkan basıncı değişkenler olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlerin; ilerleme kuvvetleri, kesme momentleri, sıcaklıklar, takım performansı, yüzey pürüzlülükleri, delik çapı değerleri, dairesellik değerleri ve silindiriklik değerleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda elde edilen sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir.

Kuru şartlarda yapılan deneylerde artan ilerleme oranları ile ilerleme kuvvetleri %47 ile %87 arasındaki oranlarda artmıştır.

Kuru şartlarda artan kesme hızı ile ilerleme kuvvetleri %5 ile %12 oranında azalma göstermiştir. Ancak en yüksek ilerleme oranı (0,15 mm/dev) ile yapılan deneylerde artan kesme hızı ile ilerleme kuvvetleri %24 oranında artmıştır.

Tüm kesme hızlarında artan ilerleme hızları ile yapılan kuru deneylerde kesme momentleri %45 ile %250 oranında artmıştır.

Kesme hızı – kesme momenti ilişkisi değerlendirildiğinde kesme hızının 30 m/dak 'ya çıkması ile momentlerin %24 ila %59 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Kesme hızlarının artması ile (45 ve 60 m/dak) moment değerlerinde %24 ila %79 arasında değişen oranlarda arttığı belirlenmiştir.

Kesme işlemi sırasında tüm kesme koşullarında ölçülen sıcaklıkların artan ilerleme oranları ile %9 ile %24 arasında değişen oranlarda arttığı tespit edilmiştir.

Artan kesme hızları ile ölçülen sıcaklık değerlerinin %12 ila %28 oranlarında arttığı görülmüştür.

Kuru şartlarda yapılan deneyler sonucunda artan ilerleme oranı ile takımın aldığı yolun %70 ila %77 oranda belirgin bir şekilde azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda artan kesme hızları ile takımın aldığı yolun azaldığı

görülmüştür.

Delme uygulamaları sonucunda artan ilerleme oranları ile yüzey pürüzlülüklerinin %53 ila %113 oranında arttığı belirlenmiştir.

Kesme hızlarının artması ile yüzey pürüzlülüklerinin de %24 ila %111 oranında arttığı belirlenmiştir. Yüksek kesme hızları (45 ve 60 m/dak) ve ilerleme oranları (0,1 ve 0,15 mm/dev) ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünde artış daha yüksek olmuştur.

Kuru şartlarda yapılan deneylerde artan ilerleme oranları ile delik çapı değişim değerleri %18 oranında azalmıştır.

Artan kesme hızları ile delik çapı değişiminin azaldığı görülmüştür. Çalışma sonunda 0,15 mm/dev ilerleme oranı ile birlikte 30, 45 ve 60 m/dak kesme hızıyla yapılan deneylerde H8 toleransının altında delikler elde edilmiştir.

Kesme hızı 20 m/dak ile yapılan deneyler de artan ilerleme oranı ile dairesellik değeri %28 oranında azalmıştır. Diğer kesme hızlarında (30, 45 ve 60 m/dak) artan ilerleme oranı ile dairesellik değeri sırasıyla %18, %30 ve %105 oranında artmıştır.

Artan kesme hızları ile dairesellik değerlerinin genel olarak artış eğiliminde olduğu görülmüştür. En yüksek ilerleme oranı (0,15 mm/dev) ile yapılan deneylerde kesme hızının artması ile dairesellik değeri %92 oranında artmıştır.

Silindiriklik değerleri; 20 ve 30 m/dak kesme hızı eşliğinde yapılan deneylerde artan ilerleme oranı ile %29 ile %36 oranları arasında azalma eğilimi göstermiştir. Ancak 45 ve 60 m/dak kesme hızları ile yapılan deneylerde artan ilerleme oranı ile silindiriklik değerleri %53 ila %58 oranında artmıştır.

Düşük ilerleme hızları altında (0,05 mm/dev) artan kesme hızları ile birlikte silindiriklik değerleri %40 oranında azalmıştır. Ancak ilerleme oranlarının artması ile birlikte artan kesme hızlarıyla silindiriklik değerleri %63 oranında artmıştır.

Kuru kesme koşullarında elde edilen veriler kullanılarak operasyon maliyetleri ve ürün

kalitesine yönelik geliştirilen yapay sinir ağıları modelleri kabul edilebilir bir doğruluk oranı ortaya koymuştur.

Farklı soğutma yöntemlerinin kıyaslandığı deneyler sonunda; en yüksek ilerleme kuvvetleri takım içinden yapılan geleneksel soğutma yönteminde, en düşük ilerleme kuvvetleri ise minimum miktarda yağla ile soğutma yönteminde ölçülmüştür. Tüm soğutma yöntemlerinde tespit edilen ilerleme kuvvetleri, kuru şartlarda tespit edilen kuvvetlerden %0.8 ile %20 oranları arasında daha yüksektir.

Soğutma yöntemlerinin kesme momentleri üzerinde etkileri incelendiğinde; en yüksek kesme momentleri takım içinden yapılan geleneksel soğutma yönteminde, en düşük kesme momentleri ise takım içinden yapılan kuru hava ile soğutma yönteminde olduğu tespit edilmiştir. Takım içinden kuru hava ile yapılan soğutma işlemi kuru kesme şartlarına göre momentleri %23 oranında düşürmüştür.

En yüksek sıcaklık değeri takım dışından kuru hava ile yapılan soğutma yönteminde, en düşük sıcaklık değeri ise kriyojenik soğutma yönteminde ölçülmüştür. Tüm soğutma yöntemlerinde tespit edilen sıcaklıklar, kuru kesme koşullarına göre %9 ila %99 arasında düşmüştür.

Takım performansına en yüksek katkıyı takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yöntemi, en düşük katkıyı ise takım dışından kuru hava ve vortex soğutma yöntemleri vermiştir. Takım içinden geleneksel soğutma kuru şartlara göre takım performansını yaklaşık 125 kat artırırken, en düşük katkıyı sağlayan soğutma yöntemleri kuru şartlardan bile daha düşük seviyede kalmıştır.

En düşük yüzey pürüzlülüğü takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yöntemi eşliğinde, en yüksek pürüzlülük değerleri ise takım dışından kuru hava ve vortex soğutma yöntemleri eşliğinde yapılan deneylerde ölçülmüştür. Bu iki soğutma yöntemi kuru kesme şartlarından daha geride kalmıştır. Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma, kuru şartlara göre yüzey pürüzlülüğünü %39 oranında artırmıştır.

Delik çapının değişim değerleri dikkate alındığında en iyi değer takım dışından uygulanan geleneksel soğutma yönteminde, en kötü değer ise kriyojenik soğutma yönteminde

ölçülmüştür. Kuru kesme şartlarına göre takım içinden geleneksel soğutma uygulaması delik çapı değerlerini %31 oranında iyileştirmiştir. Diğer tüm soğutma yöntemleri, kuru şartlardan ve tolerans değerinden daha yüksek delik çapı değerlerine yol açmıştır.

Dairesellik değerleri incelendiğinde en iyi değer takım dışından uygulanan geleneksel soğutma yönteminde, en kötü değer ise kriyojenik soğutma yönteminde ölçülmüştür. Farklı soğutma şartlarında yakın dairesellik değerleri elde edilmiştir. Ancak tüm soğutma yöntemleri kuru kesme şartları ile ölçülen dairesellik değerlerinin gerisinde kalmıştır.

Soğutma uygulaması sonucunda elde edilen en yüksek silindiriklik değeri kriyojenik soğutma şartlarında ölçülmüştür. En düşük silindiriklik değeri ise kuru havanın takım içinden uygulandığı soğutma koşulunda belirlenmiştir. Genel olarak farklı soğutma yöntemlerinin uygulanması ile benzer silindiriklik değerleri elde edilmiştir.

Bu çalışmada uygulanan soğutma sistemlerinin tüm çıktıları değerlendirildiğinde; takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yönteminin operasyon verimliliğine önemli katkıları olduğu görülmüştür. Takım içinden uygulanan kuru hava ile soğutma yönteminin de etkili bir alternatif olduğu tespit edilmiştir.

Takım içinden uygulanan geleneksel soğutma yönteminde artan soğutucu basıncı ile ilerleme kuvvetlerinin %22 oranında arttığı görülmüştür.

Kesme momentleri, artan soğutucu basıncı (10, 20, 40 ve 60 bar) ile %20 oranında azalmıştır.

Soğutucu akışkanın basıncının artması ile sıcaklık değerleri %4 oranında azalmıştır.

Artan soğutucu akışkan basıncı ile yüzey pürüzlülüğünde %4 oranında azalma görülmüştür.

Değişen soğutucu basıncı ile elde edilen delik çapı değişim değerlerinin tamamı tolerans değerinin altında kalmıştır.

Değişen basınç değerlerine bağlı olarak delik çapı değişimi sadece bir mikron (1 μm) değerinde bir fark tespit edilmiştir. Basınç değişikliğinin delik çapı değerlerine etkisi

olmamıştır.

Değişen soğutucu basıncı ile dairesellik değerleri arasında 4,3 μm ' lik bir fark oluşmuştur. Bu fark ile birlikte artan basınç etkisiyle %21' lik oranda dairesellik verilerinde iyileşme görülmüştür.

Değişen soğutucu basıncı ile silindiriklik değerleri dar bir aralıkta ölçülmüştür. Silindiriklik değerlerine soğutucu akışkan basıncının önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

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

Tezgâh donanımlarının, ucuz ve çevreci bir soğutma yöntemi olan takım içinden kuru hava ile soğutma yöntemi geliştirilebilir.

Kuru hava ile takım içinden yapılan soğutma yöntemi üzerine araştırma – geliştirme çalışmaları yapılabilir.

Kuru hava ile takım içinden yapılan soğutmanın farklı soğutma sistemleri ile birleştirilerek verimliliğin artırılmasına yönelik ve soğutucu basıncının test edildiği çalışmalar denenebilir.

Soğutucu akışkan basıncının farklı soğutma yöntemleri üzerindeki etkilerinin test edilmesiyle literatüre katkı sunulabilir.

Buna benzer çalışmalar farklı malzeme grupları ve kesici takımlarla gerçekleştirilebilir.

Yapay sinir ağları ile modelleme çalışmaları, istatistiksel araştırmalar ile desteklenebilir.



KAYNAKLAR

1. Groover, M. P. (2011). *Principles of modern manufacturing* (Fourth edition). United States of America: J. Wiley & Sons, 101-152.
2. Yılmaz, B., Güllü, A. (2020). Titanyum ve süper alaşımlarda soğutma yöntemlerinin etkileri., H. Kalaycıoğlu ve S. Yalçınkaya. (Editörler). *Mühendislik alanında teknolojik gelişmeler*. İstanbul. Güven Plus Grup Yayıncılık, 102–120.
3. Trent, E. M., Wright, P. K. (2000). *Metal Cutting* (Fourth edition). London: Butterworth-Heinemann, 251-310.
4. Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H. (2011). Delik Delme Uygulamalarında Delik Kalitesinin Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu. *Mühendis ve Makine*, 52(619), 42–49.
5. Yılmaz, B., Uzun, G., Güllü, A. (2020). The Effects of Cutting Parameters on the Thrust Force, Cutting Moment and Cutting Temperature in Drilling Process Applied to Ti6Al4V Material. *Manufacturing Technologies and Applications*, 1(3), 1–8.
6. Bayraktar, Ş., Sıyambaş, Y., Turgut, Y. (2017). Delik delme prosesi: bir araştırma. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 124–124.
7. 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, 11-31.
8. Yücel, E., Günay, M., Ayyıldız, M., Erkan, Ö., Kara, F. (2011 16-18 Mayıs). *Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilir kullanımı*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) sunuldu, Elazığ, 116–121.
9. Sarıkaya, M. (2014). *Kobalt Esaslı Haynes 25 Süper Alaşımın İşlenebilirliğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 47-61.
10. Uzun, G. (2013). *Ti6Al4V Titanyum Alaşımında Kılavuz ile Vida Açma Problemlerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-22.
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*, 153–154(1–3), 1045–1050.
12. Sofuoğlu M. A. (2018). *Havacılık Alaşımı Olarak Hastelloy-X ve Ti6Al4V'nin Sıcak Ultrasonik Yardımlı Tornalamayla İşlenmesinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 7-26.
13. Çakır, M. C. (2010). *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri* (İkinci Baskı). Bursa: Dora Yayıncılık, 70-92.

14. Coromant, S. (1994). *Modern Metal Cutting – A practical handbook* (First Edition). Sandviken: Sandvik Coromant, 25-187.
15. Akkurt, M. (1992). *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları*. İstanbul: Birsan Yayınevi, 61-81.
16. Yılmaz, B., Güllü, A. (2020). AISI 1050 çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerine etkilerinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Pamukkale*, 26(4), 628–633.
17. Mavi, A. (2013). *Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenmesinde Kesici Takım Performansının Etkisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-40.
18. Taylan, F., Nazım Oral. (2018). Ti-6AL-4V Malzemesinin Tornalama İşleminde Yüksek Basıncılı Jet Soğutmanın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 10(1), 31–46.
19. Pul, M. (2010). *Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi Ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12-25.
20. Kaçal, A. (2008). *Azdırma Freze Çakılarında Kesme Kuvvetlerinin Ve Takım Aşınmasının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 36-50.
21. Gökçe, H. (2018). *Molibden ve Alaşımlarının İşlenebilirliğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 14-20.
22. Günay, M. (2016). *Ti-6Al-4V'nin Tornalanmasında Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Parametrelerin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 4-15.
23. Yılmaz, B., Karabulut, Ş., Güllü, A. (2020). A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 50–69.
24. Sur, G. (2008). *Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 101-115.
25. Yılmaz, B. (2016). *Pnömatik Tahrikli Dinamik Talaş Kırıcı Tasarımı ve İşleme Parametrelerine Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-35.
26. Yılmaz, B., Karabulut, Ş., Güllü, A. (2018). Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 553–563.

27. Gürbüz, H., Kafkas, F., Şeker, U. (2012 18-20 April). *AISI 316L çeliğinin işlenmesinde kesici takım kesici kenar formu ve talaş kırıcı formlarının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi*, Paper presented at the Batman University International participated Science and Culture Symposium, Batman, 18–20.
28. Çakmak, S., Sarıdemir, S. (2016). AISI 4140 çeliğinin işlenmesinde kesici uç geometrisinin talaş kırmaya ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, 293–304.
29. Güllü, A., Karabulut, Ş., Güldaş, A. (2008). Chip breaking problems in machining of Inconel 718 super alloy and chip breaker design. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23(1), 157–164.
30. Özçatalbaş, Y. (2019). Çeliklerin İşlenebilirliği: Kimyasal Bileşim, Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik İlişkisi. *Journal of Polytechnic*, 0900(2), 457–482.
31. Ezugwu, E. O. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12–13), 1353–1367.
32. 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*, 162–163(SPEC. ISS.), 609–614.
33. Shaw, M. C. (2005). *Metal cutting principles* (Second Edition). New York: Oxford University Press, 87-92.
34. DeGarmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A. (2003). *Materials and processes in manufacturing* (Ninth Edition). New Jersey: J. Wiley & Sons, 78-98.
35. Şeker, U., Kurt, A., Çiftçi, İ. (2002). Design and construction of dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion. *Materials and Design*, 23(4), 355–360.
36. Elitaş, M., Çiftçi, İ. (2017). Sertleştirilmiş AISI 52100 Malzemenin Aşındırıcı Diskle Kesilmesinin Araştırılması. *Türk Bilim Araştırma Vakfı*, 10(2), 1–10.
37. Çiftçi, İ., Gökçe, H. (2019). Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 201–213.
38. Yılmaz, B., Karabulut, Ş., Güllü, A. (2016 3-5 Kasım). *AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Torlanması Esnasında Kullanılan Dinamik Talaş Kırıcının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerinin Araştırılması*. 7. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumunda sunuldu, İstanbul, 1–9.
39. Melih Erdoğan. (2001). *Demir Dışı Alaşımlar Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Cilt 1*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 40-62.

40. Sekmen, M., Günay, M., Şeker, U. (2015). Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18(3), 141–148.
41. Özses, B. (2002). *Bilgisayar Sayısal Denetimli Takım Tezgâhlarında Değişik İşleme Koşullarının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-30 .
42. Akben, U. (2009). *Minimum Miktarda Yağlama (MMY) ile Kesmenin Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23-41.
43. Çiçek, A., Ekici, E., Uygur, İ., Akıncıoğlu, S., Özet, T. K. (2012). AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Delinmesinde Derin Kriyojenik İşlemin Takım Ömrü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *SDU International Journal of Technological Science*, 4(1), 1–9.
44. Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2006). *Metal Cutting Theory and Practice*. USA: Taylor & Francis, 50-71.
45. Çiftçi, İ. (2003). *Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı ve Boyutunun Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 31-49.
46. Tönshoff, H. K., Spintig, W., König, W., Neises, A. (1994). Machining of Holes Developments in Drilling Technology. *CIRP Annals*, 43(2), 551–561.
47. Yağmur, S., Acır, A., Şeker, U. (2013). AISI 1050 Çeliğinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin ve Kaplama Uygulamasının Dairesellikten Sapma (Ovalite) Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 16(3), 105–109.
48. Kıvak, T., Şeker, U. (2016, 3-5 Kasım). *Ti-6Al-4V Alaşımının Delinmesinde M42 HSS Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Delik Kalitesi Üzerindeki Etkileri*. Paper presented at the 7th International Symposium On Machining, İstanbul. 949–956.
49. 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, 13-47.
50. Yağmur, S. (2011). *Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-26.
51. Kıvak, T. (2012). *Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti-6Al-4V Alaşımının Delinebilirliği Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-34.
52. Turgay, K. (2007). *Inconel 718'in Delinebilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-33.
53. Şahin, N. (2001). *Tesviyecilik Meslek Teknolojisi I*. Ankara, Türkiye: Kozan Ofset, 67-82.

54. Yavuz, M. (2017). *Delme İşlemlerinde Takım Geometrisinin Etkilerinin Deneysel Ve Teorik Olarak Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-55.
55. Palmer, W. B., Oxley, P. L. B. (1959). Mechanics of orthogonal machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 173(1), 623–654.
56. Shaw, M. C., C. J. Oxford. (1957). On the Drilling of Metals: 2—The Torque and Thrust in Drilling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 79(1), 139–147.
57. Eggleston, D. M., Herzog, R., Thomsen, E. G. (1959). Observations on the angle relationships in metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*, 81(3), 263–279.
58. Thangaraj, A., Wright, P. K., Nissle, M. (1984). New Experiments on the Temperature Distribution in Drilling. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106(3), 242–247.
59. Çakıroğlu, R. (2011). *Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 38-45.
60. Uçak, N., Çiçek, A. (2018). The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 662–673.
61. Meral, G. (2016). *Matkap Uç ve Kanal Geometrisi Tasarımı ve Delme Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-42.
62. İnternet: Kutay, M. G. (Kasım, 2009). Toleranslar ve Ölçülendirme. *Mehmet Güven Kutay Çalışma Notları*. Web: http://www.guven-kutay.ch/ozet-konular/02_toleranslar.pdf adresinden 18 Temmuz 2022' de alınmıştır.
63. Kaptı, A. O. (2017). *MKM 104 Teknik Resim-II Ders Notu*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 4-25.
64. Kutlu, L. (2008). *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, 5-38.
65. Hayajneh, M. T. (2001). Hole quality in deep hole drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, 16(2), 147–164.
66. Sen, M., Shan, H. S. (2006). Analysis of roundness error and surface roughness in the electro jet drilling process. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(1), 1–9.
67. Bono, M., Ni, J. (2001). The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(15), 2261–2270.

68. Kaynak, Y., Lu, T., Jawahir, I. S. (2014). Cryogenic machining-induced surface integrity: A review and comparison with dry, mql, and flood-cooled machining. *Machining Science and Technology*, 18(2), 149–198.
69. Mamidi, V. K., Xavior, M. A. (2012). A Review on Selection of Cutting Fluids. *Journal of Research in Science & Technology*, 1(5), 3–19.
70. Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., Wakabayashi, T. (2004). Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(2), 511–537.
71. Jerry P. Byers. (2006). *Metalworking Fluids* (Second Edition). New York: Taylor & Francis, 45-80.
72. Gürkan, D., Yaşar, S. A., Uzun, G., Korkut, İ. (2020). Vorteks Soğutma Yönteminin Talaşlı İmalat Yöntemleri Ve Kesme Parametrelerine Göre İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(3), 730 -745.
73. İnternet: Vikipedi. (Eylül 2007). Titanyum. *Vikipedi Özgür Ansiklopedi*. Web: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Titanyum> adresinden 18 Temmuz 2022'de alınmıştır.
74. Çakır, F. H. (2019). *Ti6Al4V Alaşımına Kriyojenik İşlemin Etkilerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 5-20.
75. Ogurtsov, S. V. (1976). State and Prospects of the Development of Industrial Methods for the Production of Metallic Titanium. *Titanium and Titanium Alloys, Scientific and Technological Aspects*, 1, 41–61.
76. Akman, E. (2006). *Ti6Al4V Titanyum alaşımlarının atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 58-62.
77. İnternet: Tekna. (September 2010). Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *Tekna Holding ASA WebSite*. Web: <https://www.tekna.com/spherical-powders/ti64-titanium-alloy> adresinden 18 Temmuz 2022'de alınmıştır.
78. Yavuz, S., Deveci, M. (2012). İstatiksel Normalizasyon Tekniklerinin Yapay Sinir Ağın Performansına Etkisi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40, 167–187.
79. Şahin, İ. (2014). Yapay Sinir Ağları ile Al/SiC Kompozit Malzemenin Yüzey Pürüzlülüğünün Tahmini. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(1), 209–216.
80. Çakıroğlu, R., Uzun, G. (2021). Yüksek İlerleme ile Frezeleme İşlemi Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetinin ve İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 7(1), 58–66.
81. Çetin, E. (2003). *Yapay Sinir Ağları*. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 25 - 50.

82. Neşeli, S., Taşdemir, Ş., Yaldiz, S. (2009). Prediction of Surface Roughness on Turning With Artificial Neural Network. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 311(3), 65–75.
83. Özdağoğlu, A. (2013). Farklı Normalizasyon Yöntemlerinin TOPSIS’te Karar Verme Sürecine Etkisi. *Ege Akademik Bakış*, 13(2), 245–258.
84. Jayalakshmi, T., Santhakumaran, A. (2011). Statistical Normalization and Back Propagation for Classification. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 3(1), 89–93.
85. Öztemel, E. (2003). *Yapay Sinir Ağları* (Üçüncü Baskı). İstanbul: Papatya Yayıncılık, 28-39.
86. Karagüzel, U. (2019). Ti6Al4V Alaşımının Talaşlı İmalatı Sırasında Termal Kamera ile Sıcaklık Ölçümü ve Sonlu Elemanlarla Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 265–271.
87. Serin, G., Kahya, M., Özbayoglu, M., Ünver, H. Ö. (2019). Ti6Al4V İş Parçasının Tornalama İşleminde Özgül Kesme Enerjisi ve Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi ve Yapay Sinir Ağları Temelli Bir Tahmin Modeli Geliştirilmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, (43), 517–536.
88. Çelik, Y. H., Kilickap, E., Güney, M. (2017). Investigation of cutting parameters affecting on tool wear and surface roughness in dry turning of Ti-6Al-4V using CVD and PVD coated tools. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(6), 2085–2093.
89. Muthukrishnan, N., Davim, P. (2011). Influence of Coolant in Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V). *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 1(1), 9–14.
90. Palanisamy, S., McDonald, S. D., Dargusch, M. S. (2009). Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(9), 739–743.
91. Toprak, İ., B., Çağlar, M., F., Çolak, O., Kıran, K., Bayhan, M. (2012). Ti-6al-4v Süper Alaşımının Yüksek Basıncılı Soğutma Kullanılarak Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu. *SDU International Technologic Science*, 4, 30–39.
92. Karabıyık, A. (2016). *Ti-6Al-4V Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe ve Takım Aşınmasına Etkisinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 16-22.
93. Khatri, A., Jahan, M. P. (2018). Investigating tool wear mechanisms in machining of Ti-6Al-4V in flood coolant, dry and MQL conditions. *Procedia Manufacturing*, 26, 434–445.
94. Joy, N., Prakash, S., Krishnamoorthy, A., Antony, A. (2020). Experimental investigation and analysis of drilling in Grade 5 Titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Materials Today: Proceedings*, 21, 335–339.

95. Mathew, N. T., Vijayaraghavan, L. (2017). High-throughput dry drilling of titanium aluminide. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(2), 199–208.
96. Chatterjee, S., Mahapatra, S. S., Abhishek, K. (2016). Simulation and optimization of machining parameters in drilling of titanium alloys. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 62, 31–48.
97. Uzun, G., Yaşar, S. A., Korkut, İ. (2017). Ti-6Al-4V Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetlerine ve Delik Kalitesine Etkisinin İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2), 469–475.
98. Çiftçi, İ., Gökçe, H. (2018). Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Delme Yönteminin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 22(3), 627 - 631.
99. Wong, F. R., Sharif, S., Kamdani, K., Rahim, E. A. (2008, 21-23 May). *The effect of drill point geometry and drilling technique on tool life when drilling titanium alloy , Ti-6Al-4V*. Paper presented at the Proceedings of International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering, Johor.
100. Cantero, J. L., Tardío, M. M., Canteli, J. A., Marcos, M., Miguélez, M. H. (2005). Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(11), 1246–1255.
101. Yaman, K., Bıçakçı, N., Özgedik, A. (2017). Matkap Boyunun Delik Toleranslarına Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 20(4), 765–775.
102. Balaji, M., Venkata Rao, K., Mohan Rao, N., Murthy, B. S. N. (2018). Optimization of drilling parameters for drilling of Ti-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration. *Journal of the International Measurement Confederation*, 114, 332–339.
103. Sharif, S., Rahim, E. A. (2007). Performance of coated- and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy-Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1–3), 72–76.
104. Merzouki, J., Poulachon, G., Rossi, F., Ayed, Y., Abrivard, G. (2017). Method of Hole Shrinkage Radial Forces Measurement in Ti6Al4V Drilling. *Procedia CIRP*, 58, 629–634.
105. Lorain, R., Olivier, L., Poggi, A., Valiorgue, F., Rech, J. (2019). Identification of friction coefficients when drilling titanium TiAl6V4. *Procedia CIRP*, 82, 119–123.
106. Niketh, S., Samuel, G. L. (2018). Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 254–268.
107. Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Zheng, Y., Chen, L. (2018). Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-T351/titanium Ti6Al4V stack. *Journal of Materials Processing Technology*, 259(April), 270–281.

108. Lazoglu, İ., Poulachon, G., Ramirez, C., Akmal, M., Marcon, B., Rossi, F. and Krebs, M. (2017). Thermal analysis in Ti-6Al-4V drilling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 105–108.
109. Díaz-álvarez, J., De-la-cruz-hernández, J. A., Díaz-álvarez, A. (2015). Numerical modelling of the thermal effects on material in drilling processes Ti6Al4V Alloy. *Procedia Engineering*, 132, 427–432.
110. Díaz-álvarez, A., A, J., Díaz-álvarez, J. (2015). Estimation of Thermal Effects in Dry Drilling of Ti6Al4V. *Procedia Engineering*, 132, 433–439.
111. Li, R., Shih, A. J. (2007). Tool temperature in titanium drilling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 129(4), 740–749.
112. Sato, M., Aoki, T., Tanaka, H., Takeda, S. (2013). Variation of temperature at the bottom surface of a hole during drilling and its effect on tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 68, 40–47.
113. Pujana, J., Rivero, A., Celaya, A., López de Lacalle, L. N. (2009). Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(6), 500–508.
114. Paulsen, T., Pecat, O., Brinksmeier, E. (2016). Influence of Different Machining Conditions on the Subsurface Properties of Drilled TiAl6V4. *Procedia CIRP*, 46, 472–475.
115. Brinksmeier, E., Pecat, O. (2015). Quantitative analysis of chip extraction in drilling of Ti6Al4V. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64, 93–96.
116. Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Chen, L. and Zheng, Y. (2018). Evolution of 3D chip morphology and phase transformation in dry drilling Ti6Al4V alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 34(July), 531–539.
117. Zeilmann, R. P., Weingaertner, W. L. (2006). Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1–3), 124–127.
118. López De Lacalle, L. N., Pérez-Bilbatua, J., Sánchez, J. A., Llorente, J. I., Gutiérrez A. and Albóniga, J. (2000). Using high pressure coolant in the drilling and turning of low machinability alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(2), 85–91.
119. Trivedi, D. B., Kumar, A., Joshi, S. S. (2018). Drilling of Titanium Alloy using Heat Sink-based Ice Water Cooling. *Procedia Manufacturing*, 26, 633–644.
120. Nandgaonkar, S., Gupta, T. V. K., Joshi, S. (2016). Effect of water oil mist spray (WOMS) cooling on drilling of Ti6Al4V alloy using Ester oil based cutting fluid. *Procedia Manufacturing*, 6, 71–79.
121. Mathew, N. T. (2016). Drilling of titanium aluminide at different aspect ratio under dry and wet conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 24, 256–269.

122. Mathew, N. T., Vijayaraghavan, L. (2017). Environmentally friendly drilling of intermetallic titanium aluminide at different aspect ratio. *Journal of Cleaner Production*, 141, 439–452.
123. Ahmed, L. S., Kumar, M. P. (2016). Cryogenic drilling of Ti-6Al-4V alloy under liquid nitrogen cooling. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(7), 951–959.
124. Ahmed, L. S., Kumar, P. (2017). Performance evaluation of cryogenic cooling in reaming titanium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(3), 302–308.
125. Shakeel Ahmed, L., Pradeep Kumar, M. (2016). Multiresponse optimization of cryogenic drilling on Ti-6Al-4V alloy using topsis method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(4), 1835–1841.
126. Ahmed, L. S., Govindaraju, N., Kumar, M. P. (2016). Experimental Investigations on Cryogenic Cooling in the Drilling of Titanium Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(5), 603–607.
127. Perçin, M., Aslantaş, K., Uçun, İ., Kaynak, Y. and Çicek, A. (2016). Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating. *Precision Engineering*, 45, 450–462.
128. Döbbeler, B., Klocke, F. (2017). Process Oriented Choice of Lubricant Pressure and Volume Flow to Increase Machining Process Efficiency. *Procedia Manufacturing*, 8(October 2016), 361–368.
129. Bermingham, M. J., Palanisamy, S., Morr, D., Andrews, R. and Dargusch, M. S. (2014). Advantages of milling and drilling Ti-6Al-4V components with high-pressure coolant. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(1–4), 77–88.
130. Uzun, G., Korkut, İ. (2011, 16-18 Mayıs). *Delme ve Frezelemedeki Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi İçin Deney Seti Tasarımı ve İmalatı*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) sunuldu, Elazığ.
131. Pagan, A. S., Ballester, B. M., Herdrich, G. (2016). Total and Spectral Emissivities of Demising Aerospace Materials. *Frontier of Applied Plasma Technology*, 9(1), 1–6.
132. Hagqvist, P., Sikström, F., Christiansson, A. K. (2013). Emissivity estimation for high temperature radiation pyrometry on Ti-6Al-4V. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46(2), 871–880.
133. Yağmur, S., Çakiroğlu, R., Acir, A., Şeker, U. (2017). AISI 1050 Çeliğinin Delinmesinde İtme Kuvvetinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 241–246.
134. Li, G., Yi, S., Li, N., Pan, W., Wen, C. and Ding, S. (2019). Quantitative analysis of cooling and lubricating effects of graphene oxide nanofluids in machining titanium alloy Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 271(October 2018), 584–598.

135. 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.
136. Gupta, M. K., Song, Q., Liu, Z., Sarikaya, M., Jamil, M., Mia, M. and Li, Z. (2020). Ecological, economical and technological perspectives based sustainability assessment in hybrid-cooling assisted machining of Ti-6Al-4 V alloy. *Sustainable Materials and Technologies*, 26, 1 - 13.
137. Çiçek, A., Kıvak, T., Uygur, I., Ekici, E., Turgut, Y. (2012). Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1–4), 65–73.
138. Jamil, M., Zhao, W., He, N., Gupta, M. K., Sarikaya, M., Khan, A. M. and Pimenov, D. Y. (2021). Sustainable milling of Ti-6Al-4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment. *Journal of Cleaner Production*, 281, 1 - 14.
139. Gupta, M. K., Song, Q., Liu, Z., Sarikaya, M., Jamil, M., Mia, M. and Krolczyk, G. M. (2021). Experimental characterisation of the performance of hybrid cryo-lubrication assisted turning of Ti-6Al-4V alloy. *Tribology International*, 153, 106 - 120.
140. Han, S., Faverjon, P., Valiorgue, F., Rech, J. (2018). Prediction and modeling of thermal distortion in sequqntial MQL drilling of AlSi7 cylindrical parts. *Procedia CIRP*, 72, 336–339.
141. Biermann, D., Hartmann, H. (2012). Reduction of burr formation in drilling using cryogenic process cooling. *Procedia CIRP*, 3(1), 85–90.
142. Meral, G., Sarıkaya, M., Mia, M., Dilipak, H. and Şeker, U. (2019). Optimization of hole quality produced by novel drill geometries using the Taguchi S/N approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 339–355.
143. Günay, M., Meral, T. (2019). Kaplamalı ve Kaplamasız Karbür Matkap ile Ferritik Paslanmaz Çeliğin Delinebilirlik Analizi. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 5(2), 159–166.
144. Abdelhafeez, A. M., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Dowson, A. and Arnold, D. (2015). Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys. *Procedia CIRP*, 37, 230–235.
145. Yavuz, M., Gökçe, H., Çiftçi, İ., Gökçe, H., Yavaş, Ç. and Şeker, U. (2020). Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9–10), 4623–4633.
146. Çiçek, A., Uygur, I., Kıvak, T., Altan Zebek, N. (2012). Machinability of AISI 316 austenitic stainless steel with cryogenically treated M35 high-speed steel twist drills. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134(6), 1–6.

147. Çakir Şencan, A., Duran, A., Şeker, U. (2020). The Effect of Different Cooling Methods to Hole Quality and Tool Life in the Drilling of AA7075 and AA2024 Aluminum Alloys. *Manufacturing Technologies and Applications*, 1(2), 1–13.
148. Sevim, C., Genç, O. (2015). Al-7075 Malzemesinin Freze Tezgâhında Delme İşleminde Farklı Devir Ve İlerleme Hızları İçin Oluşan Titreşimlerin İncelenmesi. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 4(4), 50–57.
149. Kurt, M., Kaynak, Y., Bağci, E. (2008). Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(11–12), 1051–1060.
150. Ramulu, M., Branson, T., Kim, D. (2001). A study on the drilling of composite and titanium stacks. *Composite Structures*, 54(1), 67–77.
151. Lee, W. S., Lin, C. F. (1998). Plastic deformation and fracture behaviour of Ti-6Al-4V alloy loaded with high strain rate under various temperatures. *Materials Science and Engineering A*, 241(1–2), 48–59.
152. Xia, T., Kaynak, Y., Arvin, C., Jawahir, I. S. (2016). Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1–4), 605–616.
153. Pradeep Kumar, M., Shakeel Ahmed, L. (2017). Drilling of AISI 304 Stainless Steel under Liquid Nitrogen Cooling: A Comparison with Flood Cooling. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1518–1524.
154. Rahim, E. A., Sasahara, H. (2011). A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology International*, 44(3), 309–317.
155. Gutnichenko, O., Bushlya, V., Bihagen, S., Ståhl, J. E. (2018). Influence of GnP additive to vegetable oil on machining performance when MQL-assisted turning Alloy 718. *Procedia Manufacturing*, 25, 330–337.
156. Govindaraju, N., Shakeel Ahmed, L., Pradeep Kumar, M. (2014). Experimental investigations on cryogenic cooling in the drilling of AISI 1045 steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(11–12), 1417–1421.
157. Braga, D. U., Diniz, A. E., Miranda, G. W. A., Coppini, N. L. (2002). Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(1), 127–138.
158. Cayli, T., Klocke, F., Döbbeler, B. (2018). Increasing Energy Efficiency in Turning of Aerospace Materials with High-Pressure Coolant Supply. *Procedia Manufacturing*, 21, 405–412.
159. Da Silva, R. B., MacHado, Á. R., Ezugwu, E. O., Bonney, J. and Sales, W. F. (2013). Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(8), 1459–1464.

160. Yavuz, M., Gokce, H., Şeker, U. (2017). Matkap geometrisinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkisinin araştırılması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1-8.
161. Degenhardt, J. A., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. (2005). Generalized groove-type chip breaker effects on drilling for different drill diameters and flute shapes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(14), 1588–1597.







EK-1. Takım görselleri

Deney No	Üst Görünüş	Yan Görünüş - 1	Yan Görünüş - 2
Kullanılmamış			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

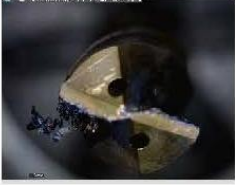
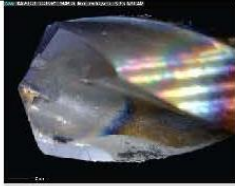
Resim 1.1. Kuru kesme şartları ile yapılan deneylerden alınan takım görselleri

EK-1. (devam) Takım görselleri



Resim 1.1. (devam) Kuru kesme şartları ile yapılan deneylerden alınan takım görselleri

EK-1. (devam) Takım görselleri

Soğutma Yöntemi	Üst Görünüş	Yan Görünüş - 1	Yan Görünüş - 2
KURU			
GS - Tİ			
GS - TD			
KHS - Tİ			
KHS - TD			
VRTX			
MQL			
KRYJ			

Resim 1.2. Farklı Soğutma yöntemleri ile yapılan deneylerden alınan takım görselleri

EK-2. Talaş görseli

Deney No	İlk delikten alınan talaş	Son delikten alınan talaş
1		
2		
3		
4		Talaş takımında kaldı
5		
6		
7		Talaş takımında kaldı
8		

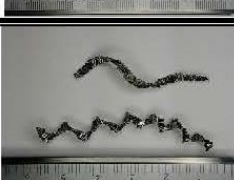
Resim 2.1. Kuru kesme şartları ile yapılan deneylerden alınan talaş görselleri

EK-2. (devam) Talaş görseli

9		
10		Talaş takımında kaldı
11		
12		
13		
14		Talaş takımında kaldı
15		
16		

Resim 2.1. (devam) Kuru kesme şartları ile yapılan deneylerden alınan talaş görselleri

EK-2. Talaş görseli

Soğutma Yöntemi	İlk delikten alınan talaş	Son delikten alınan talaş
KURU		
GS - Tİ		
GS - TD		Talaş takımında kaldı
KHS - Tİ		Talaş takımında kaldı
KHS - TD		
VRTX		
MQL		
KRYJ		Talaş takımında kaldı

Resim 2.2. Farklı Soğutma yöntemleri ile yapılan deneylerden alınan talaş görselleri



GAZİ GELECEKTİR...