

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOLİBDEN KATKILI NANO-AKIŞKAN SOĞUTMA SIVISININ AISI 5140
ÇELİĞİNİN FREZELENME PERFORMANSINA ETKİLERİNİN FARKLI
SOĞUTMA SIVILARI İLE KARŞILAŞTIRILARAK ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TUFAN ZEROOĞLU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi ÜNAL DEĞİRMENCİ

BİNGÖL-2024

**MOLİBDEN KATKILI NANO-AKIŞKAN SOĞUTMA SIVISININ AISI 5140
ÇELİĞİNİN FREZELENME PERFORMANSINA ETKİLERİNİN FARKLI
SOĞUTMA SIVILARI İLE KARŞILAŞTIRILARAK ARAŞTIRILMASI**

Dr. Öğr. Üyesi Ünal DEĞİRMENCİ danışmanlığında, Tufan ZEROOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 08/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Yunus Onur YILDIZ *İmza* :
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ünal DEĞİRMENCİ *İmza* :
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Üsâme Ali USCA *İmza* :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/.....
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimimim ve tez çalışmalarım süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmalarım tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ünal DEĞİRMENCİ'ye teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar esnasında ve tez çalışmaları süresince yardımlarını gördüğüm değerli hocam Sayın Doç. Dr. Serhat ŞAP'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, deneysel çalışmalar için laboratuvar ve diğer çalışma imkânlarından faydalandığım Bingöl Üniversitesi'ne de teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tüm yaşamım boyunca her an yanımda olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anne ve babama, tezin her aşamasında sabır gösterdikleri, fedakârlık ve desteklerini esirgemedikleri için sonsuz teşekkür ederim.

Tufan ZEROOĞLU

Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İmalat Çelikleri.....	4
1.1.1. Çelik Malzemelerin Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması	5
1.1.2. AISI 5140 İmalat Çeliğinin Genel Özellikleri.....	7
1.1.2.1. Kimyasal Bileşimi	7
1.1.2.2. Mekanik Özellikleri	9
1.1.2.3. Kullanım Alanları.....	11
1.2. Talaşlı İmalat.....	15
1.2.1. Talaşlı İmalat Yöntemleri	16
1.2.2. Frezeleme İşlemi Üzerine Genel Bir Bakış	17
1.2.2.1. Frezeleme İşleminin Tanımı ve Önemi.....	19
1.2.2.2. Frezeleme İşleminde Kullanılan Parametreler.....	21
1.2.2.3. Frezeleme İşleminde Karşılaşılan Zorluklar	25
1.2.3. Frezelemede Kullanılan Soğutma ve Yağlama Sıvıları	27
1.2.3.1. Soğutma ve Yağlama Sıvılarının Özellikleri ve Görevleri	28
1.2.3.2. Soğutma ve Yağlama Sıvılarının Çeşitleri	33
1.2.3.3. Nanoakışkan Soğutma ve Yağlama Sıvıları.....	36
1.2.3.3.1. Nanoakışkan Soğutucuların Tanımı ve Avantajları.....	37
1.2.3.3.2. Nanoakışkan Soğutucuların özellikleri ve Kullanım alanları..	40

2. KAYNAK ÖZETLERİ	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	52
3.1. Deney Malzemesi	52
3.2. Kullanılan Takım Tutucu ve Kesici Takımlar.....	53
3.3. İşlenebilirlik Deneyleri.....	55
3.4. Soğutma ve Yağlama Ortamları.....	57
3.5. Ölçüm Aletleri.....	61
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	65
4.1. Yüzey pürüzlülüğü Analizleri	65
4.2. Takım aşınması Analizleri	69
4.3. Kesme Sıcaklıkları Analizleri	77
4.4. Talaş Morfolojisi	82
4.5. Güç Tüketimi Analizleri	87
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
5.1. Sonuçlar	90
5.2. Öneriler	92
KAYNAKLAR	93

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BOF	: Bazık Oksijen Fırını
SLM	: Seçici Lazer Eritme
EDM	: Elektrik Deşarj İşleme
Mo	: Molibden
MMY	: Minimum Miktarda Yağlama
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
TFmDTD	: Tek Fazlı Mini Doğal Taşınım Döngüleri
GNP	: Grafen Nano Trombositler
RSM	: Yanıt Yüzey Metodolojisi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
NMQL	: Nanoakışkan Minimum Miktarda Yağlama
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
AIN	: Alüminyum Nitrit
TiN	: Titanyum Nitrür
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlüğü
MQL	: Minimum Miktarda Yağlama

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Başlıca Tornalama Yöntemleri [47].....	16
Şekil 1.2. Başlıca Freze Yöntemleri [47].....	17
Şekil 3.1. Deney numuneleri ve işleme doğrultuları	53
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan kesici takım uçları.....	54
Şekil 3.3. CNC Freze tezgâhı.....	57
Şekil 3.4. Soğutma/yağlama ortamı şematik gösterim	59
Şekil 3.5. Nanoakışkan hazırlama süreçleri.....	60
Şekil 3.6. SEM cihazı ve ölçüm gösterimi.....	63
Şekil 3.7. Ölçüm yöntemlerine ait şematik gösterim	64
Şekil 4.1. 75 m/dk kesme hızı için ilerleme hızına bağlı farklı kesme ortamlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri.....	66
Şekil 4.2. 100 m/dk kesme hızı için ilerleme hızına bağlı farklı kesme ortamlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri.....	67
Şekil 4.3. 75 m/dk kesme hızında ve 0,075 mm/dev ilerleme hızında kesme farklı kesme ortamlarındaki yüzey topografyaları	68
Şekil 4.4. 75 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının yan aşınma üzerindeki etkileri	70
Şekil 4.5. 100 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının yan aşınma üzerindeki etkileri	71
Şekil 4.6. 75 m/dk kesme hızında, 0,075 mm/dev ilerleme hızında ve farklı kesme ortamlarında kesici takım SEM görüntüleri	72
Şekil 4.7. Kuru ortamda kullanılan kesici takımın EDS analizi	73
Şekil 4.8. MMY ortamında kullanılan kesici takım EDS analizi.....	74
Şekil 4.9. Taşkın soğutma ortamında kullanılan kesici takımın EDS analizi	75
Şekil 4.10. Nanoakışkan ortamında kullanılan kesici takımın EDS analizi	76
Şekil 4.11. Kuru ortamda kesici takım haritalama analizi	76
Şekil 4.12. 75 m/dk kesme hızında farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri.....	77

Şekil 4.13. 75 m/dk kesme hızı ve 0,075mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri	78
Şekil 4.14. 75 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri.....	79
Şekil 4.15. 75 m/dk kesme hızında farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri.....	80
Şekil 4.16. 100 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri.....	81
Şekil 4.17. 100 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri	81
Şekil 4.18. 75 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma /yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri.....	82
Şekil 4.19. 75 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri.....	84
Şekil 4.20. 100 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri	85
Şekil 4.21. 100 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri.....	86
Şekil 4.22. 75 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının güç tüketimi üzerindeki etkileri.....	88
Şekil 4.23. 100 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının güç tüketimi üzerindeki etkileri.....	89

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. AISI 5140 İmalat Çeliğinin Kullanım Alanları.....	13
Tablo 1.2. Soğutma ve Yağlama Sıvılarının Özellikleri ve Görevleri	28
Tablo 1.3. Farklı nanopartikül kategorilerinin özellikleri [90]	38
Tablo 3.1. Deney numunesinin (AISI 5140) kimyasal bileşimi [115]	52
Tablo 3.2. Kesici ucun özellikleri [133].....	55
Tablo 3.3. CNC freze makinesinin bazı özellikleri [133]	55
Tablo 3.4. Deney tasarım planı (2x2x4)	56
Tablo 3.5. Mo nanotozlarının bazı özellikleri.....	60

MOLİBDEN KATKILI NANO-AKIŞKAN SOĞUTMA SIVISININ AISI 5140 ÇELİĞİNİN FREZELENME PERFORMANSINA ETKİLERİNİN FARKLI SOĞUTMA SIVILARI İLE KARŞILAŞTIRILARAK ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Günümüz mühendislik alanında, malzeme işleme süreçlerinin verimliliği ve dayanıklılığı, endüstriyel uygulamalarda sürekli olarak araştırılan bir konu haline gelmiştir. Bu kapsamda, Frezeleme, imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan temel bir işleme sürecidir. Metaller de dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynar ve çeşitli uygulamalarda kullanılan bileşenlerin üretiminde vazgeçilmezdir. Frezeleme işlemlerinin verimliliğini artırmak ve takım ömrünü uzatmak için soğutma sıvıları yaygın olarak kullanılır. Özellikle metal işleme tekniklerinde, geleneksel soğutma yöntemleri yetersiz kalmakta ve daha yenilikçi çözümler arayışı hız kazanmaktadır. Bu bağlamda, nanoteknolojinin gelişimi, malzeme işleme süreçlerine yeni bir bakış açısı getirerek daha etkili ve verimli çözümler sunma potansiyeli taşımaktadır.

AISI 5140 çeliğinin işlenmesi bir dizi benzersiz zorluğu beraberinde getirir. Özellikle takım aşınmasına karşı hassastır, kesme işlemi sırasında önemli miktarda ısı üretir ve optimal olmayan yüzey kalitesiyle sonuçlanabilir. Bu kapsamda nanopartiküllerin malzemelerin işlenmesi sırasında tribofilm oluşumu sağlayarak yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık kontrolü problemlerine çözüm olabileceği düşünülmektedir.

Bu tez kapsamında çeşitli kesme parametreleri ve soğutma/yağlama koşulları kullanılarak AISI 5140 çeliğinin frezelenmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla iki kesme hızı (75-100 m/dk), iki ilerleme hızı (0,075-0,100 mm/dev) ve kuru, minimum miktar yağlama, taşkın soğutma ve nanoakışkan olmak üzere dört farklı soğutma ortamı kullanılmıştır. Nanoakışkan kesme sıvısına %5 Mo nanopartikülleri eklenmiştir. Üreticinin tavsiyeleri ve literatürdeki çalışmalar ışığında seçilen giriş parametreleri kullanılarak yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme sıcaklığı ve talaş morfolojisi gibi işlenebilirlik özellikleri incelenmiş ve güç tüketimi analizleri yapılmıştır. Ayrıca, sürdürülebilir nanoakışkan kesme sıvılarının işlenebilirlik ve güç tüketimi üzerindeki etkileri farklı soğutma/yağlama sıvıları ile deneylerle karşılaştırılarak araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, molibden katkılı nanoakışkan kullanımının yüzey pürüzlülüğü, yan aşınma, talaş morfolojisi ve güç tüketimi özelliklerinde iyileşmelere yol açtığı sonucuna varılmıştır. Kesme sıcaklığında ise taşkın soğutma ortamının daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak talaşlı imalat sırasında nanoakışkan kesme sıvılarının kullanılacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: AISI 5140, Frezeleme, Nanoakışkanlar, Yüzey pürüzlülüğü, Enerji tüketimi.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF MOLYBDENUM ADDED NANO-FLUID COOLANT ON THE MILLING PERFORMANCE OF AISI 5140 STEEL IN COMPARISON WITH DIFFERENT COOLANTS

ABSTRACT

In today's engineering field, the efficiency and durability of material processing processes have become a constantly researched topic in industrial applications. In this context, Milling is a basic machining process widely used in the manufacturing industry. It plays an important role in shaping various materials, including metals, and is indispensable in the production of components used in various applications. Coolants are widely used to increase the efficiency of milling operations and extend tool life. Especially in metal processing techniques, traditional cooling methods are inadequate and the search for more innovative solutions is gaining momentum. In this context, the development of nanotechnology has the potential to provide more effective and efficient solutions by bringing a new perspective to material processing processes.

Machining AISI 5140 steel presents a unique set of challenges. It is particularly susceptible to tool wear, generates significant heat during the cutting process, and can result in suboptimal surface quality. In this context, it is thought that nanoparticles can be a solution to surface roughness and temperature control problems by providing tribofilm formation during the processing of materials.

In this thesis, milling of AISI 5140 steel was studied using various cutting parameters and cooling/lubrication conditions. For this purpose, two cutting speeds (75-100 m/min), two feed rates (0,075-0,100 mm/rev) and four different cooling media were used: dry, minimum amount lubrication, flood cooling and nanofluid. 5% Mo nanoparticles were added to the nanofluid cutting fluid. Machinability features such as surface roughness, tool wear, cutting temperature and chip morphology were examined and power consumption analyzes were performed using input parameters selected in the light of the manufacturer's recommendations and studies in the literature. Additionally, the effects of sustainable nanofluid cutting fluids on machinability and power consumption were investigated by comparing experiments with different cooling/lubricating fluids. As a result of the research, it was concluded that the use of molybdenum-doped nanofluids led to improvements in surface roughness, side wear, chip morphology and power consumption properties. It has been determined that the flood cooling environment is more effective at the cutting temperature. As a result, it is predicted that nanofluid cutting fluids can be used during machining.

KeyWords: AISI 5140, Milling, Nanofluids, Surface roughness, Energy consumption.

1.GİRİŞ

Teknolojinin hızla geliştiği günümüzde, yüksek verimlilik ve malzeme performansının artırılması, endüstriyel uygulamalar için yüksek performanslı malzemelerin işlenmesi, üretim süreçlerinin verimliliği ve kalitesi açısından kritik bir öneme sahiptir [1-4]. Bu bağlamda, metal işleme operasyonları, malzeme işlenirken ortaya çıkan çeşitli parametrelerin kontrol edilmesini gerektirir. Bu parametrelerden bazıları, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi gibi çıktıları doğrudan etkileyen faktörlerdir [5]. Metal işleme endüstrisinde, malzeme işlenebilirliği, üretim süreçlerinin verimliliği ve son ürün kalitesi açısından kritik bir faktördür [6]. Özellikle yüksek mukavemetli çelikler gibi zor işlenebilir malzemelerde, uygun soğutma teknikleri işleme performansını önemli ölçüde etkileyebilir [7,8].

İşleme performansı açısından araştırılma gereği duyulan önemli malzemelerden biri AISI 5140 çeliğidir. AISI 5140 çeliği yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direnci sağlayan alaşım bileşenlerinden oluşur [9,10]. Bu malzeme genellikle sıcak işlemeye uygunluğu ve orta düzeyde kaynak yapılabilirliği nedeniyle yataklar, dişliler, miller, dişli kutuları, dingiller, yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren boru ve çubuk uygulamalarında, tornavida uçları, matkap uçları gibi takımlarda kullanılır [11]. Pek çok kullanım alanı nedeni ile imalat çeliği olarak adlandırılan bu çeliğin işlenebilirliği, kimyasal yapısındaki yüksek krom içeriği nedeniyle zorlayıcı olabilir [12]. Bu malzemenin işlenmesi sırasında mekanik [13], kimyasal [14,15] ve termal etkilerin meydana gelmesi nedeni ile yüzey pürüzlülüğünün oluşması ve takımın aşınması kaçınılmazdır. İşleme esnasında farklı takım aşınması türleri oluşsa da takım ömrünü belirlemede genelde yan ve krater aşınmasının yaygın olarak dikkate alındığı görülmektedir [16].

Yüksek tokluğu ve aşınma direnciyle tanınan, yaygın olarak kullanılan bir alaşım olan AISI 5140 çeliği, otomotiv ve makine endüstrileri de dâhil olmak üzere bir dizi endüstriyel sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Ancak AISI 5140 çeliğinin işlenmesi bir dizi benzersiz zorluğu beraberinde getirir. Özellikle takım aşınmasına karşı hassastır, kesme işlemi sırasında önemli miktarda ısı üretir ve optimal olmayan yüzey kalitesiyle

sonuçlanabilir. Bu sorunları çözmek için kesme yağları ve emülsiyonlar gibi geleneksel kesme sıvıları tercih edilen soğutucular olmuştur. Bu geleneksel soğutucular, soğutma ve yağlama özellikleri nedeniyle beğeni topladı ve işleme operasyonlarının verimliliğinin arttırılmasında çok önemli bir rol oynamıştır. Bununla birlikte, işleme gereksinimleri geliştikçe ve gelişmiş performans arayışı yoğunlaştıkça, bu geleneksel soğutma sıvılarının sınırlamaları daha da net bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Nanoakışkan bazlı soğutucuların ortaya çıkışı, işlemede kesme sıvılarını çevreleyen tartışmaya yol açmıştır. Nanoakışkanlar, bir baz akışkan içinde nanopartiküllerin tasarlanmış süspansiyonları ile karakterize edilen, akışkan teknolojisinde yeni bir sınırı temsil eder. Nanopartiküllerin, özellikle de molibdenin bu nanoakışkanlara entegrasyonu, öncelikle molibdenin olağanüstü termal iletkenliği ve tribolojik özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Bu özellikler, molibden gibi katkılı nanoakışkanlar biçiminde kullanıldığında, potansiyel olarak geleneksel soğutucuların yeteneklerini aşan, üstün soğutma ve yağlama konusunda yüksek performans ortaya koymuştur.

Temel bir işleme süreci olan frezeleme, çok sayıda uygulama için çeşitli malzemelerin, özellikle de metallerin hassas şekilde şekillendirilmesini sağlayarak modern imalatın temelini oluşturur. Havacılıktan otomotive kadar çok yönlülük, hassasiyet ve kusursuz yüzey kalitesi gerektiren endüstrilere hitap etmektedir. Frezeleme operasyonlarının kalitesi ve verimliliği, en kritik olanlar arasında yer alan kesme sıvıları veya soğutucuların seçimi de dahil olmak üzere çok sayıda faktörden etkilenir.

Son zamanlarda, işleme alanında umut verici bir yenilik olarak nanoakışkan bazlı soğutucuların ortaya çıkışına tanık olduk. Bir baz akışkan içinde nanopartiküllerin tasarlanmış süspansiyonları ile karakterize edilen nanoakışkanlar, gelişmiş termal iletkenlik ve tribolojik özellikler sunar. Bu amaçla araştırılan çeşitli nanopartiküller arasında molibden nanopartikülleri dikkat çekmiştir. Molibden olağanüstü termal iletkenliğe ve tribolojik özelliklere sahiptir ve bu da onu nanoakışkanlara dahil edilmek için ilgi çekici bir aday haline getirmektedir.

Kesme sıvıları frezelemede çok yönlü bir rol oynar; kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olur, işleme sırasında oluşan önemli ısıyı dağıtır,

takım-iş parçası arayüzünü yağlar ve talaş tahliyesini kolaylaştırır. Sonuç olarak, uygun soğutma sıvısının seçimi, işleme performansını optimize etmenin ve takım ömrünü uzatmanın önemli bir unsuru olarak karşımıza çıkıyor.

Tokluğu ve aşınma direnciyle tanınan AISI 5140 çeliği, otomotiv ve makine endüstrileri de dâhil olmak üzere çeşitli sektörlerde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Ancak bu alaşımın işlenmesi, takım aşınması, aşırı ısı üretimi ve istenen yüzey kalitesinin elde edilmesindeki zorluklar gibi zorlukları beraberinde getirir. Kesme yağları ve emülsiyonlar gibi geleneksel kesme sıvıları, işleme prosesi sırasında soğutma ve yağlama sunarak bu sorunları çözmek için geleneksel seçim olmuştur. Son yıllarda nanoakışkan bazlı soğutucular, gelişmiş termal iletkenlik ve tribolojik özellikler sunan, işlemede devrim niteliğinde bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır.

Literatürde belirtildiği üzere malzemelerin işlenmesi, kesme bölgesindeki sıcaklığı önemli ölçüde artırır ve iş parçası kalitesine karar vermede kritik öneme sahiptir. Geleneksel kesme sıvıları, işlemede ıstıyı dağıtmak için yaygın olarak kullanılsa da işçilerin ekolojisini ve sağlığını tehdit eder. Bu nedenle, geleneksel kesme sıvılarına, çevre ve kullanıcı dostu alternatifler belirleme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda nanopartiküllerin malzemelerin işlenmesi sırasında tribofilm oluşumu sağlayarak yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık kontrolü problemlerine çözüm olabileceği düşünülmektedir. Literatürde AISI 5140 çeliğinin işlenebilirliği üzerine kısmi çalışmalar yer alsa da nanopartikül içeren nanoakışkan soğutma sıvıları altındaki işleme performansları üzerine herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında molibden katkılı ile yeni bir nano-akışkan soğutma sıvısı kullanılarak AISI 5140 çeliğinin frezelenmesi sırasında takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, talaş morfolojisi ve enerji tüketimi gibi çıktı parametrelerinin araştırılması ve farklı soğutma yağlama koşulları altındaki işleme parametreleri ile karşılaştırılması yapılmıştır.

1.1. İmalat Çelikleri

Çeliğin imalatı, çeşitli hammaddelerin kullanımını içerir. Demir cevheri, kok, hurda, pik demir, ferro alaşımlar ve sünger demir gibi temel hammaddeler, otomotiv, makine ve inşaat sektörleri gibi geniş bir uygulama alanına sahip çeliğin üretiminde öneme sahiptir. İslah çeliği olarak da bilinen çelik, çok yönlü yapısı ve yaygın kullanımını sayesinde artan bir talep görmektedir [17].

Çelik üretiminin temel proseslerinden biri olan Yüksek Fırın prosesi, demir cevherinden demirin verimli ve ekonomik bir şekilde üretimini sağlar. Bu proses sırasında demir cevheri ve kok, yüksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonlara tabi tutulur. Yüksek Fırın prosesinin yan ürünleri olan cüruf ve fırın gazı, sırasıyla çimento üretiminde ve enerji geri kazanımında kullanılır. Refrakter malzemeler, fırının işlem sırasında oluşan yoğun ısıya karşı korunmasında hayati bir rol oynar. Bu proses, ham demirdeki silikon, karbon ve fosfor gibi elementlerin miktarını azaltarak çelik üretimine katkı sağlar [18].

Çelik üretiminde bir diğer önemli proses olan Bazik Oksijen Fırını (BOF) süreci, ham demirden çelik üreten entegre tesislerin bileşenidir. BOF prosesi, yüksek sıcaklıklar ve oksijen ilavesi sayesinde ham demirdeki istenmeyen elementlerin giderilmesini sağlar. Bazik oksijen fırınları ile elektrik ark ocakları arasındaki temel farklar, fırın içerisindeki reaksiyonlar ve prosesin enerji verimliliği açısından belirgindir. Genellikle, BOF prosesi diğer modern çelik üretim tekniklerine kıyasla daha hızlı ve enerji açısından daha verimli kabul edilir [19].

Çeliğin uygulama alanları ve önemi, çok çeşitli proje ve endüstrileri kapsar. İnşaat ve altyapıdaki rolü göz ardı edilemez; alaşımlı kaliteli çelikler, yüksek dayanıklılık, çok yönlülük ve sertlik gibi özellikleri sayesinde çeşitli inşaat projelerinde tercih edilir. Çelik, ulaşım ve otomotiv endüstrilerinde de hayati bir role sahiptir; ağırlık azaltma dayanıklılık ve geniş uygulama alanı gibi avantajları ile bu sektörlerde güvenlik, verimlilik ve performansı artırır [20].

Çelik imalatı, dayanıklı tüketim malları ve yatırım malları sektörlerinde ana girdi olarak, malların üretimi ve tüketiminde önemli bir role sahiptir. Otomotiv, makine imalatı, alet yapımı ve inşaat gibi çeşitli sektörlerde kullanımı, çeliğin zengin karbon içeriği, soğuk işlenme özellikleri ve eklemeli imalat uygulamaları gibi özellikleri sayesinde inovasyonu ve ekonomik büyümeyi teşvik eder [21].

1.1.1. Çelik Malzemelerin Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması

Çeliğin imalatı, bitmiş ürünün kalitesi ve özellikleri üzerinde belirleyici etki yapan çeşitli hammaddelerin kullanılmasını gerektirir. Demir-çelik endüstrisinde kok, hurda, pik demir, ferro alaşım ve sünger demir gibi başlıca hammaddeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler, özellikle otomotiv, makine ve inşaat sektörlerinde geniş uygulama alanları bulan çeliğin üretiminde zorunludur. İslah çeliği olarak da bilinen çelik, çok yönlü yapısı ve geniş kullanım alanı nedeniyle talebinin sürekli arttığı bir malzemedir [22].

Çelik üretimindeki süreçlerden biri, Yüksek Fırın prosesidir. Yüksek sıcaklıkların yol açtığı kimyasal reaksiyonlar için yüksek fırında bir araya getirilen demir cevheri ve kok, cüruf ve fırın gazı gibi başlıca yan ürünler üretir; cüruf çimento üretiminde kullanılabilir. Refrakter malzemeler, işlem sırasında oluşan yoğun ısıya karşı fırın gövdesini korur; karbon ve silisyum karbür (SiC) gibi malzemeler yaygın olarak tercih edilir. Yüksek Fırın prosesi, ham demirdeki silikon, karbon ve fosfor miktarlarını azaltarak çelik üretimine önemli katkılarda bulunur [23].

Çelik üretiminin bir diğer önemli aşaması, entegre tesislerde merkezi bir role sahip olan Bazik Oksijen Fırını (BOF) sürecidir. BOF işlemi, yüksek sıcaklıklar ve oksijenin ilavesiyle ham demirdeki istenmeyen maddeleri arındıran kimyasal reaksiyonları tetikler. Bazik oksijen fırınları ile elektrik ark ocakları arasındaki farklar, reaksiyonlar ve enerji verimliliği açısından önemlidir. BOF sürecinin, diğer modern çelik üretim yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve enerji açısından daha verimli olduğu kabul edilir [22].

Çelik, inşaat ve altyapı projelerinde geniş çapta kullanılarak bu alanlarda önemli bir role sahiptir. Silikon/manganez çelikleri gibi alaşımlı çelikler, kaynaklanabilir ve ince taneli

yapısıyla çeşitli inşaat projelerinde tercih edilir. Çeliğin sağladığı avantajlar arasında yüksek dayanıklılık, çok yönlülük ve sertlik bulunmaktadır. Bu özellikler, çeliği inşaat sektöründe tercih edilen bir malzeme yapar [24].

Ulaşım ve otomotiv endüstrileri de çelik kullanımından büyük ölçüde yararlanır. Özellikle, Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler (AHSS), araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini ve performansı artırır. Çelik, aşınma ve yıpranmaya karşı direnci ile otomotiv bileşenleri için ideal bir malzemedir. Çelik, inşaat, otomotiv, makine imalatı, enerji ve tarım gibi çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [25].

Çelik imalatı, dayanıklı tüketim malları ve yatırım malları sektörlerinde kilit bir girdi olup, çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Çelik imalatının özellikleri arasında zengin karbon içeriği, soğuk işleme özellikleri ve eklemeli imalat uygulamaları yer alır. Bu özellikler, çeliği inovasyon ve ekonomik büyüme için tercih edilen bir malzeme yapar.

Çelik, demir ve karbonun bir alaşımı olup, karbon bu alaşımda küçük bir yüzde olarak bulunur ve esasen karbonlu bir bileşen olarak işlev görür. Çelikler, içerdikleri karbon miktarına göre üç ana kategoriye ayrılır: düşük karbonlu, orta karbonlu ve yüksek karbonlu çelikler. Düşük karbonlu çelikler, aynı zamanda yumuşak çelikler olarak da adlandırılır ve mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle dünya çelik üretiminin büyük bir kısmını oluşturur. Bu çeliklerin öne çıkan özellikleri arasında yüksek süneklik ve dövülebilirlik, üstün kaynaklanabilirlik, orta ve yüksek karbonlu çeliklere kıyasla daha düşük çekme mukavemeti ve iyi işlenebilirlik yer alır.

Alaşımli çelikler, farklı alaşım elementleri ve uygulama gereksinimlerine göre sınıflandırılan çeliklerdir. Karbon dışında, bu çelikler az miktarda fosfor, demir, silikon, kükürt ve manganez içerebilir ve %1,5'i geçmeyen karbon oranına sahiptirler. Alaşımli çelikler, sade karbonlu çeliklere göre artırılmış mukavemet, aşınma direnci ve geliştirilmiş korozyon direnci gibi benzersiz avantajlar sunar. Krom, nikel, molibden ve tungsten gibi elementler içeren alaşımli çelikler, çeşitli uygulamalar için özel olarak tasarlanmıştır.

Paslanmaz çelikler ise, özellikle korozyona ve paslanmaya karşı yüksek dirençleriyle tanınan çelik malzeme grubunu temsil eder. Bu çelikler, düşük karbon içeriği ve %12-18 arasında değişen krom oranı ile karakterize edilir ve beş ana gruba ayrılır. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması, onların kimyasal bileşimleri, korozyon dirençleri ve kullanım alanlarına göre yapılır. Krom, krom-nikel ve krom-manganez içeren çelikler ile çok fazlı çelikler, paslanmaz çeliklerin başlıca kategorilerini oluşturur. Çelik malzemelerin detaylı özelliklerini ve sınıflandırmalarını bilmek, belirlenen bir amaç için en uygun çelik tipinin seçiminde öneme sahiptir.

1.1.2. AISI 5140 İmalat Çeliğinin Genel Özellikleri

SAE 5140 veya 1.7035 olarak da bilinen AISI 5140 imalat çeliği, olağanüstü mukavemet ve sertlik özellikleriyle bilinen bir alaşımlı çeliktir [26]. Bu malzemenin kimyasal bileşimi, yüksek tokluk özelliğine katkıda bulunan alaşım elementleri olarak yüksek oranda krom ve molibden içerir [27]. AISI 5140 çeliğinin genel özelliklerinden bazıları, %0,37-0,44 arasında değişen karbon içeriği ve %0,50-0,80 arasında manganez içeriğidir [28]. Bu çelik, dikkat çekici özellikleri nedeniyle otomotiv, enerji, imalat, makine ve alet yapımı gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [29].

AISI 5140 çeliği, benzersiz kimyasal bileşimi ve ısıtma süreçleri sayesinde etkileyici mekanik özellikler sergiler [27]. Bir çalışmada, AISI 5140 temperlenmiş çelik numuneleri 870°C'ye ısıtıldı ve suda söndürüldü, bu işlem mikro yapılarında ve mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açtı. Bu temperlenmiş çeliğin mikro yapısının 720 ±5°C'de 2 saat süreyle su verilerek küreselleştirildiği gözlemlenmiştir [30]. Ayrıca, sıcak haddelenmiş AISI 5140 çeliğine uygulanan tam tavlama ve normalleştirme işlemlerinin mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini değiştirdiği ve böylece işlenebilirliğini artırdığı gösterilmiştir.

1.1.2.1. Kimyasal Bileşimi

AISI 5140 imalat çeliğindeki karbon (C) içeriği, malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Karbon, çeliğin yapısının temelini oluşturduğu ve dayanıklılığını, sünekliğini ve genel performansını doğrudan etkilediği için çelikte çok

önemli bir elementtir [31]. AISI 5140 çeliğinin kimyasal bileşimi tipik olarak %0,38 ile %0,45 arasında değişen bir karbon içeriği içerir. Daha yüksek karbon içeriği genellikle artan mukavemet ve sertlikle sonuçlanırken, daha düşük karbon içeriği daha iyi süneklik ve işlenebilirliğe yol açar [31]. Karbon içeriğinin çelik özellikleri üzerindeki bazı önemli etkileri şunlardır [28]:

- Artan güç ve sertlik
- Geliştirilmiş aşınma direnci
- Azaltılmış süneklik ve işlenebilirlik

AISI 5140 imalat çeliğinde bir diğer önemli element, çeliğin özelliklerini önemli ölçüde etkileyen kromdur (Cr). Korozyon direncini, sertleşebilirliğini ve genel performansını arttırmak için çeliğe sıklıkla krom eklenir [31]. AISI 5140 çeliğinde krom içeriği tipik olarak %0,9 ile %1,2 arasında değişir [32]. Kromun çelikteki varlığı, malzemenin sertliğine, mukavemetine ve aşınma direncine katkıda bulunan kararlı karbürlerin oluşumuna yol açar. Çelikteki krom içeriğinin bazı önemli etkileri şunlardır:

- Geliştirilmiş korozyon direnci
- Arttırılmış sertleşebilirlik ve dayanıklılık
- Geliştirilmiş aşınma direnci

AISI 5140 imalat çeliğinin kimyasal bileşimi, sadece karbon ve krom ile sınırlı değildir; mangan (Mn), silisyum (Si), molibden (Mo) ve fosfor (P) gibi diğer elementler de çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Mangan, AISI 5140 çeliğinde genellikle %0,70 ile %0,90 arasında bir oranda bulunur ve çeliğin mukavemetini ve sertliğini arttırırken, aynı zamanda kaynak edilebilirliğini ve işlenebilirliğini de iyileştirmektedir [26]. Silisyum, çeliğin elastikiyetini ve korozyon direncini artırırken, aynı zamanda oksidasyon sırasında oluşabilecek zararlı etkileri azaltır. AISI 5140 çeliğinde silisyum oranı genellikle %0,15 ile %0,35 arasında değişir. Molibden, çeliğin sıcaklık altındaki dayanıklılığını ve sertliğini artırarak, yüksek sıcaklık koşullarında kullanımını mümkün kılar. Fosfor ise, genellikle çeliğin dayanıklılığını artırma amaçlı katılır, ancak yüksek miktarlarda çeliğin sünekliğini azaltabilir [26].

Bu kompleks kimyasal bileşim, AISI 5140 çeliğinin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasını sağlayarak otomotiv sektöründen ağır makine imalatına, savunma sanayine kadar birçok alanda tercih edilmesine olanak tanır. Çeliğin yüksek mukavemeti, sertliği ve aşınma direnci, özellikle yüksek performans gerektiren parçaların üretiminde avantaj sağlamaktadır. Bu avantaj, vites çarkları, mil ve eksantrik milleri gibi parçaların üretiminde sıklıkla kullanılmasını beraberinde getirir. Ayrıca, korozyon direnci ve sertleşebilirliği sayesinde, çelik dış mekan uygulamaları ve korozyona karşı dayanıklı olması gereken ürünler için de ideal bir malzeme olarak öne çıkar [33].

AISI 5140 çeliğinin bu geniş kullanım alanları, onu özellikle mühendisler ve tasarımcılar için cazip bir seçenek haline getirir. Çelik, yüksek performanslı uygulamalar için gereken mekanik özellikleri sağlarken, aynı zamanda işlenebilirliği ve kaynak edilebilirliği ile de üretim süreçlerinde esneklik sunar. Bu çelik grade'nin seçilmesi, maliyet-etkin bir çözüm sunarken, son ürünün kalitesini ve dayanıklılığını maksimize etme potansiyeline sahiptir [32].

1.1.2.2. Mekanik Özellikleri

AISI 5140 imalat çeliği, orta karbon içeriği ve krom (Cr) ile molibden (Mo) katkı maddeleri sayesinde, mükemmel mekanik özellikler sergileyen bir alaşımdır. Bu alaşımın temel özelliği, ısı işleme koşullarına bağlı olarak değişken sertlik, yüksek mukavemet ve iyi tokluk değerlerine ulaşabilmesidir [26]. AISI 5140, genellikle %0,38-0,43 karbon, %0,70-0,90 krom ve %0,15-0,30 molibden içerir. Bu bileşenler, alaşımın sertleştirilebilirliğini ve kapsamlı bir sıcaklık aralığında stabil mekanik özellikler göstermesini sağlar [11].

AISI 5140 çeliğinin sertleştirilmesi genellikle 840°C ila 870°C arasında bir östenitleme sıcaklığında gerçekleştirilir. Bu işlem, çelikteki karbonun çözünürlüğünü artırarak martenzitik bir dönüşüm sağlar. Sonrasında, yağda hızlı soğutma işlemi uygulanarak martenzit fazı elde edilir. Bu işlem, malzemenin sertlik ve mukavemetini önemli ölçüde artırır ancak aynı zamanda kırılgenliği de arttırabilir. Bu nedenle, genellikle bir temperleme işlemi takip eder [34]. Temperleme işlemi, genellikle 150°C ila 200°C arasında gerçekleştirilir ve bu, martenzit fazındaki iç gerilmeleri azaltır, çeliğin tokluğunu

arttırırken mukavemetini bir dereceye kadar korur. Temperleme sıcaklığı ve süresi, elde edilmek istenen özelliklere göre ayarlanabilir [35].

AISI 5140'ın yorulma direnci, dinamik yük altında çalışan makinelerde ve araçlarda bileşenlerin üretiminde önemli bir faktördür. Bu direnç, malzemenin mikroyapısının yanı sıra uygulanan yüzey işlemleriyle de önemli ölçüde artırılabilir. İyon nitürleme işlemi, AISI 5140 çeliğinin yüzey sertliğini ve dolayısıyla yorulma direncini artırma potansiyeline sahiptir. Bu süreç, azot iyonlarının çelik yüzeyine yüksek enerji ile bombardıman edilerek yüzeyde sert bir nitrit tabakası oluşturulmasını içerir [26]. İyon nitürleme, çeliğin aşınma direncini de artıran bir yöntemdir ve bu sayede bileşenlerin uzun ömürlü kullanımını mümkün kılar [36].

AISI 5140 çeliği, yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir malzemedir. Çeliğin aşınma direnci, alaşım elementlerinin yanı sıra uygulanan ısıl işlemlerle de optimize edilebilir. Aşınma direnci, özellikle otomotiv sektöründe şanzıman dişlileri, miller ve bağlantı elemanları gibi parçaların üretiminde önem taşır [33].

AISI 5140 çeliğinin aşınma direncini artırmak için kullanılan bir diğer yöntem ise borlama işlemidir. Borlama, çeliğin yüzeyine bor elementinin difüzyonu yoluyla sert bir borür tabakası eklenmesi işlemidir. Bu işlem, malzemenin yüzey sertliğini önemli ölçüde artırır ve aşınma direncini iyileştirir. Borlanmış AISI 5140 çelikler, özellikle yüksek aşınma koşullarına maruz kalan uygulamalarda üstün performans gösterir [37].

AISI 5140 çeliği, otomotiv, enerji, imalat ve ağır sanayi sektörlerinde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu alaşım, şanzıman dişlileri, miller, krank milleri, bağlantı çubukları ve diğer yüksek mukavemet gerektiren bileşenlerin üretiminde sıklıkla kullanılır. Çeliğin ısıl işlem koşulları ve yüzey işlemleri, spesifik uygulama gereksinimlerine göre özelleştirilebilir, bu da AISI 5140'ı çok yönlü bir malzeme haline getirir [32].

AISI 5140 imalat çeliğinin mekanik özellikleri, alaşımın kimyasal bileşimi, mikroyapısal karakteristikleri ve uygulanan ısıl işlemlerle yakından ilişkilidir. Bu çeliğin üstün mekanik özellikleri, geniş endüstriyel uygulama alanları için ideal bir malzeme seçimi yapar.

Mühendisler ve malzeme bilimcileri, AISI 5140'ın özelliklerini daha da iyileştirmek ve yeni uygulama alanları bulmak için sürekli araştırmalar yapmaktadır [30].

AISI 5140 çeliği üzerine yapılan son araştırmalar, bu malzemenin mikroyapısal özelliklerini ve dolayısıyla mekanik performansını optimize etmek için yeni tekniklerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Özellikle, lazer işleme teknikleri, malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmede ve mikro yapısal homojenliği artırmada önemli bir rol oynar. Lazerle sertleştirme işlemi, AISI 5140 çeliğinin yüzey sertliğini ve yorulma direncini artırırken, aynı zamanda iç gerilmeleri minimize edebilir, bu da malzemenin genel performansını önemli ölçüde iyileştirir [38].

Aditif imalat teknikleri, özellikle seçici lazer eritme (SLM) gibi, AISI 5140 gibi alaşımların imalat sürecini yeniden şekillendirmektedir. Bu teknikler, karmaşık geometrilerin ve hafif yapıların üretimini mümkün kılarak, otomotiv ve havacılık sektörlerinde özellikle avantaj sağlar. SLM ile üretilen AISI 5140 parçalar, geleneksel yöntemlere göre daha iyi mekanik özellikler ve yüksek mukavemet-ağırlık oranları sergileyebilir [39].

AISI 5140'ın çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik konuları da önemli bir araştırma alanıdır. Enerji tüketimi, ısıl işlem süreçlerinin optimizasyonu ve atık azaltma stratejileri, bu alaşımın üretimi ve kullanımıyla ilgili çevresel ayak izini azaltmayı amaçlar. Ek olarak, geri dönüşüm ve yeniden kullanım yöntemleri, AISI 5140 çeliğinin yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğini artırmada büyük öneme sahiptir [40].

1.1.2.3. Kullanım Alanları

AISI 5140 imalat çeliği, düşük alaşımlı bir çelik olarak bilinir ve özellikle yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri nedeniyle çeşitli sanayi sektörlerinde tercih edilen bir malzemedir [41]. Bu çelik, %0,38-0,43 karbon, %0,7-0,9 manganez, %0,2-0,35 silisyum, %0,4-0,7 krom ve %0,15-0,25 molibden içerir. Krom ve molibden katkıları, AISI 5140 çeliğine mükemmel sertleştirilebilirlik ve çekme mukavemeti kazandırırken, aynı zamanda kaynak yapılabirliğini ve işlenebilirliğini de

artırır. Bu özellikler, AISI 5140'ı otomotiv, enerji, imalat, makine ve alet yapımı gibi çeşitli sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahip kılar [41].

Otomotiv endüstrisinde, AISI 5140 çeliği genellikle dişliler, miller, kranklar ve süspansiyon komponentleri gibi yüksek mukavemet gerektiren parçaların üretiminde kullanılır. Mükemmel sertleştirilebilirlik özelliği sayesinde, bu parçalar yüksek yüzey sertliğine ve yorulma direncine ulaşabilir, böylece ağır yük altında bile uzun ömürlü performans sergileyebilir [29]. Enerji sektöründe, AISI 5140 çelik çubuklar ve miller, petrol ve gaz sondaj ekipmanlarının bileşenleri olarak tercih edilir. Bu uygulamalarda, malzemenin yüksek mukavemeti ve aşınma direnci, zorlu operasyon koşullarına ve sürekli aşınmaya karşı dayanıklılığı garantiler [42].

İmalat sektöründe, AISI 5140'ın işlenebilirliği ve kaynak yapılabilirliği, makine parçaları, hafif ile orta yük taşıyan yapısal bileşenler ve yüksek dayanıklılık gerektiren diğer uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirir. Bu çelik, özellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan ekipman parçalarının üretiminde tercih edilir [29]. Ayrıca, AISI 5140, tarım makineleri, ağır hizmet tipi motor parçaları ve basınçlı kaplar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Bu çelikten üretilen komponentler, sıcaklık dalgalanmalarına ve mekanik strese karşı mükemmel direnç sunar, bu da onları zorlu çevresel koşullarda bile güvenilir seçenekler haline getirir [26].

Makine ve alet yapımında, AISI 5140'ın sertleştirilmiş ve temperlenmiş durumunun yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren uygulamalarda avantaj sağladığı bilinmektedir. Bu malzemenin çeşitli kesici aletler, kalıplar ve diğer hassas bileşenlerin imalatında tercih edilmesi, termal işlem kabiliyetinin özgül mukavemet ve sertlik değerlerine ulaşılmasını sağlayarak bu uygulamalar için ideal bir seçim haline getirir. Mühendisler ve tasarımcılar, AISI 5140'ın mükemmel mekanik özelliklerini değerlendirerek daha hafif, daha verimli ve daha uzun ömürlü makine ve ekipmanlar geliştirebilir. Bu gelişim, üretim maliyetlerinin düşürülmesine ve enerji verimliliğinin artırılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır [43].

AISI 5140 imalat çeliği, yüksek mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve iyi işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde, geniş bir endüstriyel uygulama alanında tercih edilen bir

malzemedir. Bu çelik, modern mühendislik ve imalat sektörlerinin karşılaştığı zorlu gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarlanmış ve geliştirilmiştir [31].

AISI 5140 imalat çeliğinin kullanım alanlarının geniş bir yelpazeye yayıldığı görülmektedir. Bu çelik, yüksek mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde otomotivden enerji sektörüne, imalattan makine ve alet yapımına kadar birçok farklı alanda tercih edilen bir malzeme olmuştur [29]. İmalat sektöründe, AISI 5140'ın işlenebilirliği ve kaynak yapılabilirliği sayesinde makine parçaları, yapısal bileşenler ve yüksek dayanıklılık gerektiren diğer uygulamalar için ideal bir malzeme olarak öne çıkar. Özellikle, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan ekipman parçalarının üretiminde sıklıkla tercih edilen AISI 5140, tarım makineleri, ağır hizmet tipi motor parçaları ve basınçlı kaplar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde de kullanılmaktadır[44].

Tablo 1.1. AISI 5140 İmalat Çeliğinin Kullanım Alanları

Kullanım Alanları	Açıklama
Otomotiv Endüstrisi	AISI 5140 çeliği, dişliler, miller, kranklar ve süspansiyon komponentleri gibi yüksek mukavemet gerektiren parçaların üretiminde kullanılır. Yüksek yüzey sertliği ve yorulma direnci sağlar [29].
Enerji Sektörü	Petrol ve gaz sondaj ekipmanlarında, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren çubuklar ve miller için tercih edilir. Zorlu operasyon koşullarına dayanıklıdır [42].
İmalat Sektörü	AISI 5140'ın işlenebilirliği ve kaynak yapılabilirliği, makine parçaları ve yapısal bileşenlerin üretiminde ideal hale getirir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan ekipman parçalarında kullanılır [29].
Makine ve Alet Yapımı	Kesici aletler, kalıplar ve hassas bileşenler için kullanılır. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş durumları yüksek mukavemet ve tokluk sağlar [43].
Tarım Makineleri ve Ağır Hizmet Tipi Uygulamalar	Sıcaklık dalgalanmalarına ve mekanik strese karşı direnç sunar. Tarım makineleri, motor parçaları ve basınçlı kaplar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır [26].

Bu çelikten üretilen komponentler, sıcaklık dalgalanmalarına ve mekanik strese karşı mükemmel direnç sunar, bu da onları zorlu çevresel koşullarda bile güvenilir seçenekler haline getirir. Makine ve alet yapımı alanında ise, AISI 5140'ın sertleştirilmiş ve

temperlenmiş durumu, yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sağlar [29]. Çeşitli kesici aletler, kalıplar ve diğer hassas bileşenlerin imalatında kullanılan bu malzeme, termal işlem kabiliyeti sayesinde gerekli olan özgül mukavemet ve sertlik değerlerine ulaşılmasını sağlar [45]. AISI 5140 İmalat Çeliğinin Kullanım Alanları Tablo 1.1’de gruplandırılarak açıklamaları ile beraber özetlenmiştir.

AISI 5140 çeliğinin özellikleri, bu malzemenin geniş bir endüstriyel uygulama alanında tercih edilmesini sağlayan temel faktörlerdir. Bu çeliğin kimyasal bileşimi, mükemmel sertleştirilebilirlik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özellikleriyle birleştiğinde, yüksek performanslı ve dayanıklı komponentlerin üretimine olanak tanır. Otomotiv sektöründen enerji üretimine, ağır sanayiden tarıma kadar geniş bir uygulama spektrumu, AISI 5140’ın çok yönlülüğünü ve endüstriyel önemini vurgular [29]. Özellikle, aşırı koşullar altında bile yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda, bu malzemenin seçilmesi, mühendislik çözümlerinin etkinliğini ve güvenilirliğini artırır. Gelecek projeksiyonlarına bakıldığında, AISI 5140’ın kullanım alanlarının genişlemesi ve bu malzemenin yeni teknolojik gelişmelerle entegrasyonunun, sanayi ve mühendislik uygulamalarında yenilikçi çözümlerin önünü açması beklenmektedir [31].

Yüksek tokluğu ve aşınma direnciyle tanınan, yaygın olarak kullanılan bir alaşım olan AISI 5140 çeliği, otomotiv ve makine endüstrileri de dâhil olmak üzere bir dizi endüstriyel sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Ancak AISI 5140 çeliğinin işlenmesi bir dizi benzersiz zorluğu beraberinde getirir. Özellikle takım aşınmasına karşı hassastır, kesme işlemi sırasında önemli miktarda ısı üretir ve optimal olmayan yüzey kalitesiyle vardır. Bu sorunları çözmek için kesme yağları ve emülsiyonlar gibi geleneksel kesme sıvıları tercih edilen soğutucular olmuştur. Bu geleneksel soğutucular, soğutma ve yağlama özellikleri nedeniyle beğeni topladı ve işleme operasyonlarının verimliliğinin artırılmasında çok önemli bir rol oynamıştır. Bununla birlikte, işleme gereksinimleri geliştikçe ve gelişmiş performans arayışı yoğunlaştıkça, bu geleneksel soğutma sıvılarının sınırlamaları bu aşamada daha da net bir şekilde ortaya çıkmıştır.

1.2. Talaşlı İmalat

Talaşlı imalat, endüstriyel üretimin temel taşlarından biridir ve çeşitli malzemelerden talaş çıkararak istenilen şekil ve boyutlara ulaşılmasını sağlar. Bu yöntem, CNC teknolojilerinin entegrasyonu ile, yüksek hassasiyet gerektiren parçaların üretiminde ve verimlilikte üretim yapılmasına olanak tanır. Ayrıca talaşlı imalat yöntemleri, yüksek kaliteli ve hata payı düşük parçaların üretilmesini sağlar ve farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. İmalat sürecinde tornalama, frezeleme, delme gibi birçok işlem yer alır; bunlar, malzemenin özelliklerine ve işlemek istenen final ürünün detaylarına göre seçilir.

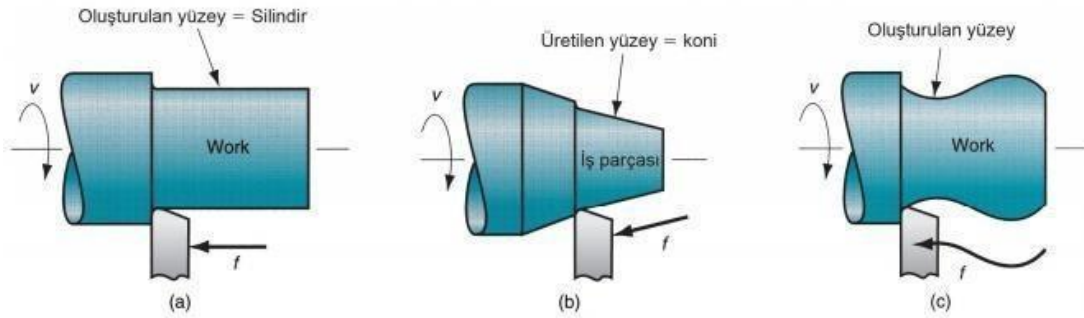
Tornalama işlemi, iş parçasının torna tezgâhında döndürülmesi ve bir kesici alet ile malzeme çıkarılması esasına dayanır. Bu işlem, metaller, bazı plastikler ve seramikler gibi çeşitli malzemeler üzerinde uygulanabilir; özellikle serbest işlemeli malzemeler için uygundur. CNC torna tezgahları, geleneksel manuel tezgahlara göre üstün verimlilik ve hassasiyet avantajları sunarlar ve teknolojik gelişmeler sayesinde, endüstrideki yoğun beceri ve iş gücü ihtiyacını azaltırlar.

Frezeleme işlemine gelince, bu yöntem ince işçilik gerektiren iş parçalarının işlenmesi için kullanılır. Frezeleme, döner kesici aletlerin kullanıldığı ve çeşitli freze makineleri tarafından gerçekleştirilen bir işlemdir. CNC frezeleme ve tornalama (Millturn) merkezleri gibi gelişmiş sistemler, pompa çarkları gibi karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimini mümkün kılar. Frezeleme, tornalama ve Elektrik Deşarj İşleme (EDM) yöntemi ile birlikte, talaşlı imalatın temel talaş kaldırma işlemlerini oluşturur[46].

Delme işlemi, madencilik ve inşaat gibi alanlarda bir işleme prosesi olarak ön plana çıkar. Sondaj makineleri, madencilik ekipmanları ve inşaat araçlarının üretiminde uzmanlaşmış şirketler, bu alandaki teknik bilgi birikimi ve deneyime sahiptir. Bu şirketler, seri üretim, kalıp imalatı ve makine üretimi gibi geniş bir yelpazede hizmet sunarlar ve markalı son ürünlerin üretimine katkıda bulunurlar. Delme ve işleme sektörü hakkında daha detaylı bilgi almak için, ilgili şirketlerle iletişime geçmek yararlı olacaktır.

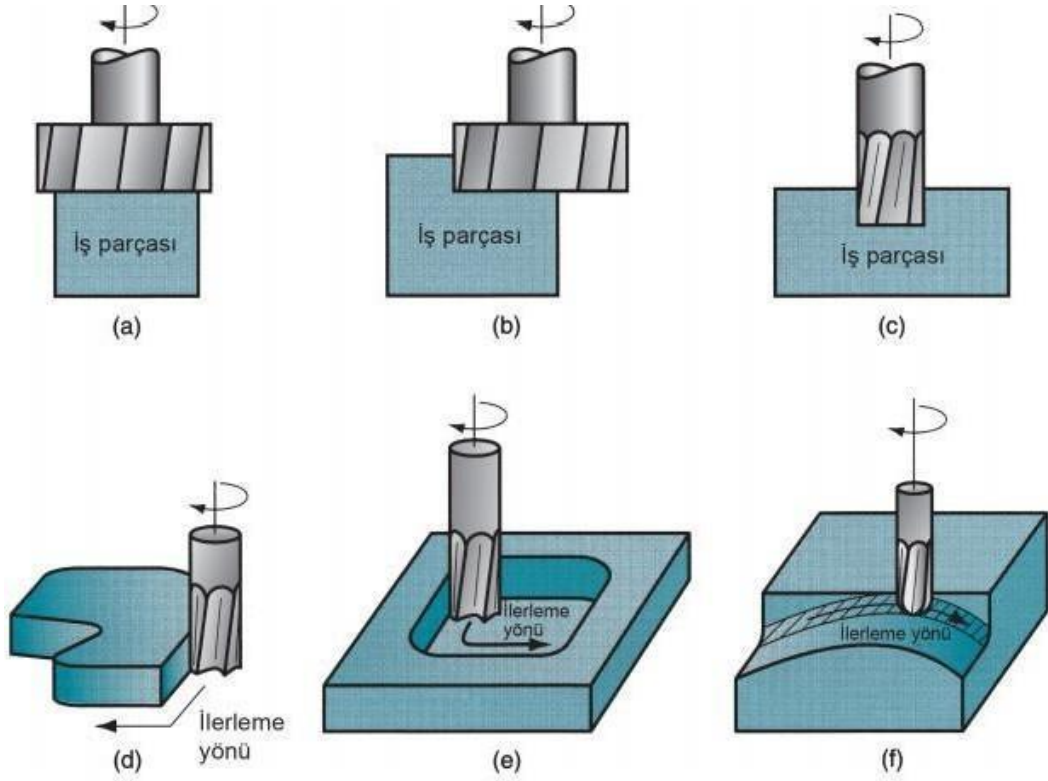
1.2.1. Talaşlı İmalat Yöntemleri

İlk takım tezgahları XVIII. yüzyılda J. Wilkinson tarafından dizaynı yapıp uygulamaya sokulmuştur. O günden günümüze çok büyük teknolojik gelişmeler olmuştur. Özellikle bilgisayar teknolojisinin alabildiğine hızlı gelişmesi makine ve imalat sektöründe de kullanılmasına imkan tanımıştır. Bugün konvansiyonel tezgahlarını yerini artık bilgisayar destekli takım tezgahları (CNC) almıştır. Tornalama, imalat süreçlerinin bir bileşenidir ve çeşitli malzemeleri istenen boyutlarda şekillendirmek için torna tezgâhlarında gerçekleştirilir. Bu süreç, özellikle CNC torna tezgâhlarının geliştirilmesiyle birlikte evrim geçirmiştir. Yedi eksene kadar çalışabilen modern CNC torna tezgâhları, işleme kabiliyetlerini geliştirerek üretimde üretkenliği ve esnekliği en üst düzeye çıkarır. Tornalama işlemleri arasında konik tornalama ve diş açma yer alır ve üreticilere yüksek uyarlanabilirlik ve hassasiyet sunar. Belli başlı torna işlemleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir



Şekil 1.1. Başlıca Tornalama Yöntemleri [47]

Frezeleme, tornalamadan farklı olarak, karmaşık yüzeyler ve karmaşık geometriler üretmek için tercih edilir. Bu yöntem, dönen kesici takımlarla talaş kaldırma prensibine dayanır ve son yıllarda takım ömrünü ve işleme kapasitesini büyük ölçüde artıran kaplamalı kesici kenarların kullanımında önemli bir artış görülmüştür. Düz frezeleme ve açılı frezeleme gibi frezeleme işlemleri, geniş bir üretim yelpazesinde etkili bir rol oynar ve hassas malzeme kaldırma yetenekleri sağlar. Başlıca frezeleme yöntemleri Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Başlıca Freze Yöntemleri [47]

Delme ve taşlama, üretimde önemli rol oynayan ek işleme yöntemleridir. Delme, dönen bir kesici takım kullanarak delikler oluşturmayı içerirken, taşlama aşındırıcı işlemler yoluyla pürüzsüz yüzeyler elde eder. Bu teknikler, üreticilerin nihai ürünlerinde istenen hassasiyet ve yüzey kalitesi seviyelerine ulaşmalarına yardımcı olur. Bu gelişmiş teknolojiler ve yöntemler, üretim süreçlerinin yeteneklerini ve verimliliğini önemli ölçüde artırarak karmaşık ve hassas bileşenlerin üretimini kolaylaştırır.

1.2.2. Frezeleme İşlemi Üzerine Genel Bir Bakış

5140 temperlenmiş çelik olarak da bilinen AISI 5140 imalat çeliği, yüksek mukavemet, sertlik, işlenebilirlik ve taşıma kapasitesi gibi önemli özelliklerinden dolayı birçok endüstride tercih edilen bir malzemedir. Bu tür çelik, otomobil ve motor parçaları, aks muhafazası, ön aks, direksiyon mili, krank mili, inşaat ve tarım makineleri ve takım tezgâhları dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıcak haddelenmiş AISI 5140 çeliğinin mikroyapısal ve mekanik özellikleri, istenen sertlik ve süneklik seviyesine ulaşmak için tam tavlama ve normalleştirme yoluyla değiştirilebilir.

AISI 5140 imalat çeliğinin frezeleme işlemi, çeliğin deneysel malzeme olarak kullanıldığı bilgisayarlı sayısal kontrollü (CNC) frezeleme makinelerinin kullanımını içerir [32]. Bir çalışma, AISI 5140 imalat çeliğinin çevre dostu minimum miktarda yağlama (MMY) koşulları ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin zorluğunu araştırdı [48]. Bu süreçte iş parçası yüzey kalitesini ve frezeleme verimliliğini optimize etmek için çeşitli kesme hızları ve takım aşınması incelenir. İstenilen sonuca ulaşmak için frezeleme işlemi sırasında yüksek sertleşme özellikleri, güçlü mukavemet ve süneklik arasındaki dengeyi korumak çok önemlidir [49].

AISI 5140 imalat çeliğinin frezeleme işlemiyle ilgili çeşitli avantaj ve dezavantajlar vardır. Avantajları arasında şunlar yer almaktadır [29]:

- Bitmiş ürünün yüksek mukavemeti ve sertliği
- Geliştirilmiş işlenebilirlik ve taşıma kapasitesi
- Sert, aşınmaya dirençli bir yüzeye ihtiyaç duyulan taşıtlar, motorlar ve makineler için düşük ve orta gerilimli parçalarda kullanım da dahil olmak üzere uygulamada çok yönlülük

Ancak aşağıdaki gibi bazı dezavantajlar da vardır:

- Optimum frezeleme sonuçlarını sağlamak için kesme parametrelerinin ve yağlama koşullarının hassas kontrolüne duyulan ihtiyaç
- Frezeleme işlemi sırasında takım aşınma potansiyeli

Bu zorluklara rağmen, AISI 5140 imalat çeliğinin frezeleme süreci, çeşitli endüstriler için yüksek kaliteli bileşenlerin üretiminde önemli bir adım olmaya devam ediyor. Üreticiler, öğütme koşullarını ve parametrelerini optimize ederek nihai üründe sertlik, mukavemet ve süneklik arasında istenen dengeyi sağlayabilirler [32].

1.2.2.1. Frezeleme İşleminin Tanımı ve Önemi

Çelik üretiminde önemli bir yöntem olan frezeleme işlemi, kesicinin iş parçasına belirli bir açıyla ilerletilmesiyle iş parçasından malzemenin çıkarılmasını içerir. Bu işlem özellikle çevre dostu minimum miktarda yağlama (MMY) koşulları ve farklı kesme parametreleri altında test edilen AISI 5140 çeliğinin üretiminde önemlidir. Frezeleme, nihai ürün için istenen şekli ve yüzey kalitesini elde etmek amacıyla genellikle tornalama ve taşlama gibi diğer işleme yöntemleriyle birlikte kullanılır [50].

Bir imalat çeliği türü olan AISI 5140 çeliği, çekme dayanımı, akma sınırı ve ısıtma işlemi ve normalleştirme tavlama olmadan şekillendirilebilirlik özelliği ile karakterize edilir [51]. Bu çelik, sert, aşınmaya dayanıklı bir yüzeye ihtiyaç duyulan taşıtlar, motorlar ve makineler için düşük ve orta gerilimli parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sıcak haddelenmiş AISI 5140 çeliğinin mikroyapısal ve mekanik özellikleri tam tavlama ve normalizasyon yoluyla değiştirilebilir [52]. AISI 5140, dış çelikleri, kesme çelikleri, yay çelikleri ve karbon çelikleri de dahil olmak üzere mevcut birçok çelik türünden sadece bir örnektir [28].

Çelik üretiminde frezeleme işleminin önemi, sadece çelik parçaların şekillendirilmesine ve temperlenmesine katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü ve talaşlanabilirlik davranışını da etkileyerek, göz ardı edilemez bir faktördür [53]. NAS, Samtaş ve Demir tarafından yapılan bir çalışmada, AISI 1050 çeliği CNC freze tezgâhında yüzey frezeleme işlemine tabi tutularak, kesme hızı, ilerleme hızı ve diğer parametrelerin analizi bu gerçeği destekler niteliktedir [54]. Bu ve benzeri araştırmalar sayesinde, frezeleme işleminin optimize edilmesi, daha iyi aşınma direncine ve uzun ömürlülüğe sahip daha kaliteli çelik ürünlerin elde edilmesini sağlar. Frezeleme ayrıca, yüksek üretim hızı, kolay seri üretim, azaltılmış iş gücü gereksinimleri ve otomasyon potansiyeli gibi çeşitli avantajlar sunarak, yüksek kaliteli AISI 5140 çeliği ve çeşitli endüstrilere yönelik diğer çelik ürünlerinin üretiminde vazgeçilmez bir işlem haline gelmiştir [55].

AISI 5140 çeliği çeşitli endüstrilerde geniş uygulama alanına sahip çok yönlü bir malzemedir. Eşsiz özellikleri onu kalıpların, dişlilerin, millerin ve diğer bileşenlerin

üretimi için ideal bir seçim haline getirir [29]. AISI 5140 çeliğinin yaygın uygulamalarından bazıları; diş çelikleri, imalat çelikleri, sementasyon çelikleri, nitrasyon çelikleri, kesme çelikleri, yay çelikleri, karbon çelikleri ve transmisyon milidir. Sertleştirme ve temperleme kombinasyonunu içeren ıslah işlemi, AISI 5140 çeliğine yüksek tokluk sağlar. Bu onu otomotiv, enerji, imalat, makine ve alet yapımı gibi sağlam ve dayanıklı malzemeler gerektiren endüstriler için mükemmel bir seçim haline getirmektedir [11].

AISI 5140 çeliğine yönelik frezeleme işlemi, onu üretim sürecinin önemli bir parçası haline getiren çeşitli avantajlar sunar. Bu sürecin başarısına katkıda bulunan temel faktörler arasında, frezeleme sürecini optimize etmek için girdi parametreleri olarak görev yapan kesme hızı (V), ilerleme (f) ve kesme derinliği (A_p) yer alır. AISI 5140 çeliğinin çevre dostu minimum miktarda yağlama koşulları ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin tatmin edici sonuçlar ürettiği gösterilmiştir. Bu parametreleria yaralama yeteneği, üreticilerin iyileştirilmiş yüzey kalitesi, gelişmiş boyutsal doğruluk ve azaltılmış üretim süresi gibi istenen sonuçları elde etmesine olanak tanır ve sonuçta daha verimli ve uygun maliyetli bir üretim süreci sağlanır [29].

AISI 5140 çeliğinin frezeleme prosesi, diğer çelik üretim prosesleriyle karşılaştırıldığında bazı dikkate değer farklılıklar ve faydalar sunmaktadır. Çalışmalar, bu çeliğin frezelemeye tabi tutulduğunda AISI 1045 ve diğer düşük karbonlu imalat çeliklerine kıyasla üstün mekanik özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, AISI 1050 çeliği üzerinde bir CNC freze makinesinde yüzey frezelemeye tabi tutularak yapılan araştırma, çeşitli yüzey bitirme işlemlerinin elde edilmesinde frezeleme işleminin çok yönlülüğünü ve uyarlanabilirliğini vurgulamaktadır [32]. Ayrıca, "preform" olarak bilinen tavlanmış AISI 5140 çelik malzeme üzerinde gerçekleştirilen akış oluşturma işlemi, deneysel bir çalışmada %50'lik bir azalma oranıyla sonuçlandı ve bu işlemin daha fazla geliştirme ve optimizasyon potansiyelini ortaya koydu. Genel olarak, AISI 5140 çeliğine yönelik frezeleme işlemi, diğer çelik üretim işlemlerine göre benzersiz avantajlar sağlayarak verimliliğin artmasına ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine yol açar [54].

1.2.2.2. Frezeleme İşleminde Kullanılan Parametreler

AISI 5140 çeliği imalat sanayinde, özellikle otomotiv ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir [32]. Bu malzeme, istenen özellikleri elde etmek için tam tavlama ve normalleştirme gibi işlemlerle değiştirilebilen mükemmel mekanik ve mikroyapısal özellikleriyle bilinir. Orta karbonlu bir çelik olan AISI 5140 çok yönlüdür ve günümüzün üretim ortamında çeşitli uygulamalara sahiptir [48].

AISI 5140 çeliğinin bazı temel özellikleri şunlardır [36]:

- Yüksek mukavemet ve tokluk
- İyi sertleşebilirlik
- Aşınma ve yorulmaya karşı dayanıklılık
- Isıl işleme uygun

Frezeleme işlemi, istenen boyutlara ve yüzey kalitesine ulaşmak için malzemenin şekillendirilmesine ve iyileştirilmesine yardımcı olduğundan çelik üretiminde çok önemli bir rol oynar. AISI 5140 çeliğinin frezelenmesi, malzemenin özellikleri ve çevre dostu minimum miktarda yağlamanın (MMY) kullanılması gibi kesme koşulları nedeniyle zorlayıcı olabilir [56]. Yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması dikkate alınması gereken faktörler olduğundan frezeleme işleminin üretim kalitesi üzerinde doğrudan etkisi vardır. AISI 5140 çeliği söz konusu olduğunda, verimli ve etkili frezeleme işlemleri sağlamak için kesme parametrelerinin optimize edilmesi şarttır.

Aşağıdakiler de dâhil olmak üzere çeşitli faktörler öğütme işlemi etkiler [29]:

- Hız kesmek
- İlerleme hızı
- Kesme derinliği
- Takım geometrisi
- Soğutma sıvısı tipi ve uygulaması

Frezeleme işleminde kullanılan parametrelerin amacı, iş parçası malzemesi, bu durumda AISI 5140 çeliği için işleme koşullarını optimize etmektir. Üreticiler bu parametreleri ayarlayarak istenen yüzey kalitesini elde edebilir ve imalat sürecinin genel verimliliğini ve maliyetini doğrudan etkileyen takım aşınmasını en aza indirebilir [32]. AISI 4340 çeliğinin belirli kesme hızlarında frezelenmesi, takım aşınması ve iş parçası yüzey kalitesine doğrudan etki eder. Yılmaz'ın [56] çalışması, hibrit kompozitlerin frezelenmesinde farklı soğutma teknikleri ve kesme parametrelerinin kullanılmasının bu etkileri iyileştirebileceğini göstermiştir. AISI 5140 çeliği için uygun frezeleme parametrelerinin anlaşılması ve kullanılması, başarılı üretim sonuçlarının sağlanması açısından büyük öneme sahiptir.

AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme sürecinde kesme hızı, prosedürün genel kalitesini ve verimliliğini önemli ölçüde etkileyen önemli bir parametredir. Bu parametre, frezeleme işlemi sırasında kesici takım ile iş parçası yüzeyi arasındaki bağıl hızı ifade eder. AISI 5140 çeliğinin frezelenmesini araştıran bir çalışmada, işleme performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek için üç farklı kesme hızı (80-120-160 m/dk) seçilmiştir. Kesme hızı arttıkça işlem için gereken güç de artmakta ve kesici takımlarda daha fazla aşınma ve yıpranma meydana gelmektedir. Bu nedenle kesme hızının optimize edilmesi, üretkenlik ile takım ömrü arasında bir denge sağlamak için çok önemlidir.

AISI 5140 çelik imalatında frezeleme prosesindeki bir diğer önemli parametre, kesici takımın iş parçasına doğru ilerleme hızını ifade eden ilerleme hızıdır. İlerleme hızı yüzey kalitesini, takım aşınmasını ve frezeleme işleminin genel verimliliğini önemli ölçüde etkileyebilir. Daha önce bahsedilen aynı çalışmada, frezeleme performansı üzerindeki etkilerini incelemek için üç farklı ilerleme hızı (0,08-0,12-0,16 mm/dev) seçilmiştir [33]. Daha yüksek bir ilerleme hızı, kesme kuvvetlerinin artmasına neden olabilir, bu da potansiyel olarak daha yüksek takım aşınmasına ve yüzey kalitesinin bozulmasına yol açabilir [57]. Bu nedenle ilerleme hızının optimize edilmesi, istenen yüzey kalitesinin elde edilmesi ve takım ömrünün korunması açısından büyük öneme sahiptir.

Kesme derinliği, AISI 5140 çelik imalatının frezeleme prosesinde bir diğer önemli parametredir. Frezeleme işlemi sırasında kesici takımın iş parçası içerisine girdiği mesafeyi ifade eder. Kesme derinliği, kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey kalitesi

dâhil olmak üzere frezeleme işleminin birçok yönünü etkiler. Uygun kesme derinliğinin seçilmesi, işleme prosesinin optimize edilmesi açısından çok önemlidir; çünkü bu, nihai ürünün genel verimliliğini, takım ömrünü ve kalitesini etkileyebilir [58]. Mühendislik uygulamalarında kesme derinliği genellikle malzeme özelliklerine, kesici takım geometrisine ve istenen yüzey kalitesine göre belirlenir. Üreticiler, kesme derinliğini ayarlayarak, istenen sonuçları en verimli şekilde elde etmek için frezeleme sürecini optimize edebilir [59].

Yaygın olarak kullanılan bir imalat malzemesi olan AISI 5140 çeliğinin frezeleme işlemi, nihai ürünün yüzey kalitesini ve verimliliğini etkileyen çeşitli parametrelerin dikkate alınmasını içerir. Önemli parametrelerden biri, üretilen bileşenin performansını ve servis ömrünü etkileyen yüzey pürüzlülüğüdür [60]. Frezeleme işlemleri sırasında yüzey pürüzlülüğü kesici takımın yapısı, tipi ve malzemesinin yanı sıra kesme hızı ve ilerleme hızı gibi faktörlerden etkilenebilir. AISI 5140 çeliğin frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için bu faktörlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve kontrol edilmesi önemlidir.

AISI 5140 çeliğinin frezeleme prosesindeki bir diğer parametre, prosesin verimliliğini ve üretilen bileşenin yüzey kalitesini önemli ölçüde etkileyebilen takım aşınmasıdır. İşleme sırasında hızlı takım aşınması, daha sık kesici takım değişimine yol açarak genel üretkenliğin azalmasına ve maliyetlerin artmasına neden olabilir [29]. Takım aşınmasını en aza indirmek için, daha düşük ilerleme oranları ve uygun kesme hızları gibi uygun kesme parametrelerinin seçilmesi çok önemlidir. Ayrıca kesici takım malzemelerinin ve kaplamalarının seçimi de frezeleme işlemi sırasında takım aşınmasının azaltılmasında hayati bir rol oynayabilir [61].

Talaş kaldırma oranı olarak da bilinen talaş kaldırma oranı, işleme verimliliğini ve genel üretim süresini doğrudan etkilediği için AISI 5140 çeliğinin frezeleme işleminde birincil bir parametredir. Talaş kaldırma oranı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi faktörlerden etkilenir. Talaş kaldırma oranını optimize etmek için frezeleme işleminin özel gereksinimlerine ve AISI 5140 çeliğinin özelliklerine göre uygun kesme parametrelerinin seçilmesi önemlidir [62]. Örneğin, daha yüksek kesme hızları ve ilerleme oranları, frezeleme işleminin genel verimliliğini artırarak talaş kaldırma

oranlarının artmasına neden olabilir. Ancak AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme prosesinde en iyi sonuçları elde etmek için bu parametreleri yüzey kalitesi ve takım aşınma hususlarıyla dengelemek çok önemlidir [63].

AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme sürecinde tasarım parametrelerinin optimizasyonu, genel üretim sürecinin verimliliğini ve etkinliğini artırmak için çok önemlidir. Bu çalışmada deney malzemesi olarak AISI 5140 imalat çeliği kullanılmış ve tasarım parametreleri Taguchi tasarım yöntemiyle optimize edilmiştir [32]. İmalat sanayinde sıklıkla kullanılan AISI 5140 çeliği, arzu edilen mekanik özellikleri nedeniyle özellikle otomotiv ve inşaat sanayinde tercih edilen bir malzemedir. Bu çelikler genellikle yüzey frezeleme de dâhil olmak üzere işleme yöntemleri kullanılarak şekillendirilir ve bu da işleme sırasında hızlı takım aşınmasına ve zayıf yüzey kalitesine yol açabilir [29].

Bu çalışmada AISI 5140 imalat çeliğinin çevre dostu minimum miktarda yağlama koşulları ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin zorluğu araştırılmıştır. Sonuçların analizi, güç tüketimi, takım aşınması ve yüzey kalitesi gibi çeşitli kesme parametrelerinin frezeleme işleminin performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini içermektedir [32]. Araştırmalardan elde edilen bazı önemli bulgular şu şekilde özetlenebilir [29]:

- MMY koşulları altında AISI 5140 çelik frezeleme, güç tüketiminin azalmasına ve takım ömrünün iyileşmesine neden oldu.
- Proseste en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip kesici uç sayısına tek bir kesici uç varken ulaşıldığı bulunmuştur.
- Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz ile çoklu tepki optimizasyonunun saplama üretiminde kullanılan AISI 5140 çeliğinin tornalama prosesini optimize etme için etkili bir yaklaşım olduğu kanıtlanmıştır.

AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme süreci gelişmeye devam ettikçe, gelecekteki araştırma ve gelişmeler, daha fazla optimizasyon için yeni metodolojiler ve teknikleri keşfedebilir. Örneğin, AISI 4140 malzemesinin yüzey frezeleme proseslerinde kesme parametrelerinin optimizasyonunda başarıyla uygulanan TOPSIS yöntemi, frezeleme prosesindeki potansiyel iyileştirmeleri araştırmak amacıyla AISI 5140 çeliğine

uyarlanabilir [64]. Ek olarak, AISI 5140 çeliğinin çeşitli koşullar altında frezelemedeki performansını AISI 1045 ve AISI 5140 Soğuk İş Takım Çeliği gibi diğer çelik türleriyle karşılaştırmak, üretim sürecinin genel verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak için değerli bilgiler sağlayabilir [65].

1.2.2.3. Frezeleme İşleminde Karşılaşılan Zorluklar

AISI 5140 çeliğinin sertliği ve tokluğu, frezeleme işleminde karşılaşılan önemli bir zorluktur. Bu çelik, sertleştirme ve temperlemeyi içeren bir ıslah sürecinden geçer ve sonuçta malzemeye yüksek tokluk kazandırılır [30]. Dolayısıyla, AISI 5140 çeliği olağanüstü tokluk özelliklerine sahip olup, yüksek mukavemeti, sertliği, işlenebilirliği ve taşıma kapasitesi nedeniyle onu çeşitli endüstrilerde tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir. Ancak bu özellikler, verimli ve hassas işleme sağlamak için uygun kesme takımları ve parametreler gerektirdiğinden frezeleme işlemi sırasında zorluklara neden olabilir [32].

AISI 5140 çeliğinin frezelenmesindeki zorlukların üstesinden gelmek için uygun kesici takımların seçilmesi çok önemlidir. NAS, Samtaş ve Demir tarafından yapılan çalışmada AISI 1050 çeliği CNC freze tezgâhında yüzey frezeleme işlemine tabi tutularak kesme hızı, ilerleme hızı ve diğer faktörler analiz edilmiştir. AISI 5140 çeliği üzerinde yapılan benzer araştırmalarda kesici uç geometrisinin, ilerleme hızının ve kesme derinliğinin talaşkırılması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir [66]. AISI 5140 çeliğinin Cermet, PVD ile TiAlN ve CVD ile TiN ile kaplanmış kesici uçlarla tornalanmasında kesme değişkenleri, kaplama tipi ve takımlama araştırılmıştır [29]. Bu çalışmalara dayanarak AISI 5140 çeliğinin üretim sürecinde etkili kesim için uygun kesici takımın seçilmesi şarttır.

Tutarlı kesme parametrelerinin korunması, AISI 5140 imalat çeliğinin frezeleme işleminde karşılaşılan bir başka zorluktur. Talaşlı imalat işlemlerinde kesici takım çeşitli şekillerde aşınmaya başladıkça başlangıç koşullarından uzaklaştıkça bazı değişiklikler meydana gelir. AISI 5140 çeliğinin farklı soğutma ve yağlama ortamlarında ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin zorluğu önceki çalışmalarda araştırılmıştır [32]. Başka bir çalışmada AISI 5140 çeliğinin tornalanması sırasında yaklaşma açısı ve

kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, frezeleme işlemi boyunca tutarlı kesme parametrelerini izlemek ve sürdürmek, optimum sonuçları sağlamak ve takım aşınmasını ve ilgili sorunları en aza indirmek gerekir [33].

1050 çeliği gibi Yüksek Hız Çeliği (HSS) kesici takımların kullanılması, AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme prosesindeki zorlukların aşılmasına yardımcı olabilir. Tungsten-molibden serisinde molibden bazlı bir yüksek hız çeliği olan HSS sınıfı M2 çeliği iyi işlenebilirliğe sahiptir ve genellikle diğer takımların işlenmesinde kesici takım olarak kullanılır. HSS takımları yaklaşık 400 – 600 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda çalışabilir, bu da onları frezeleme uygulamaları için son derece uygun kılar. Bununla birlikte, çoğu frezeleme işleminde karbür takımların yavaş yavaş HSS takımların yerini aldığını belirtmek de önemlidir. Bu geçişe rağmen, HSS takımları belirli uygulamalar içingeçerli bir seçenek olmayı sürdürüyor ve AISI 5140 çelik imalatının frezelenmesinde çeşitli avantajlar sunabilmektedir.

AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme sürecinde karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için uygun soğutma tekniklerinin uygulanması çok önemlidir. İşleme süreçlerindesoğutma ve yağlama, takım aşınmasının, iş parçası yüzey kalitesinin ve genel verimliliğin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. NAS, Samtaş ve Demir tarafından yapılan bir çalışmada, farklı soğutma ve yağlama ortamlarının AISI 1050 çeliğinin frezelenmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma, soğutma tekniği seçiminin kesme hızını, ilerleme hızını ve bunun sonucunda ortaya çıkan takım aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediğini ortaya çıkardı [32]. Benzer şekilde, AISI 5140 çelik imalatının frezelenmesinde, takım performansını optimize etmek ve istenen yüzey kalitesini elde etmek için doğru soğutma tekniğinin seçilmesi çok önemlidir [29].

Kesme parametrelerinin optimizasyonu, AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme prosesinde verimliliği ve kaliteyi artırmaya yönelik bir diğer önemli stratejidir. Kesici uç geometrisi, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi faktörlerin işleme proseslerinde talaş kırılması ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde dikkate değer etkileri vardır. CAN Ahmet tarafından yürütülen bir çalışmada, AISI 5140 çelik imalatında Cermet, PVD ve TIN kaplı kesici uçlar kullanılarak kesme değişkenleri, kaplama tipi ve takımlama değerlendirilmiştir [67].

Araştırma, takım ömrünü ve yüzey kalitesini artırarak işleme maliyetini azaltmak için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesini içeriyordu. Talaşlı imalat süreçlerinde verimlilik talebi arttıkça kesme parametrelerinin, özellikle de ilerleme değerlerinin buna göre ayarlanması gerekmektedir. Üreticiler bu parametreleri optimize ederek AISI 5140 çelik üretiminin frezeleme sürecinde karşılaşılan zorlukları etkili bir şekilde çözebilir [68].

1.2.3. Frezelemede Kullanılan Soğutma ve Yağlama Sıvıları

Su bazlı soğutma akışkanları, maliyet etkinliği ve öğütme işlemlerindeki soğutma ve yağlama kapasiteleri nedeniyle tercih edilir. Bununla birlikte, bazı durumlarda, özellikle makine bileşenleri üzerinde korozyon riski taşıdıklarından, bu akışkanlar yetersiz kalabilir. Bu problemi aşmak için, Minimum Miktarda Yağlama sistemleri gibi alternatifler kullanılır. MQL sistemleri, su bazlı soğutucuların uygun olmadığı koşullar için geliştirilmiş, kesici takımların yeterli düzeyde yağlanmasını sağlayarak işlev gösterir [69].

Yağ bazlı soğutma akışkanları, çözünen yağlar olarak da bilinir, frezeleme operasyonlarında tercih edilen bir alternatif olarak ön plana çıkar. Bu akışkanların soğutma ve yağlama özellikleri, maliyet etkinliği ve işleme uygulamalarındaki yüksek performanslarıyla dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, özellikle belirli kesme koşullarında termal çatlak oluşumuna sebep olabilmeleri, kesici takımların ömrünü olumsuz yönde etkileyebilir. Bu bağlamda, Minimum Miktarlı Yağlama sistemleri, takım aşınmasını minimize ederek performansı artırma konusunda alternatif bir çözüm olarak öne çıkar [70].

Sentetik soğutma sıvıları, mineral yağ içermeyen su bazlı çözümler sunarak üçüncü bir alternatif olarak öne çıkar. Organik ve inorganik bileşenlerin birleşimi, bu akışkanlara iyi soğutma ve orta seviyede yağlama özellikleri kazandırır. Sentetik sıvılar, benzersiz kompozisyonları sayesinde, CNC frezeleme ve torna işlemlerinde atık miktarını azaltma ve genel verimliliği artırma amacıyla geleneksel su ve yağ bazlı soğutuculara bir alternatif olarak değerlendirilir. Böylece, tam ve yarı sentetik kesme sıvıları, modern

frezeleme uygulamalarında artan bir popülerlik kazanmaktadır [71]. Soğutma ve Yağlama Sıvılarının Özellikleri ve Görevleri Tablo 1.2. 'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. Soğutma ve Yağlama Sıvılarının Özellikleri ve Görevleri

Sıvı Türü	Özellikler ve Görevler
Su Bazlı	Yüksek soğutma kapasitesi, düşük maliyet, çevre dostu. Sürtünmeyi azaltma, ısı dağıtma, korozyonu önleme [50].
Yağ Bazlı	Yüksek yağlama kapasitesi, düşük soğutma kapasitesi, korozyon önleyici maddeler içerir. Yağlama sağlama, korozyonu önleme, yüksek sıcaklıklarda stabilite [72].
Sentetik	Kimyasal bazlı, yüksek soğutma ve yağlama kapasitesi, biyolojik olarak parçalanabilir. Sürtünmeyi azaltma, ısı dağıtma, çevresel ve sağlık risklerini minimize etme [73].
Yarı Sentetik	Sentetik ve petrol bazlı bileşenlerin karışımı, iyi soğutma ve yağlama. Hem soğutma hem de yağlama sağlama, geniş uygulama yelpazesi [74].
Minimum Miktarda Yağlama (MQL)	Düşük miktarda yağ kullanımı, çevre dostu, yüksek verimlilik. Minimum yağlama sağlayarak kesme performansını iyileştirme, yüzey kalitesini artırma [75].
Biyolojik Bazlı	Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen yağlar, çevre dostu, biyolojik olarak parçalanabilir. Çevresel ve sağlık risklerini azaltma, sürdürülebilirlik [76].
Diğer	Özel soğutucular, düşük viskozite, yüksek parlama ve tutuşma noktası. Özel uygulamalarda yüksek performans sağlama, güvenliği artırma [77].

1.2.3.1. Soğutma ve Yağlama Sıvılarının Özellikleri ve Görevleri

Frezeleme operasyonlarında kullanılan soğutma ve yağlama sıvılarının önemi, takım tezgâhlarında işlem sırasında üretilen ısının etkileri göz önüne alındığında vurgulanmaktadır. Torna, freze, planya, matkap, testere ve taşlama makineleri gibi araçlarda oluşan ısı, kesici takımın performansını, iş parçasının kalitesini ve işleme sürecinin genel verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu sıvılar, sürtünmeyi azaltma, ısıyı dağıtma, talaş kaldırmayı iyileştirme, korozyonu önleme ve kesme işlemlerinin verimliliğini artırma gibi işlevleri yerine getirerek söz konusu sorunları giderir [50].

Piyasada, her biri farklı özellik ve uygulama alanlarına sahip çeşitli soğutma ve yağlama sıvıları mevcuttur. Çözünür yağlar, maliyet etkinliği ve yaygın kullanımı ile dikkat çekerken, iyi soğutma ve ortalama yağlama özellikleri sunar. Bu yağlara, yağlama performansını artırmak amacıyla korozyon önleyici maddeler eklenir. Buna karşın, bazı işletmeler kaynak tasarrufu ve atık azaltımı amacıyla, CNC freze ve torna tezgâhlarında daha az yağlama ihtiyacı duyulan özel soğutucuları tercih edebilir. Soğutma sıvılarının, soğutma ve yağlama özelliklerine ek olarak, havanın yalnızca yağlama özelliğine sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır [72].

Soğutma ve yağlama sıvısı seçimi yapılırken, işlenen malzemenin türü, arzu edilen yağlama seviyesi, belirli işleme yöntemi ve çevresel endişeler gibi çeşitli faktörler değerlendirilmelidir. Sade yağlar, yağlama konusunda üstünken, soğutma kapasiteleri konusunda sınırlamalara sahiptir. Makinelerin talaş kaldırma ile ilişkili sorunlar yaşaması mümkün olduğundan, işletmeler talaş yönetimiyle ilgili olası zorlukları da göz önünde bulundurmalıdır. Dolayısıyla, uygun soğutma sıvısının seçimi, frezeleme işleminin genel verimliliği, kalitesi ve güvenliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir [73].

Viskozite ve akış hızı, öğütme işlemlerinde kullanılan soğutma ve yağlama sıvılarının mühim özellikleridir. Kesici takım ile iş parçası arasında verimli ısı transferi ve yağlamanın sağlanması için bu akışkanların uygun viskozite seviyesine sahip olması gerekir. Öte yandan akış hızı, sıvının kesme alanına yeterli yağlama ve soğutma sağlama yeteneğini belirler. Daha yüksek bir akış hızı, daha iyi talaş kaldırmayı destekleyebilir ve takım ömrünün ve ürün kalitesinin korunması için gerekli olan ısı birikimini önleyebilir [78]. Kesme sıvılarının viskozitesini ve akış hızını etkileyen bazı faktörler şunlardır [74]:

- Akışkan türü ve bileşimi
- Çalışma sıcaklığı
- Sıvı dağıtım sisteminin basıncı ve akış hızı
- İşleme süreci ve kesme parametreleri

Soğutma ve yağlama sıvılarının performansında bir diğer önemli faktör pH değeri ve kimyasal bileşimidir. Bir kesme sıvısının pH değeri, onun korozyona karşı koruma özelliklerini ve çeşitli metallerle uyumluluğunu önemli ölçüde etkiler. Çok düşük bir pH

değeri korozyon oranlarının artmasına yol açabilirken, çok yüksek bir pH değeri belirli kimyasal bileşenlerin çökmesine neden olarak sıvının etkinliğini azaltabilir [72].

Kesme sıvılarının kimyasal bileşimi, yağlama ve soğutma performanslarının yanı sıra çevre ve sağlık üzerindeki etkilerinde de hayati bir rol oynar. Örneğin kesme sıvısı olarak kullanılan bor yağı, kimyasal yapısından dolayı yüksek sıcaklıklarda stabil kalarak sürtünmeyi azaltır. Bununla birlikte, geleneksel petrol bazlı kesme sıvıları genellikle oldukça toksiktir ve biyolojik olarak parçalanamazlar, bu da bunların çevre ve işçi sağlığı üzerindeki etkileri konusunda endişelere neden olur [73].

Parlama noktası ve tutuşma noktası aynı zamanda öğütme işlemlerinde kullanılan soğutma ve yağlama sıvılarının da temel özellikleridir. Parlama noktası, akışkanın bir ateşleme kaynağına maruz kaldığında anlık olarak tutuşmaya yetecek kadar buhar ürettiği sıcaklıktır; tutuşma noktası ise akışkanın tutuşma sonrasında yanmaya devam ettiği sıcaklıktır. Daha yüksek parlama noktasına ve tutuşma noktasına sahip akışkanlar, öğütme işlemi sırasında alev alma olasılıkları daha düşük olduğundan genellikle daha güvenli kabul edilir. Güvenlik endişelerine ek olarak, yüksek parlama noktası ve tutuşma noktası sıvıları, yüksek sıcaklıklarda artan stabiliteyi nedeniyle daha iyi yağlama ve soğutma performansı sağlayabilir. Örneğin, bu çalışmada dielektrik olarak kullanılan Belone EDM F standart elektro-erozyon sıvısının yüksek parlama noktasına ve düşük viskoziteye sahip olması, onu frezeleme uygulamaları için ideal bir seçim haline getirmektedir [77].

Frezeleme, sıvıların soğutma ve yağlama işlevleri arasında, sıcaklık kontrolü ve ısı dağılımı hayati bir yer tutar. Frezeleme işlemi sırasında, kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısı, takım ömrünü, iş parçasının kalitesini ve işleme sürecinin genel verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Soğutma ve yağlama sıvıları, bu ısıyı emerek ve kesme bölgesinden uzaklaştırarak dağıtır, böylece daha stabil bir sıcaklık sağlar, iş parçasının termal deformasyonunu azaltır ve aşırı ısınmadan kaynaklanan takım arızası riskini minimize eder. Bu süreçte, soğutma sıvıları, soğutma ve yağlama işlevlerini birlikte yerine getirirken, hava yalnızca yağlama görevi üstlenir [79].

Soğutma ve yağlama sıvılarının frezeleme işleminde sürtünmeyi azaltmak ve takım aşınmasını önlemek gibi başka önemli bir işlevi daha bulunmaktadır. Kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünme, takımın aşırı aşınmasına ve dolayısıyla kesme verimliliğinin düşmesine neden olabilir. Soğutma ve yağlama sıvıları, kesici takım ile iş parçası arasında bir film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltır ve kesici kenarlardaki aşınmayı en aza indirir. Bu durum, takım ömrünü önemli ölçüde uzatabilir ve kesme performansını korumaya yardımcı olur. Özellikle, frezelemede minimum miktarda yağlama tekniğinin kullanılması, geleneksel soğutma yöntemlerine kıyasla hem takım ömrünü hem de yüzey kalitesini iyileştirebilir [75].

Ek olarak, soğutma ve yağlama sıvıları, frezeleme işlemi sırasında talaş kaldırma ve yüzey kalitesinin artırılmasında bir role sahiptir. Verimli talaş kaldırma, kesme alanının temiz kalmasını sağlar, takım aşınmasını minimize eder ve yüksek kalitede yüzey düzgünlüğü elde etmeyi mümkün kılar. Soğutma ve yağlama sıvıları, talaşların kesme bölgesinden etkin bir şekilde uzaklaştırılmasına yardımcı olur, böylece talaşların yeniden kesilmesi ve takım aşınması ya da yüzey hasarına neden olması riskini azaltır. Bu sıvılar, aynı zamanda, takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak yüzey kalitesini iyileştirir ve daha düzgün bir kesme işlemine imkân tanır. Bununla birlikte, petrol bazlı geleneksel kesme sıvılarının kullanımının çevresel ve sağlık üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurulmalıdır, zira bu tür sıvılar oldukça toksik olabilir ve biyolojik olarak parçalanabilirlik özellikleri sınırlıdır [50].

Frezelemede kullanılan soğutma ve yağlama sıvılarının performansının ve kalitesinin izlenmesi, optimum işleme sonuçlarının sağlanması açısından çok önemlidir. Bu sıvılar iki amaca hizmet eder: yağlama sağlarlar ve işleme prosesi sırasında oluşan ısıyı dağıtırlar. Talaşlı imalat uygulamalarında kullanılan en yaygın ve uygun fiyatlı kesme sıvısı, yağlama performansını artıran korozyon önleyici maddeler içeren çözünür yağdır. Sıvının etkinliğini korumak için konsantrasyon, pH ve kirlilik seviyeleri gibi özelliklerinin düzenli olarak izlenmesi önemlidir [76].

Sıvı performansını ve kalitesini izlerken dikkate alınması gereken bazı önemli noktalar şunlardır [80]:

- Optimum yağlama ve soğutma için sıvı konsantrasyonunu düzenli olarak kontrol etmek
- Korozyonu ve mikrobiyal büyümeyi önlemek için uygun pH seviyesinin korunması
- Sıvının yabancı yağ ve metal artıkları gibi kirliliklerden arınmış olmasını sağlamak

Soğutma ve yağlama sıvılarının yenilenmesi ve geri dönüştürülmesi, verimli öğütme işlemlerinin temel bileşenleridir. Zamanla bu sıvılar kirlenebilir veya etkinliğini kaybedebilir, bu da bunların değiştirilmesini veya tedavi edilmesini gerektirebilir. Bununla birlikte, geleneksel petrol bazlı kesme sıvıları oldukça toksiktir ve biyolojik olarak parçalanamazlar, çevre ve işçi sağlığı için risk oluştururlar. Sonuç olarak birçok atölye, daha az miktarda yağlama gerektiren ve kaynakların korunmasını destekleyen özel soğutucuları benimsiyor. Sıvının kullanım ömrünü uzatmak ve atığı azaltmak için santrifüjleme ve ultrafiltrasyon gibi geri dönüşüm yöntemleri de kullanılabilir. Sıvı yenileme ve geri dönüşümün önemli yönleri şunları içerir:

- Kirlendiğinde veya etkisiz hale geldiğinde sıvıları değiştirmek veya tedavi etmek,
- Çevre dostu ve kaynakları verimli kullanan soğutucuların kullanılması,
- Sıvı ömrünü uzatmak ve atığı en aza indirmek için geri dönüşüm tekniklerinin uygulanması.

Soğutma ve yağlama sıvılarının güvenli kullanımını ve imhasını sağlamak, sağlıklı ve çevreye duyarlı bir frezeleme işleminin sürdürülmesi açısından öneme sahiptir. Daha önce de belirtildiği gibi, geleneksel petrol bazlı kesme sıvıları önemli sağlık ve çevre riskleri oluşturmaktadır. Bu riskleri en aza indirmek için uygun güvenlik prosedürlerine uymak ve mümkün olduğunda daha sürdürülebilir sıvı alternatiflerini kullanmak çok önemlidir. Koruyucu giysiler giymek ve Malzeme Güvenliği Veri Sayfaları yönergelerine uymak gibi güvenli kullanım uygulamaları, çalışanların potansiyel tehlikelerden korunmasına yardımcı olabilir [72]. Geri dönüşüm veya lisanslı bir atık imha hizmetiyle sözleşme yapmak gibi uygun imha yöntemleri, çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilir. Güvenli sıvı kullanımını ve imhasına yönelik kilit noktalar şunları içerir:

- Güvenlik kurallarına uymak ve uygun koruyucu ekipman giymek,
- Mümkün olduğunca çevre dostu sıvı alternatiflerinin kullanılması,
- Geri dönüşüm veya lisanslı bir atık imha hizmeti kullanmak gibi sorumlu imha yöntemleri kullanmak

1.2.3.2. Soğutma ve Yağlama Sıvılarının Çeşitleri

Frezeleme operasyonlarında soğutma ve yağlama sıvılarının önemi göz ardı edilemez çünkü işleme prosesi sırasında sıcaklığın azaltılması, yağlama ve talaş kaldırma gibi işlemlere hizmet ederler. Soğutma sıvıları, işlemenin istenen şekil ve boyutları elde etmek için iş parçasından talaşların çıkarılmasını gerektirdiği endüstriyel üretimde özellikle önemlidir. Bunun aksine, hava yalnızca yağlama sağlar ve soğutma fonksiyonuna katkıda bulunmaz. Soğutma ve yağlama sıvılarının bazı temel özellikleri arasında kesme işlemini soğutma ve aynı zamanda aletlerin dişlerini ve kesme yüzeylerini koruma yetenekleri yer alır [57].

Frezeleme operasyonlarında kullanılan, her biri farklı özelliklere ve uygulamalara sahip çeşitli tipte soğutma ve yağlama sıvıları vardır. Yaygın bir tür, hafif ve uygun fiyatlı olmasının yanı sıra iyi soğutma ve ortalama yağlama özellikleri sunan çözünür yağdır. Bununla birlikte, sade yağlar en iyi yağlama özelliklerine sahiptir ancak soğutma açısından zayıf performans gösterir. Prosesi optimize etmek ve soğutma ile yağlamayı dengelemek için bazı atölyeler, CNC frezeleme ve torna tezgahlarında minimum miktarda yağlama gerektiren soğutucuları seçer. Bu yaklaşım yalnızca israfı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kesme sıvılarıyla ilişkili çevresel etkiyi ve maliyeti de en aza indirir [81].

Frezeleme işlemleri için soğutma ve yağlama sıvılarının seçimini çeşitli faktörler etkiler. Bu faktörler şunları içerir [50]:

- Kesme alanından etkili talaş kaldırma
- Mil aracılığıyla söndürme
- Aletin içinden hava akışı
- Minimum miktarda yağlama

Frezeleme uygulamasında doğru sıvının tercihi, sürecin genel verimliliği ve kalitesini büyük ölçüde etkiler. Yanlış sıvı seçimi, yetersiz yağlama ve aşırı soğutucu sıvı kullanımına bağlı olarak takım ömründe azalma, kalıntı oluşumu, makine ve işlenen parçalarda leke, hatta cilt irritasyonuna sebep olabilir. İşleme operasyonlarının verimli bir şekilde yürütülmesi ve potansiyel sorunların ortadan kaldırılması için uygun sıvının seçilmesi zorunluluktur.

Çözünebilir yağlar olarak da bilinen emülsiyon sıvıları, frezeleme uygulamalarında kullanılan en ucuz ve en yaygın kesme sıvısı türüdür. Bu akışkanlar hafif olmalarının yanı sıra iyi soğutma ve ortalama yağlama özellikleri sunarlar. Emülsiyon akışkanları genellikle frezeleme işleminde ısı azaltma ve yağlama gibi temel işlevleri sağlayan geleneksel soğutma ve yağlama için kullanılır [82]. Emülsiyon sıvılarının bazı önemli faydaları şunlardır [80]:

- Etkili ısı dağılımı
- Yeterli yağlama
- Maliyet etkinliği
- Çeşitli işleme uygulamalarıyla uyumluluk

Yarı sentetik akışkanlar, emülsiyon akışkanların ve sentetik akışkanların özellikleri arasında bir denge sunarak gelişmiş yağlama ve soğutma performansı sağlar. Yarı sentetik soğutucuya bir örnek, orta ve yüksek düzeyde yağlama gerektiren işler için kullanılan bir mikro emülsiyon soğutucu olan TRIM MicroSol™ 515'tir. Bu sıvılar genellikle atölyeler tarafından israfı önlemek ve CNC frezeleme ve torna tezgahlarında ihtiyaç duyulan yağlama miktarını en aza indirmek için seçilmektedir [83].

Yarı sentetik sıvıların avantajları şunlardır:

- Geliştirilmiş yağlama performansı
- Daha fazla ısı azaltma kapasitesi
- Daha az atık ve daha düşük yağlama gereksinimleri
- Çok çeşitli işleme proseslerine uygundur

Sentetik akışkanlar, öğütme uygulamalarında kullanılan tamamen sentetik, yüksek yağlama etkili ve biyostatik soğutma akışkanlarıdır. Bu sıvılar paslanmaya karşı üstün koruma sağlar ve geleneksel soğutma ve yağlama sıvılarının yerine yaygın olarak kullanılır. Ancak köpüklenme ve yetersiz yağlama gibi sorunların önlenmesi için doğru yoğunluk ve antifriz karışımının sağlanması şarttır. Frezeleme operasyonlarında sentetik sıvıların kullanılmasının faydaları şunlardır:

- Olağanüstü pas koruması
- Yüksek yağlama etkinliği
- Artırılmış soğutma yetenekleri
- Gelişmiş frezeleme teknikleri ve malzemeleriyle uyumluluk

Sadeyağlar, yani düz yağlar, frezeleme ve diğer işleme proseslerinde tercih edilen soğutma ve yağlama sıvılarıdır. Bu yağlar, mükemmel yağlama özellikleri sunmalarına karşın, soğutma performansları bakımından nispeten daha zayıftırlar. Özellikle taşlama, frezeleme, delme, tornalama, testereyle kesme ve soğuk kesme gibi, üstün yağlamanın önem taşıdığı uygulamalarda sıklıkla kullanılırlar. Sınırlı soğutma kapasitelerine rağmen, etkili yağlama sağlayarak takım ömrünü uzatma kapasiteleri sebebiyle işleme endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Çözünebilir yağlar, öğütme işlemlerinde kullanılan, su bazlı olmayan bir diğer soğutma ve yağlama sıvısı türüdür. Ekonomik olmaları ve çeşitli işleme operasyonlarında yaygın olarak tercih edilmeleri bu yağları popüler kılar. İyi soğutma ve orta derecede yağlama özellikleri sunan çözünebilir yağlar, birçok uygulama için cazip bir alternatif oluşturur. Su ile karıştırıldıklarında stabil, sütlü bir emülsiyon oluştururlar, bu da talaş tahliyesini kolaylaştırır ve takım ömrünü uzatır. Çözünebilir yağlara eklenen korozyon önleyici maddeler, yağlama performansını artırır [84].

Sentetik ve yarı sentetik kesme sıvıları, frezeleme işlemlerinde kullanılan diğer su bazlı olmayan akışkanlardır. Sentetik kesme sıvıları, tüm kesme akışkanı türleri içinde en iyi soğutma performansını sunar. Hafif olmaları ve üstün soğutma yetenekleri sayesinde, takımdan talaşın hızla uzaklaştırılmasını kolaylaştırır, talaş tahliyesini iyileştirir ve takım ömrünü uzatır. Yarı sentetik kesme sıvıları, çözünebilir yağların ve sentetik sıvıların

özelliklerini bir araya getiren hibrit bir kesme sıvısıdır. Bu sıvılar, soğutma performansı ile yağlama özellikleri arasında bir denge sağlayarak, çeşitli frezeleme ve işleme süreçleri için çok yönlü bir seçenek sunar [74].

1.2.3.3. Nanoakışkan Soğutma ve Yağlama Sıvıları

Nanoakışkanlar, baz sıvıya eklenen nanopartiküller yoluyla oluşturulan yeni nesil soğutucu sınıfını temsil eder ve bu yöntem karışımın termofiziksel özelliklerinde belirgin değişikliklere yol açar. Nanopartiküllerin malzeme türü, boyutu, viskozitesi, yüzey yükü ve akışkanın stabilitesi gibi faktörler, nanoakışkanların termal performansını önemli derecede etkiler. Özellikle, bakır nanopartikülleri içeren R113 soğutucusu gibi soğutucu bazlı nanoakışkanların kullanılması, hekzagonal bor nitrid (hBN) nanopartikülleri, poliol ester (POE) baz akışkana eklendiğinde olduğu gibi, çalışma akışkanının ısı transfer özelliklerini iyileştirebilir [85].

Nanoakışkanların soğutma ve yağlama sıvıları olarak ısıtma sistemlerinde ve işleme proseslerindeki kullanımı geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Özellikle Waspaloy gibi zor işlenen malzemeler üzerinde kesme sıvısı olarak nanoakışkanların kullanımı, işleme verimliliğini artırmada önemli bir rol oynar. Tornalama işlemi sırasında, nanopartikül takviyeli kesme sıvısının uygulandığı MMY soğutma/yağlama yöntemi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, ısıtma sistemlerinde, yağlama yağına nanopartiküllerin eklenmesiyle performansın arttığı görülmüştür [86].

Nanoakışkanların kullanımı, bir dizi avantaj ve zorluk sunar. Bu teknolojinin avantajları arasında gelişmiş mikrobiyal kontrol, artırılmış yağlama kapasitesi, daha etkin soğutma ve korozyon kontrolü bulunur. MMY soğutma/yağlama yöntemi gibi nanoakışkanların kullanımını ve püskürtme yöntemlerini içeren teknikler, nozül adaptasyonu gibi çeşitli avantajlar sağlar. Ancak, bu sıvıların soğutma kapasitesi bazı durumlarda yetersiz kalabilir ve termal meydan okumalara neden olabilir. Nanoakışkan soğutma ve yağlama sistemlerinin performansını optimize etmek, uygulamanın özgün gerekliliklerini ve özelliklerini dikkate almayı gerektirir [87].

1.2.3.3.1. Nanoakışkan Soğutucuların Tanımı ve Avantajları

Nanoakışkanlar, yani nanoakışkan soğutucular, su veya etilen glikol gibi baz akışkanlar içerisine süspansiyon halinde dağıtılan nanopartiküllerden oluşur ve üstün ısı transfer kabiliyetleriyle dikkat çeker. Nanopartiküllerin atomlarının yaklaşık %20'sinin yüzeylerinde bulunması, onları yüksek verimli ısı iletkenleri yapar. Ayrıca, nanoakışkanların inanılmaz derecede küçük boyutları, soğutma sistemlerindeki dar alanlara nüfuz ederek ısıyı hassas bileşenlerden etkin bir şekilde uzaklaştırmalarını sağlar [88].

Nanoakışkan soğutucuların termal iletkenliği, nanopartiküllerin konsantrasyonu, boyutu, şekli, yüzey kimyası ve aglomerasyon durumu gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Bu soğutucuların kullanımı, geleneksel soğutuculara göre soğutma sistemlerinde ısı transfer performansını önemli ölçüde iyileştirebilir. Örneğin, nanoakışkanların otomobil radyatörlerinde kullanımı, motor soğutma performansını belirgin şekilde artırabilir [88].

Elektronik cihazların giderek küçülmesi, etkili soğutma çözümlerine olan ihtiyacı artırır. Nanoakışkan soğutucular, bu minyatürize elektronik ekipmanlarda aşırı ısınma problemlerini çözmede öneme sahiptir. Nanoakışkanların soğutma sistemlerinde kullanılması, pompalama gücündeki değişiklikler aracılığıyla soğutma işleminin verimliliğini artırabilir. Nanoakışkan soğutucuların soğutma teknolojilerinde benimsenmesi, ısı yönetimi ve dağıtım alanlarında devrim yaratma potansiyeline sahip olup, elektronik cihazların performansı ve güvenilirliğini artırma olasılığını barındırır [89].

Nanoakışkan soğutucular, gelişmiş termofiziksel özellikleri nedeniyle geleneksel soğutma yöntemlerine kıyasla daha yüksek soğutma verimliliği sunar. Isıl verimliliği en üst düzeye çıkarmak için nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi, viskozite ve ısıl iletkenlik gibi özelliklerinin optimize edilmesi gerekir. Örneğin araştırmacılar, helyum ve titanyum dioksit nanopartiküllerinin eklendiği amonyak-su nanoakışkanlarının en yüksek enerji performansına yol açtığını bulmuşlardır. Bu üstün termofiziksel özellikler, nanoakışkan soğutucuların, elektronik ekipmanlarda optimum çalışma performansını korumak için çok önemli olan aşırı ısıyı etkili bir şekilde dağıtmasını sağlar. Nanoakışkan sıvılarının

oluşturulmasında kullanılan bazı nanopartikül grupları ve özellikleri Tablo 1.3’de görülmektedir.

Tablo 1.3. Farklı nanopartikül kategorilerinin özellikleri[90]

Nanopartiküllerin kategorisi	Nanopartiküllerin özellikleri
Fullerenler	Fullerenler yapı olarak grafitte benzer ve karbonun mevcut formlarından biridir. Moleküller, üç boyutlu yapıların oluşmasını sağlayan içi boş bir küre veya tüp şeklini alır.
Nanotüpler	Karbon nanotüpleri (CNT); Fullerene ait bir varyant, boru şeklinde yapılar oluşturacak şekilde uzatılır. Çok büyük en boy oranlarıyla (1 mm'ye kadar uzunluk ve 1-2 nm'ye kadar çap) üretilebilirler. Yüksek çekme mukavemeti/ağırlık oranıyla karakterize edilirler; çeliğe kıyasla 100 kat daha yüksek çekme mukavemetine ve yalnızca altıda bir ağırlığa sahiptir. CNT'ler aynı zamanda yüksek moleküler adsorpsiyon kapasiteleri, geniş yüzey alanları, iletkenlikleri ve benzersiz elektronik özellikleriyle de bilinir.
Nanoteller	Nanoteller, büyük bir en boy oranına sahip, birkaç on nanometrelilik bir çap aralığına sahip iletken veya yarı iletken nanopartiküllerden yapılmış tek kristal bir yapıdır. Kobalt/altın/bakır/silikon gibi metallere, yarı iletkenlerden, oksitlerden, nitrürlerden, sülfidlerden yapılabilmektedir.
Nanokristaller	Kuantum noktaları (2-10 nm boyutunda yapay atomlar), yarı iletken malzemeler, metal oksit ve metalden oluşan küçük topluluklardır. Üstün manyetik, optik ve elektronik özelliklere sahiptirler. Yalıtkanlardan, yarı iletkenlerden, metallere, manyetik malzemelerden yapılabilmektedir.
Seramik oksitlerden ve metallere elde edilen diğer nanopartiküller	Bu, metallere, organik malzemelerden, yarı iletkenlerden, seramiklerden ve oksitlerden oluşan geniş bir yelpazedeki küresel nanopartikül formlarını içerir. Bu nanopartiküllerin boyutu ve şekli çok açık bir şekilde gösterilmemiştir veya açıklanmamıştır.

Nanoakışkan soğutucuları kullanmanın bazı önemli faydaları şunlardır [89]:

- Geliştirilmiş ısı transfer oranları
- Geliştirilmiş termal iletkenlik
- Yüksek ısı uygulamalarda üstün soğutma performansı

Nanoakışkan soğutucuların bir diğer avantajı ise geleneksel soğutma sistemlerine göre daha düşük güç tüketimidir. Nanoakışkanlarda nanopartiküllerin kullanılması, ısı transferi için gereken enerji miktarını azaltır, bu da daha düşük ısı akışına ve sisteme toplam enerji girişinin azalmasına neden olur. Bu enerji verimliliği performansı, deneysel araştırmaların nanoakışkan kullanımının motor soğutma performansını daha az güç tüketirken önemli ölçüde artırdığını gösterdiği otomobil radyatörleri gibi uygulamalarda özellikle faydalıdır.

Daha düşük güç tüketiminin bazı önemli avantajları şunlardır [91]:

- Azalan enerji maliyetleri
- Daha düşük çevresel etki
- Artan sistem güvenilirliği ve ömrü

Nanoakışkan soğutucular, soğutma sistemlerinin boyut ve ağırlığını azaltma konusunda önemli bir role sahiptir. Nanopartiküllerin soğutucu içerisine entegrasyonu ve mikro kanalların sistem tasarımında kullanılması sayesinde, hem sistemlerin genel boyutları hem de kütlesi minimuma indirgenir. Araştırmalar, 30 nanometreden daha küçük boyutlara sahip nanopartiküllerin kullanıldığı ve 60 gram soğutucu akışkan barındıran bir soğutma sisteminin etkin bir şekilde geliştirildiğini ortaya koymaktadır.

Bu daha küçük boyut ve azaltılmış ağırlık, çeşitli uygulamalar için aşağıdaki gibi birçok farklı avantaj sunar [89]:

- Arttırılmış taşınabilirlik ve kurulum kolaylığı
- Sistem tasarımı ve entegrasyonunda daha fazla esneklik
- Alanın kısıtlı olduğu ortamlarda geliştirilmiş performans

Nanoakışkan soğutucuların kullanımı, özellikle elektronik soğutma uygulamalarında son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bu yenilikçi soğutucular, termal iletkenliği artırma ve ısı transfer verimliliğini iyileştirme amacıyla, bir baz akışkan içerisinde nanometre boyutunda katı parçacıklardan oluşan nanoakışkanlar kullanılmaktadır. Nanoakışkan soğutuculara yönelik artan ilgi, bilgisayar ve sunucu gibi yüksek ısı üreten elektronik

cihazlar için etkin soğutma sağlama kabiliyetleriyle ilişkilendirilmektedir. Nanoakışkanların en dikkat çekici avantajlarından biri, asılı parçacıkların küçük boyutları sayesinde, akışkan içinde mikro taşınım oluşturma kapasitesiyle daha etkin ısı transferine imkân tanınmasıdır [92].

Tıbbi uygulamalar alanında nanoakışkan soğutucular, sıcaklığa duyarlı tedavi ve ekipmanlar için önemli bir avantaj sağlar. Bu soğutucuların üstün termal iletkenliği sayesinde, sıcaklık regülasyonu üzerinde hassas bir kontrol mümkün hale gelir, bu da istikrarlı ve düzgün soğutma gerektiren tıbbi cihaz ve prosedürler için ideal koşullar yaratır. Difüzyon absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde nanoakışkan soğutma sistemlerinin kullanılmasıyla elde edilen deneyimler, nanopartiküllerin katkısı sayesinde genel performansın nasıl artırılabileceğini göstermektedir. Bu teknolojinin uygulanması, sıcaklığa duyarlı tedaviler, ilaçlar ve cihazların yönetimi konusunda iyileştirmeler sağlayarak, hasta sonuçlarını ve sağlık hizmetlerinin kalitesini artırma potansiyeline sahiptir [62].

Enerji üretimi ve depolama sistemleri üzerinde de nanoakışkan soğutucuların umut verici etkileri bulunmaktadır. Bu sistemler, üretim, kurutma ve termal depolama gibi çeşitli elektrik ve termal enerji girdilerine bağımlı olup, verimli ısı transferi genel performansları için hayati öneme sahiptir. Güneş enerjisi termal sistemleri gibi, ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi için nanoakışkan soğutucuların kullanılması, termal iletkenlik, viskozite ve özgül ısı gibi termofiziksel özelliklerin nanoakışkanın bileşimi ve konsantrasyonu ile uyarlanabilmesi anlamına gelir. Bu durum, yüksek derecede kişiselleştirme ve optimizasyon imkânı sunarak, çeşitli enerji üretimi ve depolama sistemlerinin özgün termal yönetim gereksinimlerini etkili bir şekilde karşılamasına olanak tanır [93].

1.2.3.3.2. Nanoakışkan Soğutucuların Özellikleri ve Kullanım Alanları

Nanoakışkan soğutucuların tanımı ve işleyiş prensipleri, motor soğutma kapasitesinin otomobil sistemlerinde nanoakışkanların kullanımıyla artırılmasına yönelik yapılan öncü araştırmalara dayanmaktadır. Nanoakışkanların termal iletkenliği artırma ve ısı transfer verimliliğini yükseltme özellikleri, bu teknolojinin temel avantajları arasında yer

almaktadır. Bu çerçevede, alüminyum nitrit (AlN) nanopartikülleri içeren sulu nanoakışkan çözeltileri, değişken çalışma koşullarında incelenmiştir. Bu yöntem, buhar sıkıştırma soğutma sürecinde kompresör dağıtım aracılığıyla sistemin enerjiverimliliğine katkıda bulunur [91].

Nanopartikül katkılı nanoakışkanlar, çeşitli uygulamalar için etkin bir soğutma metodolojisi sunmaktadır. İlgili çalışmada, Tek Fazlı Mini Doğal Konveksiyon Döngülerinin (TFmDTD) performansı, farklı çalışma koşulları altında bilgisayar simülasyonlarıyla analiz edilmiştir. Aynı zamanda, nanoakışkan kullanımının muhafazanın ısı transferini geleneksel soğutuculara kıyasla nasıl iyileştirebileceğini gösteren araştırma sonuçları da bulunmaktadır [94].

Nanopartikül katkılı nanoakışkan soğutucuların geleneksel soğutma yöntemlerine kıyasla avantajları başlığı altında, özellikle elektronik sistemlerin soğutulması için kullanılan soğutma sistemlerinin termal performansı üzerine yapılan değerlendirmeler yer almaktadır. Bu inceleme, su yerine nanoakışkan kullanılması durumunda soğutma sisteminin termal performansındaki olumlu değişimleri ele alır. Böylece, molibdendioksit ilaveli nanoakışkan soğutucuların geleneksel soğutma yöntemlerine göre sağladığı avantajlar, yüksek ısı transfer performansı ve enerji tasarrufunu içeren düşük çalışma sıcaklıklarının kullanımı gibi özelliklerle açıklanmaktadır.

Nanopartikül katkılı nanoakışkan soğutucular başta ulaşım, otomotiv, elektronik, ısıtma ve soğutma sistemleri olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle nanosoğutucu akışkanların uygulanmasında nanoakışkan teknolojisinin kullanılması, akışkan performansına kayda değer katkılar göstermiştir. Bu teknolojinin dikkate değer bir örneği, R1234yf ve R134a soğutucu akışkanlarla çalışabilen, performanstan ödün vermeden kısıtlı R134a soğutucu akışkana alternatif sunan deneysel otomobil klima sistemidir.

Nanoakışkan soğutucuların bazı önemli avantajları şunlardır [95]:

- Geliştirilmiş ısı transfer yetenekleri
- Geliştirilmiş sistem verimliliği

- Enerji tüketimini azaltma potansiyeli

Havacılık ve otomotiv endüstrileri, yüksek aşınma ve ısı direnci sunan molibden katkı nanoakışkan soğutucuların potansiyel avantajlarına özellikle ilgi göstermektedir. Bu sektörlerde, zorlu çalışma koşulları altında ekipmanın performansını ve dayanıklılığını sürdürmek hayati önem taşımaktadır. Yapılan bir çalışma, mikro ısı değiştiricilerde grafen nano trombositler (GNP'ler)/su bazlı nanoakışkanın ısı transfer özelliklerini incelemiş ve bu alanlarda gelecekteki uygulamalar için umut verici sonuçlar elde etmiştir. Bu tür araştırmaların devam etmesiyle, havacılık ve otomotiv sektörlerinde molibden katkı nanoakışkan soğutucuların kullanımı artacak ve bu yenilikçi soğutma çözümlerinden elde edilen faydalar genişleyecektir [96].

Nanoakışkan soğutucular alanında gelecekteki araştırma ve geliştirmeler, bu teknolojinin potansiyel faydalarından yararlanmak için gereklidir. Nanoakışkanlara ilişkin termal ve hidrolik performans araştırmaları 2017 yılında başladı ve o zamandan beri çok sayıda çalışma bunların uygulamalarının çeşitli yönlerini araştırdı.

Gelecekteki araştırmalarda odaklanılacak alanlar şunları içerebilir [97]

- Nanoakışkanlarda zeta potansiyelini ve nanopartikül stabilitesini etkileyen faktörlerin araştırılması
- Nanoakışkanlar kullanılarak mikrokanaallı ısı alıcılarda sistem performansına etki eden parametrelerin incelenmesi
- Farklı nanopartikül türlerinin ve bunların çeşitli akışkan ortamlarla uyumluluğunun araştırılması

Bu alandaki araştırmalar ilerlemeye devam ettikçe, nanoakışkan soğutucuların çeşitli endüstrilerde giderek daha belirgin bir rol oynaması ve soğutma ve ısı transferi uygulamalarına yaklaşımımızda devrim yaratması muhtemeldir.

Nano-akışkan soğutucular, işleme süreçlerinden elektrikli araçlara kadar çeşitli alanlarda soğutma sistemlerinin performansını iyileştirmek için kullanılan yenilikçi bir teknolojidir. Bu soğutucular, ısı transferini ve genel soğutma verimliliğini artırmak amacıyla, su ve

etilen glikol gibi geleneksel akışkanlar ile nano boyutlu parçacıkların birleşimini kullanır. Çeşitli nanopartiküllerin bu sistemlerdeki etkileri, belirli uygulamalar için en uygun kombinasyonun belirlenmesi amacıyla araştırılmaktadır. Özellikle, Waspaloy gibi zor işlenen malzemelerin işlenmesinde kesme sıvısı kullanımı, işleme verimliliğini önemli ölçüde artırabilir.

Metalik bir element olan molibden, benzersiz özellikleri nedeniyle nano-akışkan soğutucular için umut verici bir katkı maddesi olarak kabul edilmektedir. Nano-akışkanlarda yer alan nano parçacıklar ile ısı transfer katsayısını artırarak, soğutma sistemlerinin genel performansını iyileştirebilir. Ancak, ısı transferindeki bu artış, bazı durumlarda ısı değiştirici performansını düşürebilir. Bu olası dezavantaj, araştırmacıları nano-akışkan soğutucuların faydalarını en üst düzeye çıkarmak üzere daha fazla araştırma yapmaya yönlendirmektedir [98].

Nano-akışkan soğutucular, özellikle soğutma kabiliyeti ve verimlilik açısından birçok önemli avantaj sunmaktadır. Bu soğutucuların temel faydalarından bazıları şunlardır [89]:

- Gelişmiş soğutma performansına yol açabilecek gelişmiş ısı transfer özellikleri
- İşlenmesi zor malzemelerin işlenmesi için kesme sıvısında kullanıldığında artan işleme verimliliği
- Performans ve uzun ömür için optimum termal yönetimin hayati önem taşıdığı elektrikli araç akü soğutma sistemlerindeki potansiyel uygulamalar.

Nanopartiküller, nanoakışkan soğutuculara dâhil edildiklerinde ısı transferinde çok önemli bir rol oynarlar. Nanoakışkanların kullanıldığı mikrokanailli bir ısı emicide sistem performansını etkileyen parametrelerin incelendiği bir çalışmada araştırmacılar, nanoakışkanların kullanımıyla ısı transfer katsayısının arttığını bulmuşlardır. Ancak ısı transferindeki bu iyileşmeye rağmen ısı değiştiricinin genel ısı performansının düştüğünü de belirtmişlerdir. Bu, nanopartiküllerin ısı transfer verimliliğini artırabildiğini ancak nanoakışkan soğutucuların genel performansını etkileyen başka faktörlerin de rol oynayabileceğini gösteriyor [62].

Nanoakışkan soğutucularda ısı transferini etkileyen bazı önemli faktörler şunlardır [99]:

- Kullanılan nanopartiküllerin türü ve konsantrasyonu
- Nano boyutlu parçacıkların hacimsel yüzdesi
- Nanopartikül sentezi ve sisteme dâhil edilme yöntemi

Nanoakışkan soğutucuların mekanizması, nanopartiküllerin soğutma sistemlerine entegre edilmesiyle ilgilidir ve bu sayede performansın artırılması hedeflenmektedir. Bir araştırma, tornalama işlemleri sırasında uygulanan MMY soğutma/yağlama yönteminde, nanopartikül takviyeli kesme sıvısının kullanımını mercek altına almıştır. Araştırmacılar, kesme sıvısına nano parçacıklar ekleyerek MMY sisteminin soğutma kapasitesini artırmayı amaçlamışlardır. Diğer bir çalışma ise, dört farklı nanopartikül türünün otomobil radyatörlerinde nanoakışkan kullanımının ısı transferi performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmalar, molibden nanopartiküllerinin soğutma sistemlerine entegrasyonunun potansiyel uygulamalarını ve avantajlarını ortaya koymaktadır. Ancak, performansı optimize etmek ve mekanizmaları tam olarak kavramak adına daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [100].

Otomotiv endüstrisinde nanoakışkan soğutucular, özellikle elektrikli araçlara yönelik akü soğutma sistemleri olmak üzere çeşitli uygulamalarda umut verici sonuçlar göstermiştir. Araştırmacılar nanoakışkan kullanımıyla ısı transfer katsayısının artmasına rağmen ısı değiştiricinin ısı performansının düştüğünü bulmuşlardır. Bu sistemlerin performansını optimize etmek için aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır [101]:

- Akışkanın soğutma bloğuna giriş sıcaklığı ile soğutma bloğundan çıkış sıcaklığı arasındaki fark (ΔT)
- Soğutucunun hacimsel akış hızı
- Bakır oksitten (GNP-CuO) ve saf sudan hibrit grafen nanoplaka gibi nanoakışkan seçimi

Elektronik soğutmada nanoakışkanların kullanıldığı ana alanlardan bazıları şunlardır [89]:

- Ulaştırma ve otomotiv endüstrisi
- Endüstriyel ısıtma ve soğutma sistemleri
- Harici soğutma cihazları ve sistem pompaları için açma-kapama düğmeleri içeren elektrik güç panelleri

Nanoakışkan soğutucuların endüstriyel işlemlerdeki kullanımı, Waspaloy gibi zor işlenen malzemelerin işleme verimliliğini artırma gibi çeşitli uygulamalarda incelenmiştir. Bu tür uygulamalarda, baz akışkanın ve ısı transfer ortamının seçimi büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel süreçlerde kullanılan yaygın ısı transfer akışkanları arasında su, mineralyağlar, etilen glikol, parafin, ester ve tuz bulunmaktadır. Ancak, Al_2O_3 gibi nanopartiküllerin baz akışkan içinde asılı kaldığı durumlarda, boş bir boru kullanımıyla ilişkili olarak sürtünme kaynaklı entropi üretiminin dikkate alınması gerekmektedir. Bu faktör, nanoakışkan soğutucuların etkinliğini ve verimliliğini değerlendirirken önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır [86].

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Parça üretiminde kullanılan en önemli yöntemlerden biri de talaşlı imalat yöntemidir. Üretim sırasında, iyi bir yüzey kalitesi elde etmek ve aşırı enerji tüketiminin üstesinden gelmek en büyük zorluklardan biridir. Bu nedenle malzemelerin farklı koşullar altında işlenebilirlik performanslarının incelenmesi oldukça önemli bir konudur. Literatürde bu alanda yapılan pek çok çalışma görmekteyiz. Örneğin;

Mia ve ark. [102] Taguchi yöntemi ile AISI 1060 çeliğinin MMY koşullarında tornalama davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak yapılan kantitatif analiz ile kesme hızının yüzey pürüzlülüğünü etkilediği bildirilmiştir. Kesme derinliğinin takım aşınmasını etkilediğini ilerleme hızının ise ağırlıklı olarak malzeme kaldırma oranını etkilediği varyans analizi ile belirlenmiştir.

Sarıkaya ve Güllü [103] AISI 1050 çeliğinin CNC tornalanmasında MMY yağlama koşullarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Soğutma koşullarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca MMY koşullarında en mükemmel yüzey kalitesinin elde edildiğini rapor etmişlerdir.

Grzesik ve Wanat. [104] seramik kesici uçlar kullanılarak su verilmiş alaşımli çeliğin tornalanmasında yüzey kalitesinin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmıştır ve yan yüzey aşınmasının artmasının yüzey pürüzlülüğünü bozduğunu belirtmişlerdir.

Bilga ve ark. [105] çok katmanlı kaplamalı tungsten karbür uçlu EN 353 çeliğinin CNC kaba tornalanmasını Taguchi yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Girdi parametreleri olarak köşe radyüsü, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme deri alınırken çıktı parametresi olarak enerji tüketimi dikkate alınmıştır. Sonuç olarak EN 353 çeliğinin geleneksel tornalama koşullarına kıyasla; makine tarafından tüketilen aktif enerji (AECM), enerji verimliliği (EE) ve güç faktörü (PF) parametrelerinde sırasıyla %57,025 %61,776 ve % 7,49'luk bir iyileşme sağlandığını belirtmişlerdir.

Abbas ve ark. [106] yüzey pürüzlülüğüne göre her bir faktörün ve etkileşimin önemini tahmin etmek için varyans analizi yapılmıştır. Sonucunda kesme derinliği ile ilerleme hızı arasında da bir etkileşim olduğunu ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin ilerleme hızından daha büyük olduğu gözlemlendi.

Elbah ve ark. [107], AISI 4140 çeliğinin sert tornalanması sırasında kullanılan farklı uçların yüzey pürüzlülük analizini optimizasyon teknikleri kullanılarak araştırmıştır. Geleneksel seramik uca kıyasla silici seramik uç ile daha iyi yüzey kalitesinin elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Sajjady ve ark. [108] ultrasonik titreşim destekli tornalamada kesme hızı, ilerleme hızı ve titreşim işleminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini analiz etmişler ve ilerleme hızının (%75,38) ardından titreşim işleminin (%5,7) baskın faktör olduğunu bulmuşlardır.

Otomotiv ve inşaat gibi yaygın imalat sektörlerinde oldukça tercih edilen bir malzeme olan AISI 5140 çeliği yüksek oranda krom içerdiği için işlenebilirliği oldukça zordur. Bu nedenle, işleme parametreleri incelenerek doğru bir şekilde belirlenmesi gereken önemli malzemelerden biridir. Bu alanda yapılan bazı çalışmalar;

Grzesik ve Wanat [109] AISI 5140 çeliğinin sürekli silindirik kuru tornalamasında parça yüzey pürüzlülüğünün yeni bir analizini sunmuştur. Sonuçlar, sert tornalamanın belirli yüzey profilleri ve mikro yapılar ürettiğini fakat yaklaşık 0,25 mm'lik *Ra* değerlerinin son taşlama ile elde edilen değerlerle karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir.

Kuntoğlu ve ark. [29] yanıt yüzey metodolojisini (RSM) kullanarak AISI 5140 çeliğinin farklı kesme hızları, ilerleme hızları ve kesme kenarı açıları altında optimum kesme koşullarını belirleyerek titreşim ve yüzey pürüzlülüğünü analiz etmişlerdir. Sonuçlar ilerleme hızının aksenal titreşimi (%65,8) ve yüzey pürüzlülüğünü (%69,4) artırmada en etkili parametre olduğunu, kesme kenar açısı ve kesme hızının ise radyal titreşim (%75,5) ve teğet titreşimde (%64,7) baskın olduğunu göstermiştir.

Aslan [110] AISI 5140 çeliğinin tornalamada yanak aşınması, kesme kuvvetleri ve titreşim değerlerinin geliştirilmesi için proses parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Çalışmanın sonucunda yan aşınma titreşim ve kesme kuvvetlerinin birbiriyle ilişkili olduğunu göstermişlerdir.

Kahraman [111] AISI 5140 çeliğinin tornalama performansını incelemiş ve taguchi yöntemi ile yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için optimum kesme parametrelerini araştırmıştır. Sonuç olarak 0.5 mm kesme derinliği, 0,2 mm x devir⁻¹ ilerleme hızı ve 2000 rpm dönme hızında minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir.

Malzemelerin farklı soğutma/yağlama koşulları altındaki işleme performansları üzerine de çalışmalar yer almaktadır.

Ji ve ark. [112] Ti6Al4V alaşımlarını delmek işlemi için farklı soğutma tekniklerinin etkisini incelemişlerdir. MMY tekniğini kullanarak enerji tüketiminin azaldığını ve daha iyi bir delik kalitesi elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Zhang ve ark. Ni [113] bazlı süper alaşımların kuru ve MMY kesme ortamında işlenmesini inceleyerek takım ömrünü ve iş parçası yüzey durumunu araştırmışlardır. Yazarlar, kuru işlemeye kıyasla MMY ile yapılan işlemlerde 1,5 kat daha uzun takım ömrü ve üstün yüzey formu elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Takım-talaş ara yüzeyine nüfuz eden ince basınçlı buğu nedeniyle sürtünmenin azalması takım aşınmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Mikro damlacıklar kesme bölgesine ulaşarak sürtünmeyi en aza indirerek talaş yapışmasını ve kesme kuvvetini en aza indirerek güç tasarrufu sağladığını belirtmişlerdir.

Yıldırım et al. [114] yaptıkları çalışmada kuru ortam, geleneksel kesme sıvısının minimum miktarda yağlama (MMY) sistemini karşılaştırmışlar ve kesme sıvısının azaltılmasıyla daha iyi işleme performansı elde edildiğini iddia etmişlerdir.

Usca ve ark. [115] AISI 5140 çeliğinin kuru, MMY ve kriyo-LN₂ gibi farklı soğutma/yağlama ortamlarındaki işleme parametrelerini araştırmışlardır. Sonuç olarak Cryo-LN₂

soğutma/yağlama kullanımının kuru ortama kıyasla tüm işlenebilirlik özellikleri üzerinde iyi sonuçlar verdiğini bulmuştur.

Kara ve ark. [116] AISI 5140 çeliğinin silindirik taşlanması esnasında kullanılan parametrelerin performansını araştırmıştır. Optimum yüzey pürüzlülüğünün kriyojenik işlem görmüş numunelerde elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Maruda ve ark. [117] AISI 1045 çeliğinin farklı soğutma/yağlama yöntemlerinin altında tornalanmasından sonra elde edilen işlenmiş yüzeylerin metrolojik ve tribolojik yönlerinin analizini sunmuşlardır. Çalışma sonucunda, yüzey topografyasının sürtünme çiftindeki tribolojik göstergeler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu bulmuşlardır.

Son yıllarda ise soğutma/ yağlama ortamı olarak nanoakışkan kullanımı, işlenebilirlik ve işleme verimliliği üzerinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Nano partikül içeren soğutma yağlama sıvılarının, saf kesme yağlarına kıyasla daha yüksek spesifik yüzey alanına ve ısı transfer katsayısına sahip olabileceği görülmüştür [118,119]. Nano partiküller, yağlama filmi oluşturarak yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltabilir ve aşınma direncini artırabilir [120-122]. Ayrıca Nano partiküller, yağlama sıvısının ısı transfer özelliklerini iyileştirerek, ısıyı daha etkin bir şekilde uzaklaştırabilir [90]. Nano partiküller, yüksek sıcaklıklarda daha stabil bir performans sergileyebilir, bu da işleme esnasında oluşan yüksek sıcaklıklar için avantaj sağlayabilir [123]. Böylece soğutucunun yağlama performansını ve tribolojik özelliklerini arttırlar [124,125].

Yıldırım [126] AISI 420 çeliğinin hacimce %0,5 oranında grafen nanoplatler içeren nanoakışkan kesme sıvısı ve kriyojenik soğutma sıvısı altındaki işlenebilirliğini araştırmıştır. Sonuç olarak kriyojenik soğutmanın yüzey sıcaklığı, talaş morfolojisinde, takım ömrü ve takım aşınmasında daha iyi olduğu, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topografyasında ise nanoakışkanın daha iyi olduğu bulunmuştur.

Maruda et al. [127] Ti6Al4V Titanyum alaşımının tornalama işlemini kuru işleme, saf MQL tekniği ve bakır nanopartikül ilaveli MMY tekniği gibi farklı soğutma/yağlama ortamında gerçekleştirerek işleme performanslarını incelemişlerdir. Farklı boyutlarda bakır nanopartikül ilavesinden en küçük boyutlu bakır ilaveli MMY ortamında en az

takım krater ve yan aşınması oluştuğunu, kuru ve saf MMY ye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Bir diğer çalışmada, Yıldırım et al. [128] Nikel bazlı Hastelloy C4 alaşımının TiO₂ ve SiO₂ nanopartikül ilaveli üç farklı bitkisel yağ ortamındaki işlenebilirliğini araştırmışlardır. Sonuç olarak mısır yağı ve TiO₂ nanoakışkanı ile yapılan işlemenin kuru işlemeye kıyasla yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, güç tüketimi ve kesme sıcaklığında sırasıyla %58,57, %53,18, %36,1 ve %34,88 iyileştirme sağladığı bulunmuştur.

Makkesana et al. [129] grafit ve molibden disülfid takviyeli nanoakışkan-MMY kullanımının Inconel 625 işlenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve mikrosertliği üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünde MoS₂ içeren ayçiçek yağı diğer koşullara göre daha iyi sonuçlar verirken takım aşınması ve kesme sıcaklığında nano MMY'nin iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Sayuti ve ark. [130] sertleştirilmiş çelik AISI4140'ın tornalama işleminde yağlayıcı olarak SiO₂ nano-yağlama nanomalzemesini kullanmışlardır. En uygun yüzey kalitesinin, mineral yağda ağırlıkça %0,5'lik bir konsantrasyon ve 30° nozul açısında eldeedebileceği ifade edilmiştir.

Nam ve ark. [131], işlenebilirlikte bitkisel ve parafin yağlarının baz sıvıları ile elmas nanoakışkanların etkisini araştırdı. Çalışmanın sonuçları, nanoakışkanların kullanılmasının aksenal kuvvet ve torkun azalmasına ve yüzey kalitesinin iyileşmesine yol açtığını göstermektedir.

Habibnia ve ark. [132] Mo40 çeliğinin tornalanmasında nanoakışkan minimum miktarda yağlama (NMQL) stratejisi kullanımının, soğutma sıvısı yağı ve geleneksel kuru durumun kullanıldığı koşullarla kıyaslamasını yapmışlardır. Nanoakışkan kullanımının, sıcaklık aralığında yaklaşık %60 azalmaya iş parçası yüzeyinin pürüzlülük kalitesini ise iyileştirmeye neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Malzemelerin işlenmesi, kesme bölgesindeki sıcaklığı önemli ölçüde artırır ve iş parçası kalitesine karar vermede kritik öneme sahiptir. Geleneksel kesme sıvıları, işlemede ısıyı

dağıtmak için yaygın olarak kullanılsa da, işçilerin ekolojisini ve sağlığını tehdit eder. Bu nedenle, literatürde belirtildiği üzere geleneksel kesme sıvılarına çevre ve kullanıcı dostu alternatifler belirleme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda nanopartiküllerin malzemelerin işlenmesi sırasında yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık kontrolü problemlerine çözüm olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında molibden katkılı yeni bir nano-akışkan soğutma sıvısı kullanılarak AISI 5140 çeliğinin frezelenmesi sırasında takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi gibi çıktı parametrelerinin araştırılması ve farklı soğutma yağlama koşulların altındaki işleme parametreleri ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deney Malzemesi

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada iş parçası olarak AISI 5140 imalat çeliği kullanılmıştır. Yüksek mukavemet ve tokluk özelliklerine sahip AISI 5140 çeliği metal endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Numunelerin kimyasal bileşimi Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

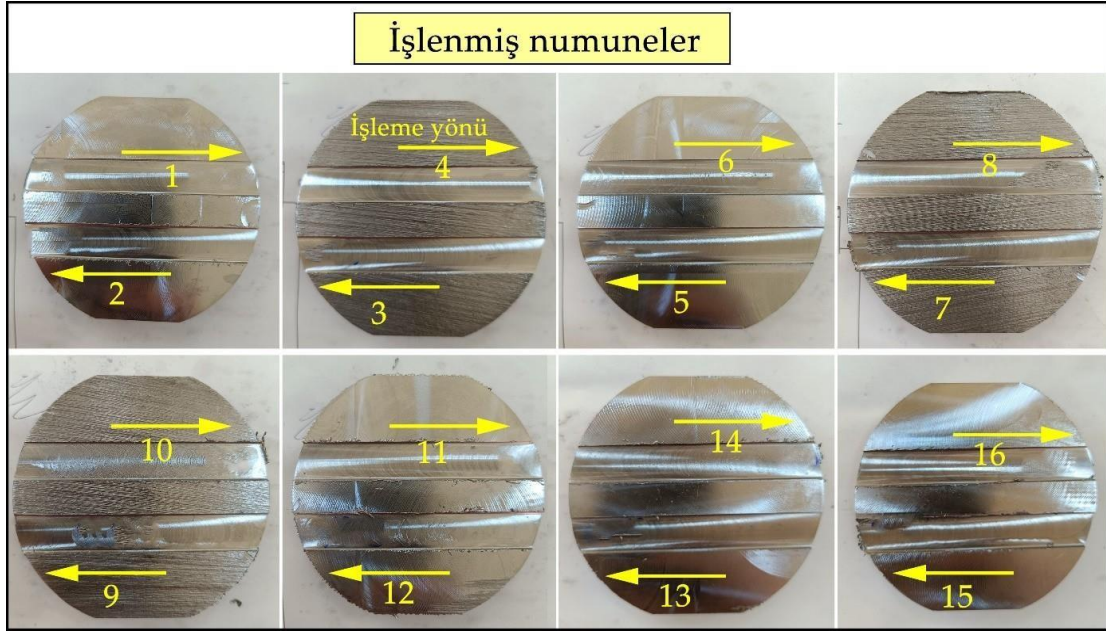
Tablo 3.1. Deney numunesinin (AISI 5140) kimyasal bileşimi[115]

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
Oran (%)	0,45	0,3	0,75	0,035	0,03	1	Denge

Kimyasal birleşimde yer alan elementlerin yapıya çeşitli etkileri mevcuttur bu etkiler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- C: Mukavemet ve sertleşebilirlik sağlar ancak şekillendirilebilirliği azaltır.
- Si: Çeliğin içinde oksijen giderici olarak bulunur.
- Mn: Karbon gibi çelik yapıda yer alır ve çeliğin mukavemetini arttırıcı bir özellik gösterir.
- P: Çeliğin akma ve çekme mukavemetini arttırır ve ayrıca talaşlı imalat ile şekillendirilme kabiliyetini arttırır.
- S: Çelik üretiminde malzeme yapısında kalan bir elementtir. İstenmeyen özelliklerinden dolayı malzemedan uzaklaştırılır. Bu elemanın miktarı sadece işlenmiş şekillendirilebilirlik özelliğini arttırdığı için yüksek tutulabilir.
- Cr: Korozyon ve oksidasyon direnci sağlar ve sertleşebilirliği arttırır.

Tüm deney numuneleri $\Phi 50\text{mm}$ çap ve 20 mm kalınlıkta olacak şekilde kesilerek frezeleme için hazır hale getirilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin örnek görüntüleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deney numuneleri ve işleme doğrultuları

3.2. Kullanılan Takım Tutucu ve Kesici Takımlar

Bu çalışmada kesici takım ucu olarak APKT takım uçları kullanılmıştır. Bu takım uçları torna ve dik işleme (freze) gibi tezgâhlarda kullanılan takma uçlu karbür kesici takımdır. Bu ucun farklı kaliteler ve ölçülerde üretimi yapılmaktadır. APKT uçlar, dört kenarlı ve pozitif bir kesme geometrisine sahip uçlardır. Genellikle kare veya dikdörtgen şekillidirler ve her bir kenarında kesici kenarlar bulunur. Bu uçlar, yüksek hızda kesme ve iyi yüzey kalitesi sağlar. APKT uçlar genellikle karbürden (sert metal) yapılıdır.

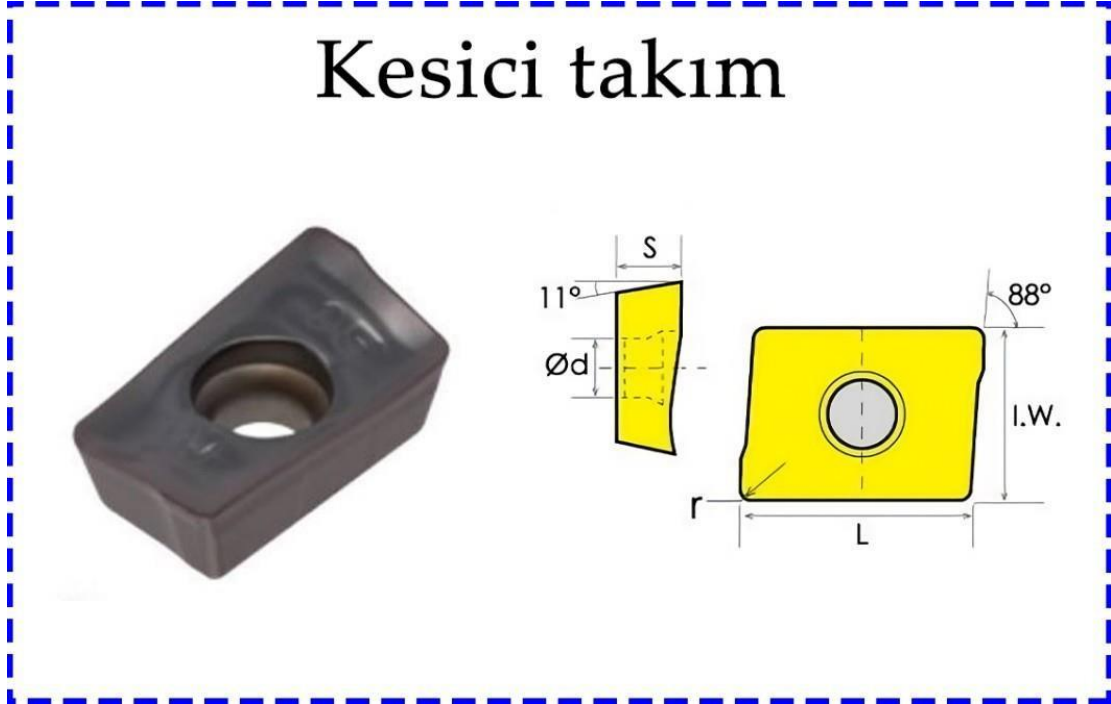
Karbür uçlar, sertlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından üstün özellikler sunar. Ayrıca, çeşitli kaplama malzemeleri ile kaplanarak uçların ömrü uzatılabilir ve kesme performansı artırılabilir. Yaygın kaplamalar arasında TiN (Titanyum Nitrür), TiCN (Titanyum Karbonitrür), AlTiN (Alüminyum Titanyum Nitrür)

ve diğer PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) kaplamaları bulunur. Bu kaplama çeşitleri kullanılacağı malzemelere göre değişkenlik gösterir.

APKT uçları seçerken dikkate alınması gereken bazı kriterler:

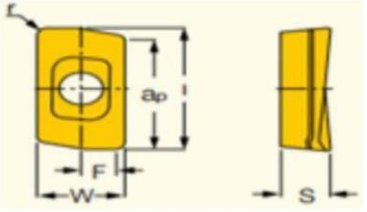
- İşlenecek Malzeme: Uçun işlenecek malzemeye uygun olup olmadığı.
- Kesme Hızı ve İlerleme: İşlem sırasında gereken kesme hızı ve ilerleme oranı.
- Makine Gücü: Kullanılacak CNC makinesinin gücü ve stabilitesi.
- Yüzey Kalitesi Gereksinimi: İstenen yüzey kalitesi ve hassasiyet derecesi.

Frezeleme deneyleri için HM 90 APKT 1003PDR IC908 (Iscar, Konya, Türkiye) kodlu kesici uçlar seçilerek kullanılmıştır. Bu kesici takım tungsten karbür malzemeden imal edilmiş ve köşe radius'u 0,8 mm olan kesici uç ST90 AP10 D12 W12 L120 Z01(Smoxh, Konya, Türkiye) kodlu freze takımına monte edilmiştir. Kesici uçlar her deney sonunda değiştirilmiş ve her deney için ayrı kesici takım kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takım uçlarının görüntüleri Şekil 3.2'de kesici takıma ait özellikler ise Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan kesici takım uçları

Tablo 3.2. Kesici ucun özellikleri[133]

APKT10 12-1-120 değiştirilebilir yüz frezeleme takımı						
	a_p (mm)	$R\epsilon$ (mm)	W (mm)	F (mm)	S (mm)	L(mm)
		9,8	0,8	6,76	1,4	3,53

3.3. İşlenebilirlik Deneyleri

Frezeleme deneyleri, Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği laboratuvarlarında yer alan 3 eksenli 7,5 kW güc ve 10,000 rpm dönüş hızına sahip Dahlih MCV-860 (Dahlih, Taichung, Tayvan) model bir freze tezgâhında yapılmıştır. Bu tezgâha ait bazı özellikler Tablo 3.3’de görülmektedir.

Tablo 3.3. CNC freze makinesinin bazı özellikleri[133]

Modeli	MCV-860
Çalışma yüzey alanı	950 × 550mm
Maks. iş parçası ağırlığı	800 kg
İş mili burnuna kadar masa üstü yüzeyi	150 ~ 700mm
Mil merkezi ile sütun yüzeyi arasındaki mesafe	600 mm
Kesme beslemesi	10.000 mm/dak
Yüksek geçiş hızı (X ekseni/Y ekseni/Z ekseni)	40/40/30 (m/dak)
Minimum giriş artışı	0,001 mm
İş mili motoru (30 dk. derecelendirme/sürekli derecelendirme)	11 kW/7,5 kW
Mil hızları	8000 rpm
Mil yatağı delik çapı	Ø70
Mil maks. tork	47,7 nm
Güç	36KVA
Pnömatik basınç	6 kg/ cm ²
Kesme pompası	3/4 HP
Net ağırlığı	5400 kilo

Deneyler ful deney sistemine göre tasarlanmış olup toplam 16 deney planlanmıştır. Deney tasarımında 2 farklı kesme hızı (75-100 m/dk), 2 farklı ilerleme oranı (0,075-0,100 mm/dev) ve 4 farklı soğutma/yağlama ortamı seçilmiştir. Tablo 3.4'te deney tasarımı verilmiştir. Kesme parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi ve optimize edilmesi, işleme verimliliğini, yüzey kalitesini ve takım ömrünü doğrudan etkiler. Uygun parametrelerin seçimi, takım ve iş parçası malzemesi, işleme yöntemi ve istenen yüzey kalitesi gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, kesme parametrelerinin dikkatli bir şekilde ayarlanması, metal işleme operasyonlarının başarısı için kritik öneme sahiptir. Kesme parametreleri üretici firmanın tavsiyeleri ve yapılan ön deneyler doğrultusunda belirlenerek planlanmıştır.

Tablo 3.4. Deney tasarım planı(2x2x4)

Frezeleme parametreleri	Birim	Seviye			
		L1	L2	L3	L4
Soğutma koşulları	-	Kuru	MMY	Taşkın soğutma	Nanoakışkan
Kesme hızı, (Vc)	m/dk	75	100	-	-
İlerleme hızı, (fn)	mm/dev	0,075	0,100	-	-

Deneylerden önce adil sonuçlar için her numunenin üzerinden bir tabaka alınmak suretiyle yüzeyler temizlenmiştir. Kesme derinliği (0.5 mm) sabit tutularak "Zig" takım yolu ve aşağı yönlü frezeleme stratejisi uygulanmıştır. "Zig" takım yolu ve aşağı yönlü frezeleme stratejisinin kullanılmasının nedeni CNC frezeleme için CAM programlarında "Zig" takım yolu, takımın yüzeyle sürekli temasını sağlayarak hem düz hem de düzensiz konturlu iş parçalarını etkili bir şekilde işleme yeteneği nedeniyle tercih edilir, böylece daha hızlı ve daha verimli malzeme kaldırma sağlanır. Ek olarak Zig takım yolu yüzey kalitesini artırabilir ve takım aşınmasını azaltabilir. Şekil 3.3'de deneyleringerçekleştirildiği CNC Freze tezgâhı görülmektedir.



Şekil 3.3. CNC Freze tezgâhı

3.4. Soğutma ve Yağlama Ortamları

Frezelemede soğutma ve yağlama ortamı, işleme sürecinde kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltmak, ısınmayı kontrol altına almak ve talaşların verimli bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamak için kullanılır. Soğutma ve yağlama, takım ömrünü uzatmak, yüzey kalitesini iyileştirmek ve işleme verimliliğini artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

Soğutma Yağlama Ortamının işleme performansına etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Isı Dağılımı: İşleme sırasında oluşan ısının dağıtılması ve kontrol edilmesi.
- Sürtünme Azaltma: Kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak takım aşınmasını minimize etme.
- Talaş Kaldırma: Talaşların iş parçasından ve kesici takımdan uzaklaştırılması.
- Korozyon Koruması: İş parçası ve makine parçalarının korozyona karşı korunması.
- Yüzey Kalitesi: İşlenen yüzeyin kalitesinin artırılması.

Tüm bu etkilerinden dolayı soğutma ve yağlama ortamının seçimi ve doğru şekilde uygulanması, işleme performansını ve verimliliğini artırır, takım ömrünü uzatır ve iş

parçası kalitesini iyileştirir. Talaşlı imalatta yaygın olarak kullanılan Soğutma Yağlama Uygulama Yöntemleri:

a. Taşkın soğutma

- Tanım: Kesici takım ve iş parçası üzerine sürekli olarak büyük miktarda soğutma sıvısı uygulanmasıdır.
- Avantajlar: Etkili soğutma ve talaş kaldırma.
- Dezavantajlar: Yüksek sıvı tüketimi ve atık yönetimi.

b. Minimum Miktar Yağlama (MQL)

- Tanım: Kesici takım ve iş parçasına minimum miktarda yağlama sıvısı uygulanması.
- Avantajlar: Düşük sıvı tüketimi, daha az çevresel etki ve temiz çalışma ortamı.
- Dezavantajlar: Yüksek maliyetli ekipman ve bazı işlemler için yeterli soğutma sağlamayabilir.

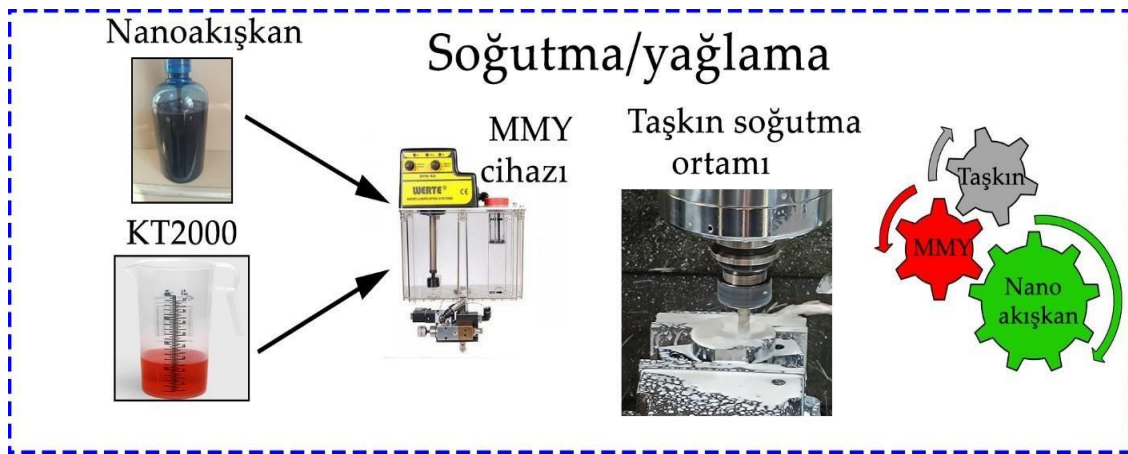
c. Nanoakışkan Soğutma

- Tanım: Nanoakışkanlar, genellikle baz sıvıya nanometre boyutlarında metal, metal oksit, karbür, nanotüp veya diğer nanomalzemelerin eklenmesiyle elde edilir.
- Avantajlar: Gelişmiş Isı iletimi, düşük sürtünme ve aşınma, etkili talaş kaldırma, iyileşmiş yüzey kalitesi sağlama, düşük miktarda sıvı kullanımı, enerji verimliliği ve temiz çalışma ortamı.
- Dezavantajlar: Yüksek maliyet, karmaşık kontrol gereksinimleri ve düzenli bakım gerektirme.

Soğutma yağlama sıvılarının seçiminde bir takım kriterler gerekmektedir. Bu kriterler;

- İşlenecek Malzeme: Farklı malzemeler, farklı soğutma ve yağlama ihtiyaçları gerektirir.
- İşleme Türü: Kaba işleme, finisaj işleme, derin delik delme gibi farklı işlemler farklı soğutma ve yağlama stratejileri gerektirir.
- Makine Kapasitesi: Makinenin soğutma sistemi kapasitesi ve tasarımı.
- Çevresel ve Sağlık Faktörleri: Kullanılan sıvıların çevresel etkileri ve operatör sağlığı üzerindeki etkileri.

olarak sıralanabilir. Soğutma/Yağlama sıvıları ile ilgili bilgiler doğrultusunda frezeleme deneylerinin optimum işlenebilirlik performanslarını belirlemek amacıyla 4 farklı soğutma/yağlama (S/Y) ortamında (Kuru, MMY, taşkın soğutma ve Mo bazlı nanoakışkan) gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Kuru işleme ortamı sürdürülebilirlik kapsamında değerlendirilmektedir [134]. Taşkın soğutma/yağlama ortamı ile takım tezgâhına bağlı olan bir nozuldan soğutma sıvısı kesme bölgesine iletilmiştir. MMY ve nanoakışkan soğutma/yağlama ortamlarında ise Werte Micro STN-15 (Kar-Tes, İstanbul, Türkiye) model bir sistem kullanılmıştır. Kullanılan sistemin ve soğutma/yağlama ortamının şematik gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir. Sistemde kullanılan basınç 6 bar ve sıvı akış hızı 35 mL/h olarak belirlenmiştir. Sisteme bağlı olan 3 mm çapındaki nozul deney numunesine yaklaşık 200 mm uzaklıkta konumlandırıldı. MMY ortamında kesme sıvısı olarak hidrodinamik yağlama özelliğine sahip KT2000 sentetik yağ kullanılmıştır.

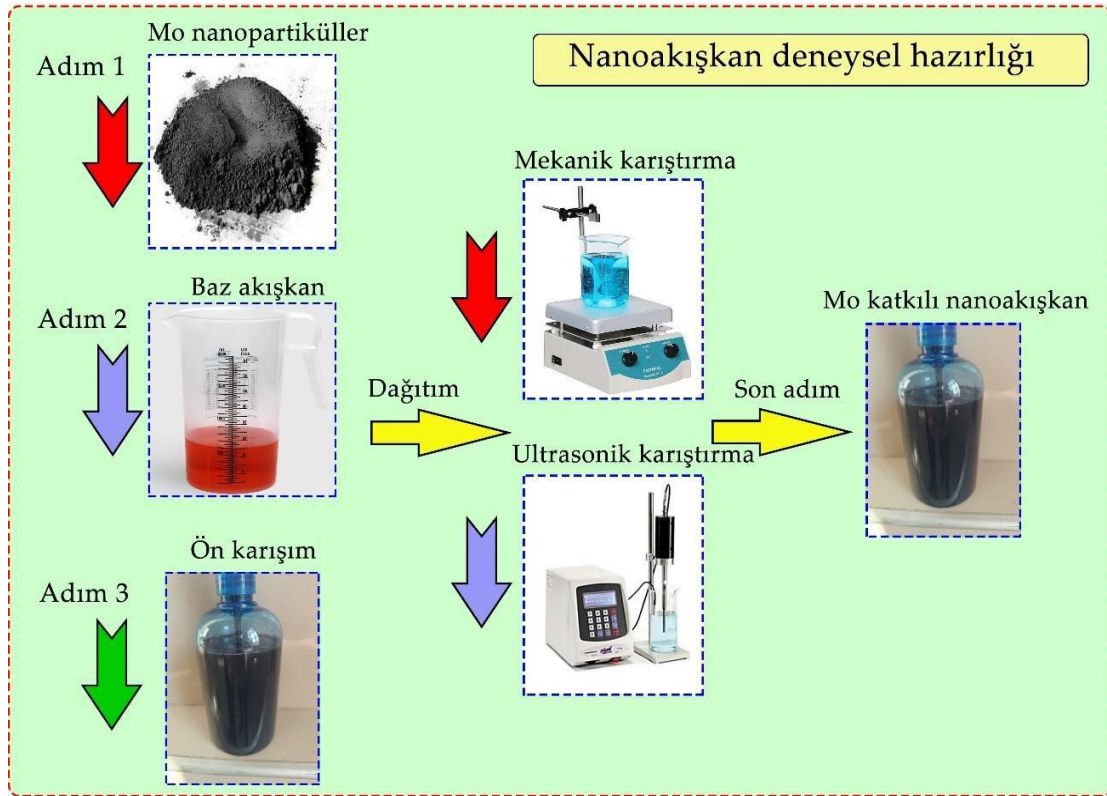


Şekil 3.4. Soğutma/yağlama ortamı şematik gösterim

Nanoakışkan ortamında ise KT2000 sentetik yağı içerisine Mo nanopartikülleri ilave edilmiştir. Mo nanopartikülleri üretici firmadan (Nanokar, İstanbul, Türkiye) satın alınmıştır. Mo nanopartiküllerinin teknik detayları Tablo 3.5'te görülmektedir. Şekil 3.5'de nanoakışkanın hazırlama süreçleri detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3.5. Mo nanotozlarının bazı özellikleri

Özellikler	Değer
Bulk Yoğunluğu (g/cm ³)	0.25
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	10.2
Renk	Siyah
Kristal yapı	Kübik
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	50
Spesifik Yüzey Alanı(m ² /g)	22.0-35.0



Şekil 3.5. Nanoakışkan hazırlama süreçleri

Mo nanopartiküller KT2000 sentetik yağ içerisinde %0,5 oranında ilave edilerek kesme sıvıları oluşturuldu. Kesme ortamlarının her biri için 500 ml nanoakışkan hazırlanmıştır. Nanopartiküller sentetik yağ içerisinde ilave edilerek mekanik bir karıştırıcıda yaklaşık 5 dakika harmanlandı. Daha sonra ultrasonik sonikasyonla yaklaşık 30 dakika karıştırıldı.

3.5. Ölçüm Aletleri

Bu çalışmada kesme parametrelerinin ve soğutma/yağlama ortamlarının AISI 5140 çeliğinin frezelenmesi üzerindeki etkileri araştırıldı. Bu kapsamda yüzey pürüzlülüğü, takım yan aşınması, kesme sıcaklığı ve güç tüketimi analizleri yapılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü, bir yüzeyin mikroskobik profilini değerlendirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu ölçüm, üretim süreçlerinde kalite kontrol ve yüzeylerin fonksiyonel özelliklerinin değerlendirilmesi için kritik öneme sahiptir [135]. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için kullanılan çeşitli yöntemler ve parametreler vardır. En yaygın kullanılan parametreler şunlardır:

- Ra (Ortalama Pürüzlülük): Yüzey profilinin ortalama sapmasının aritmetik ortalamasıdır. En yaygın kullanılan pürüzlülük parametresidir.
- Rq (Kare Kök Ortalama Pürüzlülük): Yüzey profilinin kök ortalama kare sapmasıdır.
- Rz (Tepe-Vadi Yüksekliği): Belirli bir ölçüm uzunluğu boyunca yüzey profilindeki en yüksek tepe ile en düşük vadi arasındaki farktır.
- Rt (Toplam Yükseklik): Profilin en yüksek tepesinden en düşük vadiye kadar olan toplam yüksekliği.

Bu çalışmada yüzey kalitesini ölçmek için Time 3200 (Time, Pekin, Çin) yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın özellikleri; kesme noktası: 0,25 mm, n*kesme noktası: 51, standart: ISO, aralık: $\pm 80 \mu\text{m}$, filtre: RC, ekran: Ra dır. Ölçümler

yapılırken üretici firma tarafından önerilen ölçüm standartları kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümünde genellikle ortalama değerler (Ra) tercih edilmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (3.1) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır [136].

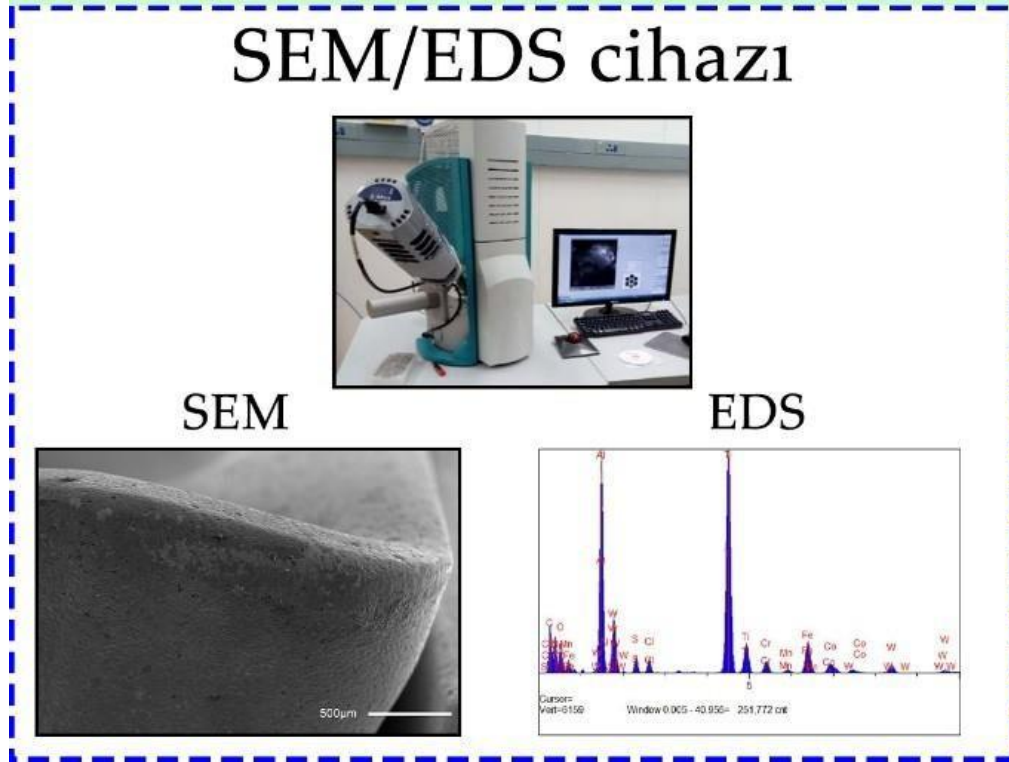
$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

- Ra: Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü,
- L_m: ölçülen mesafe
- y: Nominal yüzeyden sapma temsil edilmektedir.

Ölçümler her numunenin farklı bölgelerinden 5 kez alınarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) kaydedilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün daha iyi anlaşılabilmesi için yüzeylerin topoğrafik görüntüleri alınmıştır.

Kesici takım yan kenarlarında oluşan aşınma, takım ömrünü ve işleme kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir sorundur. Yan kenar aşınması (Yan aşınma), kesici takımın iş parçasıyla temas eden yan yüzeylerinde meydana gelir ve zamanla kesme performansını düşürür. Bu aşınma türü, çeşitli nedenlere bağlı olarak gelişir ve işleme sürecinde dikkatle izlenmesi gerekir. Kesici takım yan kenarlarında oluşan hasarların tespiti için Insize ISM PM200SB (Insize, Suzhou New District, Çin) model bir optik mikroskop kullanılmıştır. Kesici takımda oluşan aşınma mekanizmaları JEOL JSM 6510 SEM cihazında (Jeol, Tokyo, Japonya) SEM, EDS ve mapping analizleri ile tespit edilmiştir. Ölçümler kesici takımın yan tarafından ISO 3685 normlarına uygun olarak en fazla aşınan bölge dikkate alınarak yapılmıştır. SEM cihazı ve ölçümlerine ait görüntü Şekil 3.6'da verilmiştir.

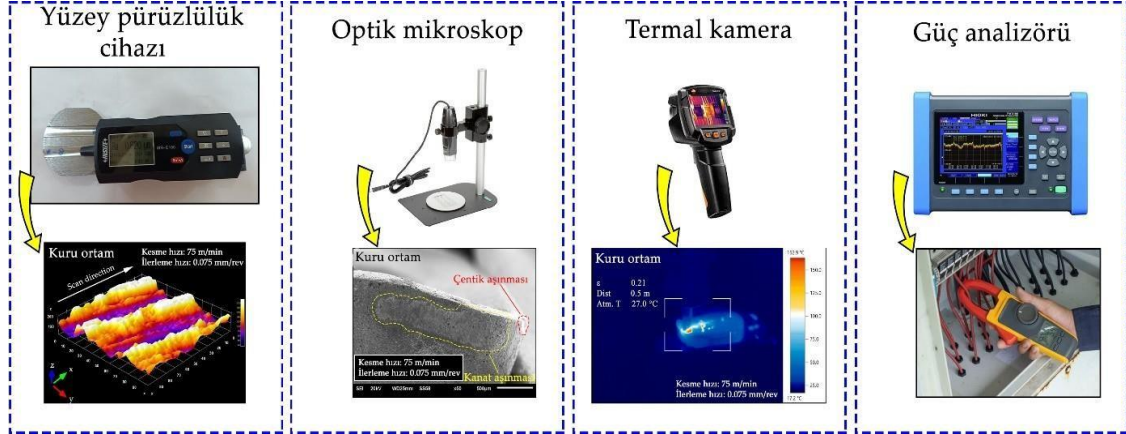


Şekil 3.6. SEM cihazı ve ölçüm gösterimi

Kesme sıcaklığı, işleme süreci sırasında kesici takım ile iş parçası arasındaki temas bölgesinde oluşan sıcaklıktır. Bu sıcaklık, malzeme türüne, kesme parametrelerine (kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği), takım malzemesine ve soğutma sıvısının kullanımına bağlı olarak değişir. Kesme sıcaklığı, metal işleme süreçlerinde işlenebilirlik, takım ömrü, yüzey kalitesi ve işleme hassasiyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kesme sıcaklığının doğru bir şekilde kontrol edilmesi, yüksek kaliteli iş parçaları üretmek ve maliyetleri düşürmek için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, frezeleme testleri sırasında kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkları tespit etmek amacıyla işlemenin son geçişinde kesici takım iş parçasından çıkmadan önce Testo 871 (Testo, İstanbul, Türkiye) model bir termal kamera ile gerçekleştirilmiştir. Kesme bölgesi ile termal kamera arasındaki mesafe 400 mm'dir.

Freze tezgâhında harcanan güç tüketimi, işleme sürecinin verimliliğini ve maliyetini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Frezeleme işlemi sırasında güç tüketimi, çeşitli kesme parametrelerine, iş parçası malzemesine, kesici takım malzemesine ve işleme koşullarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle güç tüketiminin araştırılması oldukça

önemlidir. Freze tezgâhında harcanan güç tüketimini belirlemek amacıyla HIOKI PW 3198 güç analizörü (Hioki, Nagano, Japonya) kullanılmıştır. Güç analizörünün ölçüm kabloları, çekilen akımı ölçmek için CNC cihazının üç ana fazına bağlanır. Cihazdan elde edilen veriler özel bir yazılım kullanılarak tüketilen güç miktarı hesaplanmıştır. Ölçüm yöntemlerinin şematik gösterimi Şekil 3.7 'da verilmiştir.



Şekil 3.7. Ölçüm yöntemlerine ait şematik gösterim

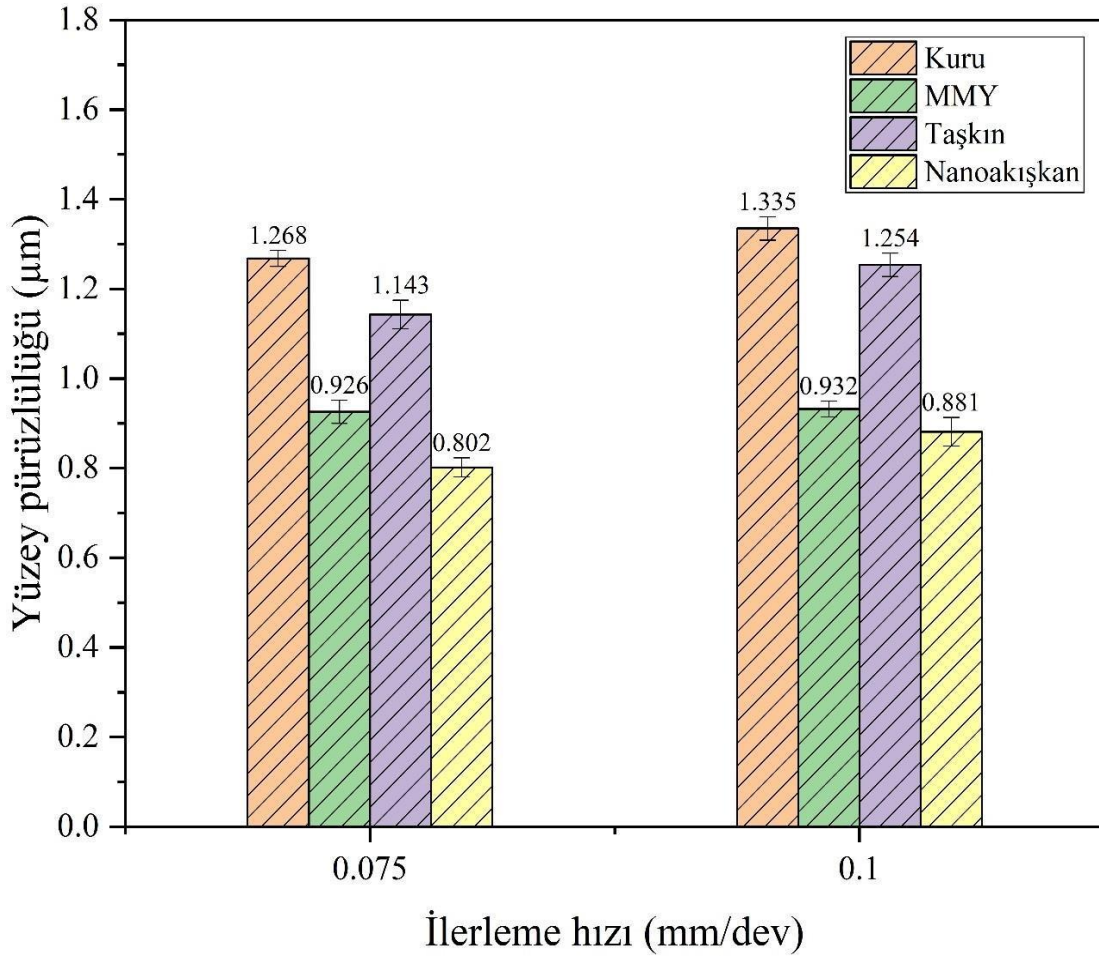
Deneyler sonrasında uygulanan kesme parametreleri altında oluşan talaş morfolojilerinin incelenmesi amacıyla talaşlar sınıflandırılmıştır. Talaş morfolojileri optik mikroskop altında incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yüzey pürüzlülüğü Analizleri

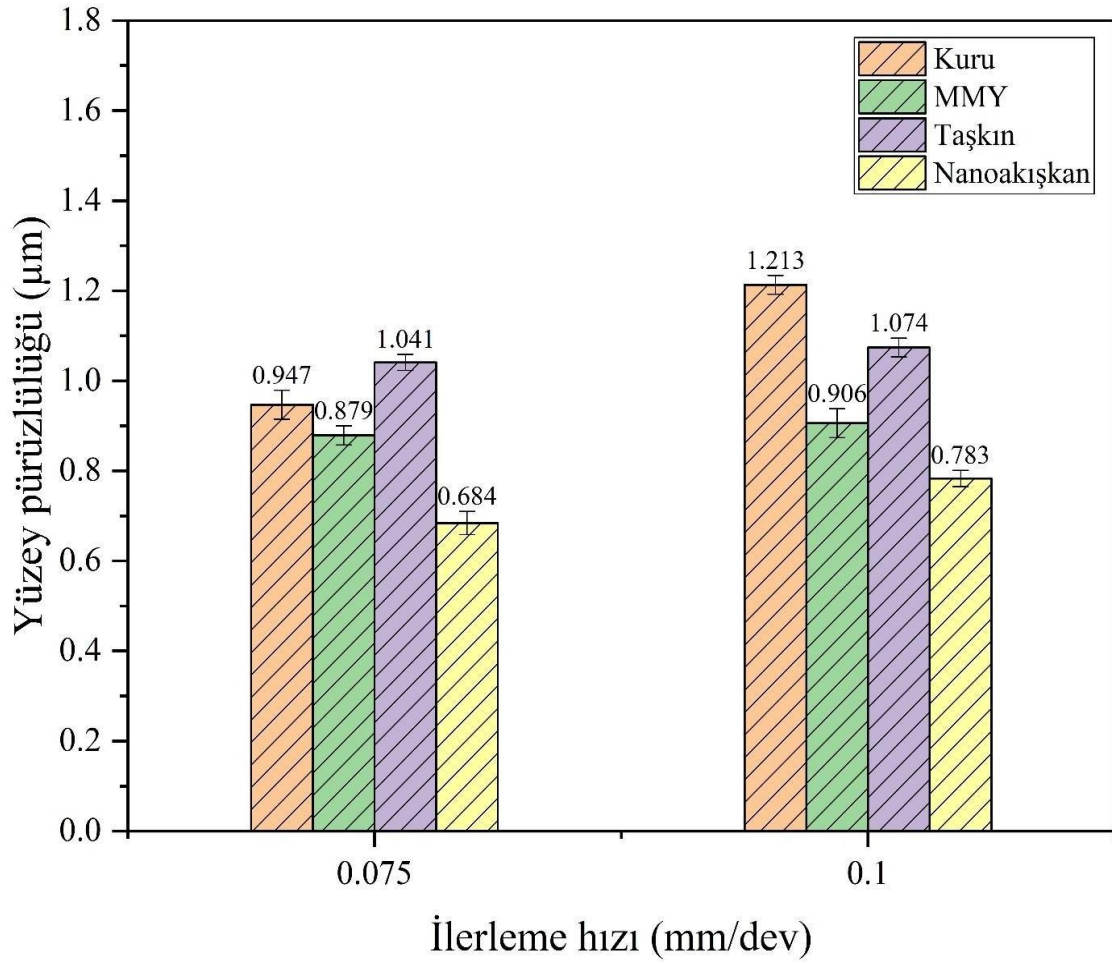
Talaşlı imalat süreçlerinde yüzey kalitesi önemli bir işlenebilirlik performans kriteri olarak değerlendirilmektedir [137]. İşleme sonrasında değerlendirme yapabilmek ve farklı kesme parametrelerinin etkilerini gözlemlemek için yüzey pürüzlülüğü yapılması gereklidir [126]. Araştırmanın bu bölümünde yapılan deneyler sonucunda farklı parametrelerin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Deneysel sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.1’de talaşlı imalat süreçlerinde yüzey kalitesi önemli bir işlenebilirlik performans kriteri olarak değerlendirilmektedir [137]. İşleme sonrasında değerlendirme yapabilmek ve farklı kesme parametrelerinin etkilerini gözlemlemek için yüzey pürüzlülüğü yapılması gereklidir [126].

Araştırmanın bu bölümünde yapılan deneyler sonucunda farklı parametrelerin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri irdelenmiştir. 75 m/dk kesme hızı için deneysel sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.1’de görülmektedir. Soğutma sıvıları açısından değerlendirildiğinde en iyi seçeneğin nanoakışkan olduğu gözlenmektedir. 75 m/dk kesme hızı baz alındığında, en iyi sonuçların nanoakışkan ortamında elde edildiği görülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülüğü ise kuru ortamdaki işlemlerde oluşmuştur. Kuru ortama kıyasla taşkın ortamda yapılan işlemlerde yüzey pürüzlülüğü kısmi oranda da olsa azalma göstermiştir. Minimum miktar yağlama ortamında yapılan frezeleme işleminde ise taşkın soğutma ortamına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Kuru ortamanazaran nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla yaklaşık %36,7 ve %34 oranında iyileşme kaydedildiği görülmüştür. İlerleme hızı açısından yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde 75 m/dk kesme hızı için ilerleme hızı arttıkça dört ortamda da yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür.



Şekil 4.1. 75 m/dk kesme hızı için ilerleme hızına bağlı farklı kesme ortamlarının yüze pürüzlülüğü üzerindeki etkileri

100 m/dk kesme hızı için ilerleme hızına bağlı farklı kesme ortamlarının yüze pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu kesme hızı baz alındığında, 0.1mm/dev ilerleme hızında yüze pürüzlülükleri daha düşük kesme hızındakine benzer davranış göstermiştir. En yüksek pürüzlülük kuru ortamda olup sırasıyla taşkın soğutma, Minimum miktar yağlama ve nanoakışkan ortamına doğru gidildikçe yüze pürüzlülüğü azalmaktadır. Düşük ilerleme hızında ise en yüksek pürüzlülük taşkın soğutmada görülse de bu değer kuru işlemeye yakın bir değerdir. Yine en az yüze pürüzlülüğü nanoakışkan ortamındaki işlemler sonucunda elde edilmiştir. Kuru ortama nazaran nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla yüze pürüzlülüğünde yaklaşık %27,7 ve %35,4 oranında iyileşme kaydedilmiştir. En düşük yüze pürüzlülüğü (0.684 µm) 100 m/dk kesme hızında, 0,075 ilerleme hızında ve nanoakışkan ortamında elde edilmiştir.

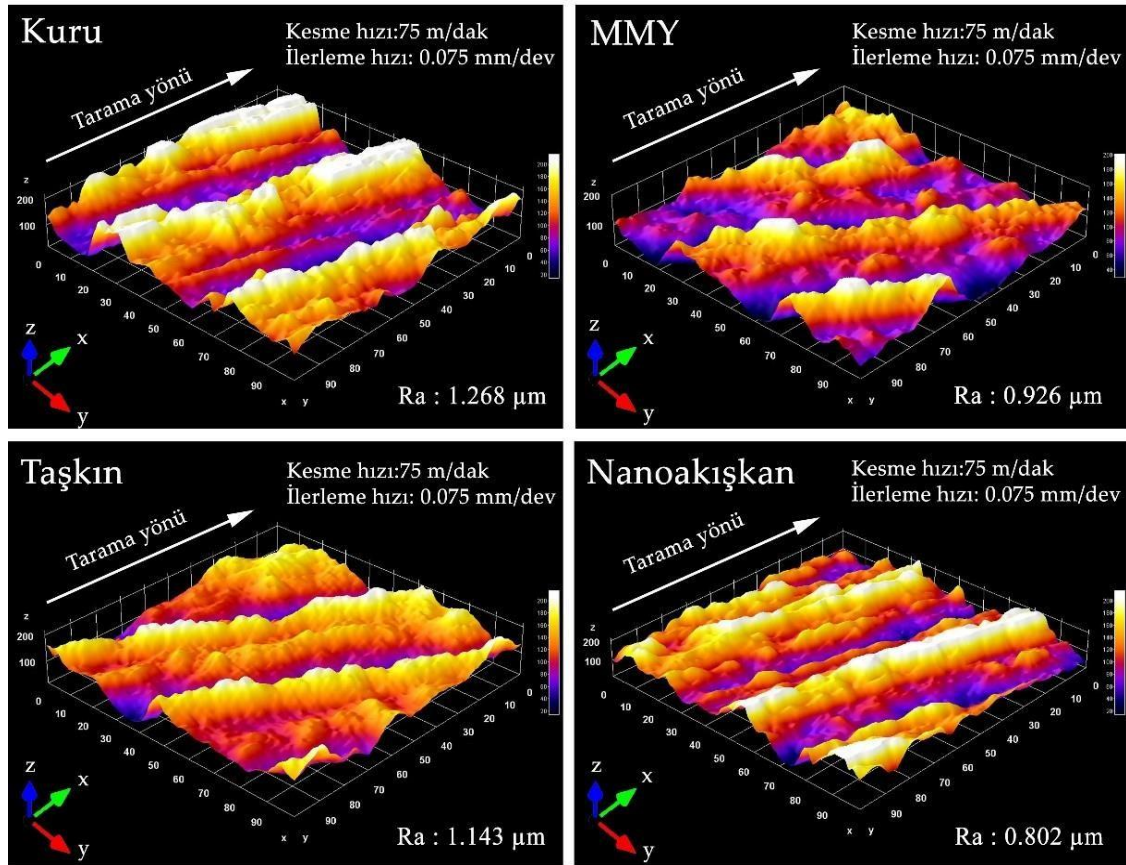


Şekil 4.2. 100 m/dk kesme hızı için ilerleme hızına bağlı farklı kesme ortamlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri

Nanoakışkan soğutma sıvısının diğer ortamlara göre daha üstün olması nanoakışkanın yağlama kalitesi ile ilişkilidir. Nanoakışkan kesme sıvıları diğer kesme sıvılarına kıyasla daha iyi bir ıslanabilirlik özellikleri sergiler. Böylece kesme bölgesinde sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olan bir film tabakası meydana gelir [138]. Nanoakışkanlar, baz sıvıya eklenen nanometre boyutunda parçacıklardan oluşur. Bu parçacıklar, sıvının termofiziksel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Nanoakışkanlar, yüksek termal iletkenlikleri sayesinde ısıyı daha hızlı ve etkin bir şekilde transfer ederler. Bu, kesici takım ve iş parçası arasındaki ısının daha hızlı uzaklaştırılmasını sağlar. Ayrıca, nanoakışkanlar, kesme sırasında oluşan titreşimleri ve aşırı sıcaklıkları azaltarak daha pürüzsüz yüzeyler elde edilmesini sağlar. İyi soğutma ve düşük sürtünme, talaşın kesici takıma yapışmasını engeller ve yüzey kalitesini artırır. Mo içeren nanoakışkan kesme sıvısında yağ kaplı nanopartiküller nozuldan ince bir sis bulutu halinde kesme bölgesine

aktarılır. Böylece kesme bölgesine rahatlıkla giren sis bulutu ince bir film tabakası şeklinde bir koruma sağlayarak aşınma performansını artırmaktadır ve dolayısıyla yüzey kalitesi de artmaktadır.

Grafiklerden de görüldüğü gibi ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Literatürde yüzey kalitesi üzerindeki etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu ve ilerleme hızındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü artırdığı bildirilmiştir [103]. Khalilpourazary and Meshkat [139] nanopartikül katkılı soğutma sıvısının daha mükemmel soğutma/yağlama performansı gösterdiğini ve böylece yüzey pürüzlülüğünün azaldığını bildirmişlerdir. Hegab et. al. [140] yaptıkları bir diğer çalışmada ise nanoakışkanların işlenebilirlik, konveksiyon ve iletim üstünlükleri sayesinde yüzey kalitesinin arttığını rapor ettiler.

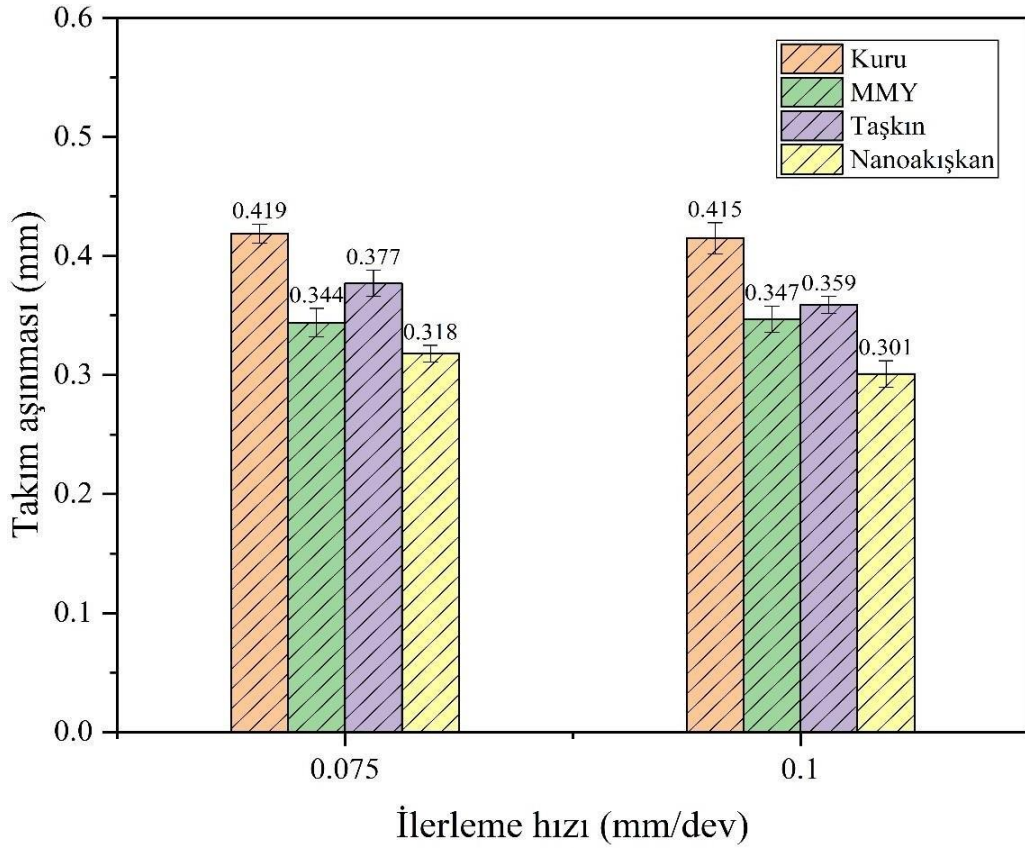


Şekil 4.3. 75 m/dk kesme hızında ve 0,075 mm/dev ilerleme hızında kesme farklı kesme ortamlarındaki yüzey topografyaları

Yüzey topografyası yüzey kalitesinin anlaşılması açısından oldukça önemli bir argümandır. Çünkü aşınma ve yorulma gibi parametreler üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir [141,142]. Şekil 4.3'te 75 m/dk kesme hızında ve 0,075 mm/dev ilerleme hızında kesme farklı kesme ortamlarındaki yüzey topografyaları incelenmiştir. Kuru ortamda yüzey pürüzlülüğü 1,268 μm iken MMY, taşkın soğutma ve nanoakışkan ortamlarında sırasıyla 0,926 μm , 1,143 μm ve 0,802 μm olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak en düşük yüzey pürüzlülük değeri nanoakışkan ortamında elde edilmiştir. Nanoakışkan ortamındaki yüzey pürüzlülüğünün diğer ortamlara kıyasla daha düzenli olduğu gözlenmektedir.

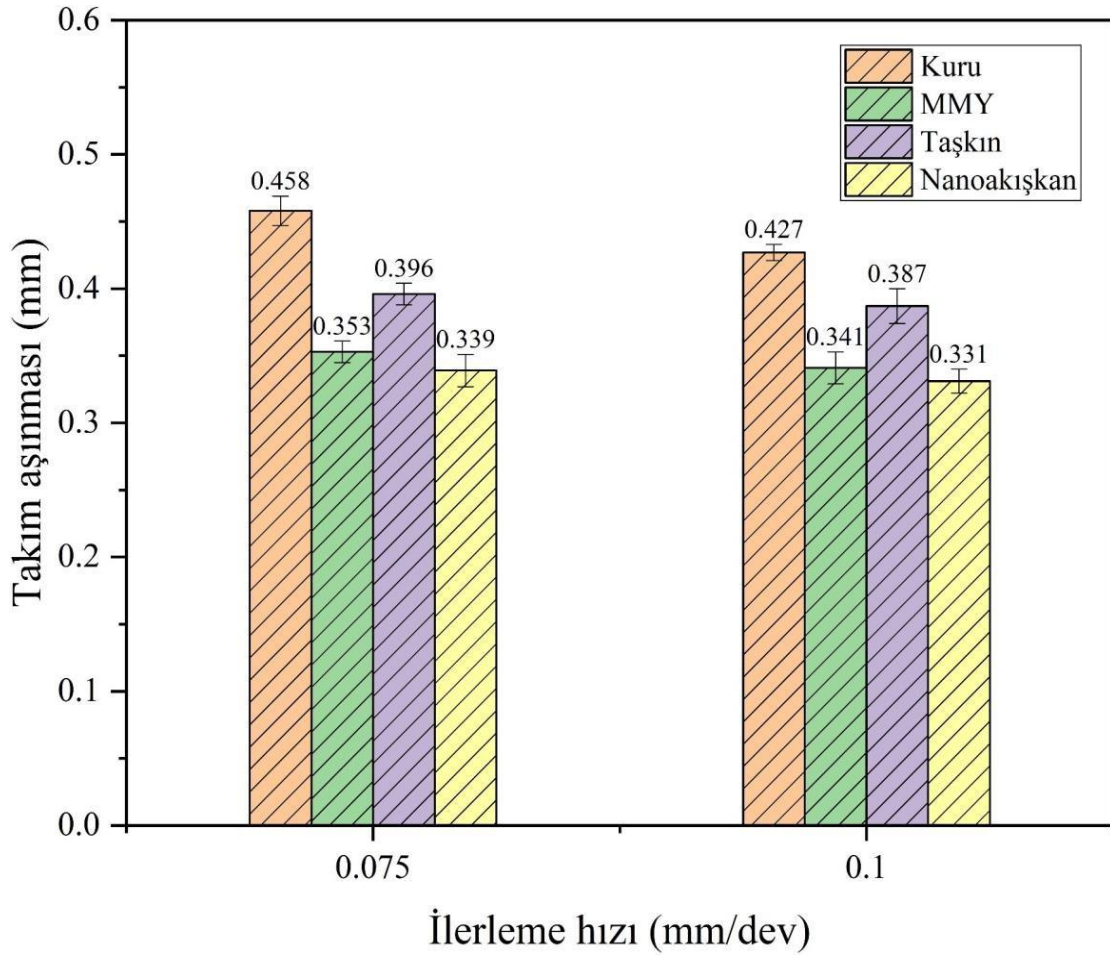
4.2. Takım Aşınması Analizleri

Takım aşınması tüm işlenebilirlik parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip bir özelliktir. Bu yüzden takım aşınması analizinin ayrıntılı irdelenmesi oldukça önem arz etmektedir [143,144]. Takım ömrünün uzun olması hem kesici takım maliyetini, hem de takım değiştirme için harcanan süreyi azaltır. Bu çalışmada iki kesme hızı, iki ilerleme hızı ve dört soğutma ortamının yan aşınma üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Toplam 16 deney yapılmış olup her bir deneyde yeni bir kesici uç kullanılmıştır. Kesici takımkenarında oluşan aşınma miktarı optik mikroskop yardımıyla ölçülerek kayıt altına alınmıştır.



Şekil 4.4. 75 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının yan aşınma üzerindeki etkileri

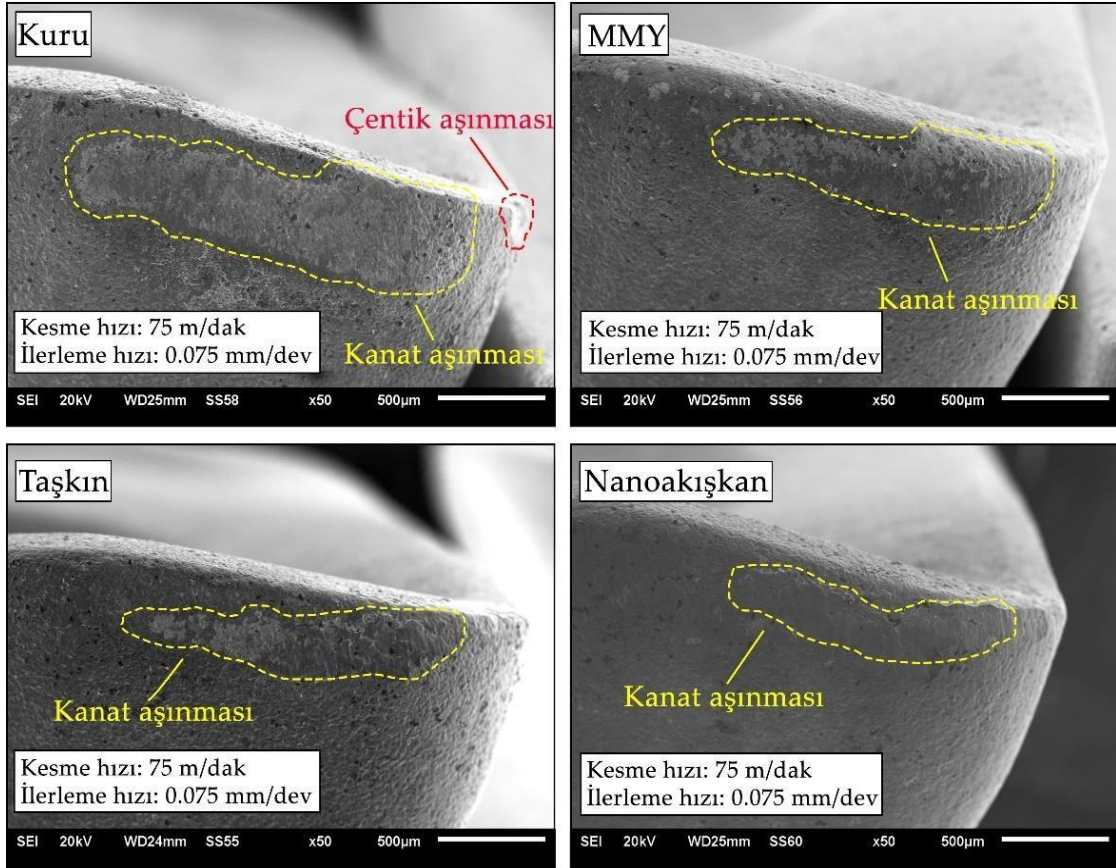
Şekil 4.4'te 75 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme ve kesme ortamlarının yan aşınma üzerindeki etkileri gösterilmektedir. 75 m/dk kesme hızı baz alındığında, diğer ortamlarla kıyaslandığında nanoakışkan ortamının yan aşınmasını azalttığı gözlenmektedir. Her iki ilerleme hızında da en yüksek aşınmaların kuru ortamda gerçekleştiği görülmüştür. Soğutma/yağlama ortamı olarak taşkın soğutmanın kullanılması 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında yan aşınmada sırasıyla yaklaşık % 10 ve % 13,5 oranında azaltmaktadır. Fakat yine de taşkın soğutmada MMY ortamına göre daha fazla takım aşınması oluşmaktadır. MMY yağlama ortamında kuru ortama göre ise sırasıyla yaklaşık % 17,9 ve %16,4 oranında daha az takım aşınması oluşur. Kuru ortama nazaran nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında yan aşınmada sırasıyla yaklaşık %24 ve %27 oranında iyileşme kaydedilmiştir. İlerleme hızı açısından incelendiğinde her bir soğutma/yağlama ortamında ilerleme hızı arttıkça genel olarak takım aşınması azalmaktadır. Fakat sonuçlar birbirine yakındır.



Şekil 4.5. 100 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının yan aşınma üzerindeki etkileri

100 m/dk kesme hızı altında farklı ilerleme ve kesme ortamlarının yan aşınma üzerindeki etkilerini gösteren grafik Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'de verilen grafik incelendiğinde 75 m/dk kesme hızında olduğu gibi bu kesme hızında da en yüksek takım aşınması kuru ortamda oluşmuştur. Kuru ortam yerine deneyler taşkın soğutma ortamında gerçekleştirildiğinde takım aşınmalarında ilerleme hızları için sırası ile yaklaşık %13,54 ve %9,37 oranında azalmaların olduğu görülmüştür. MMY ortamında gerçekleştirilen deneylerde ise sonuçlar daha iyidir. Takımların kuru ortama göre %22,93 ve %20,15 oranında daha az aşındığı görülmüştür. Bu kesme hızında kuru ortama nazaran nanoakışkan ortamında ise 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında takım yan aşınmasında sırasıyla yaklaşık %26 ve %22 oranında iyileşme kaydedilmiştir. En düşük takım yan aşınma değeri (0,301 mm) 75 m/dk kesme hızında, 0,100 ilerleme hızında ve nanoakışkan ortamında elde edilmiştir. Aşınma durumu kesme bölgesindeki yüksek

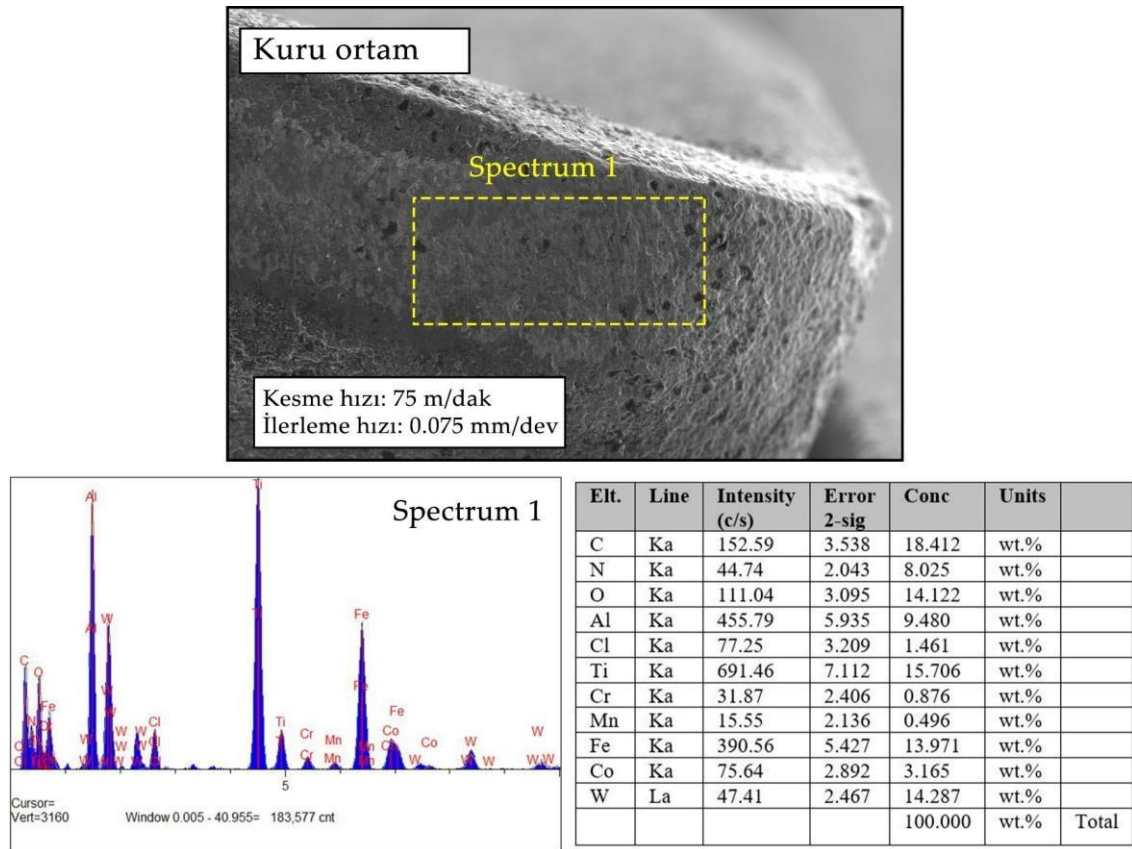
sıcaklık ve artan sürtünme ile doğrudan ilgili olabilmektedir. Çalışmada kullanılan soğutma sıvıları sıcaklıkları azaltmada etkili argümanlardır. Fakat bu çalışmada nanoakışkan soğutma yöntemi ile minimum aşınma değerleri elde edilmiştir. Ayrıca kesme hızlarının artmasıyla takım yan aşınmasının arttığı, ilerleme hızının artmasıyla takım aşınmasının azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçların literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir [145-147].



Şekil 4.6. 75 m/dk kesme hızında, 0,075 mm/dev ilerleme hızında ve farklı kesme ortamlarında kesici takım SEM görüntüleri

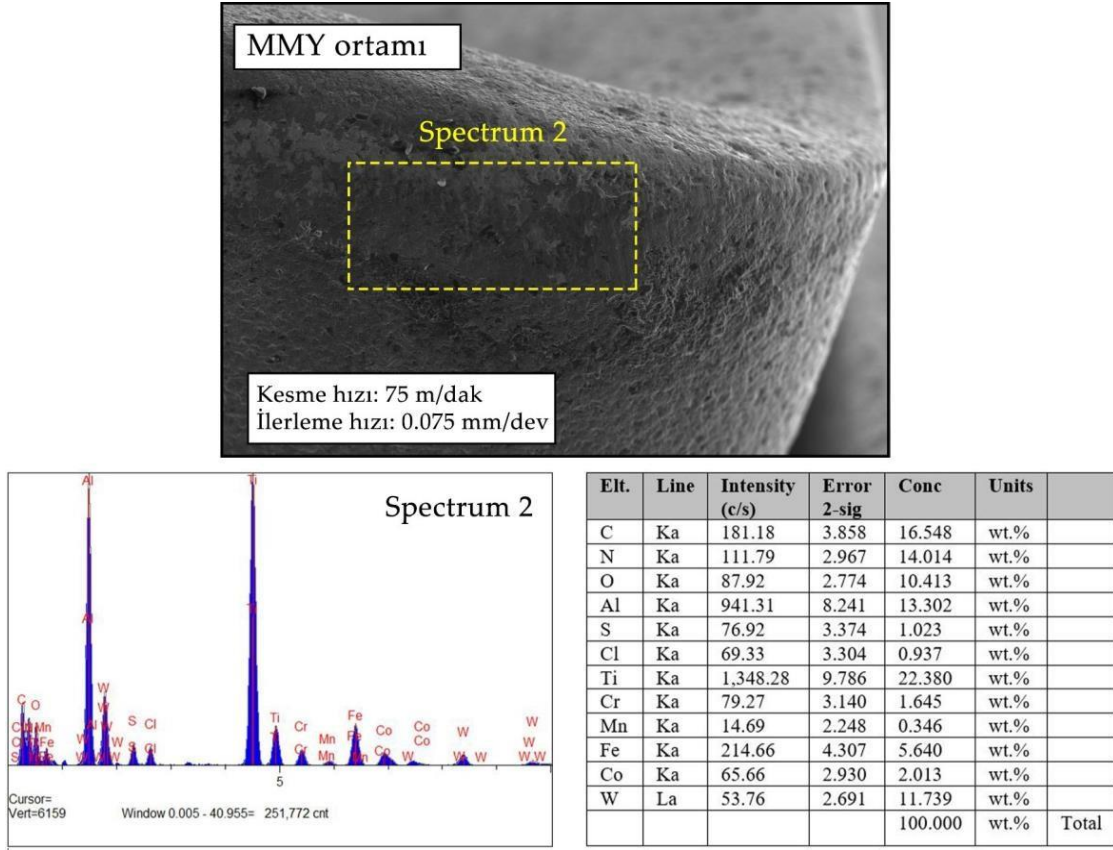
Talaşlı imalat sırasında plastik deformasyon ve kesici takım ile malzeme arasındaki sürtünme nedeniyle takım aşınması meydana gelmektedir [148,149]. Bu aşamada termal, mekanik ve kimyasal özelliklere bağlı olarak farklı yükler aşınma mekanizmalarına etki etmektedir. Bu yükler zamanla kesici takımın farklı bölgelerinde aşınma mekanizmalarını oluşmasına sebep olur [150]. Bu çalışmada meydana gelen aşınma mekanizmaları burun aşınması, kesici takım soyulması ve yapışma olarak sıralanabilir. Şekil 4.6'da 75 m/dk kesme hızında, 0,075 mm/dev ilerleme hızında ve

farklı kesme ortamlarında kesici takım SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerinde aynı kesme ve ilerleme hızlarında kesici takımda meydana gelen aşınma türleri görülmektedir. SEM mikrograflarında tüm kesme ortamlarının kesici takım yüzeyine ciddi zararlar vermediği görülmektedir. SEM görüntülerine göre kuru ortamda çentik aşınması (notch wear) ve yan yüzey aşınması gözlenmiştir. Ayrıca MMY, taşkın soğutma ve nanoakışkan ortamlarında yan aşınma tespit edilmiştir. Aynı kesme hızı ve ilerleme hızlarında en düşük yan aşınma değerinin nanoakışkan ortamında elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.7. Kuru ortamda kullanılan kesici takımın EDS analizi

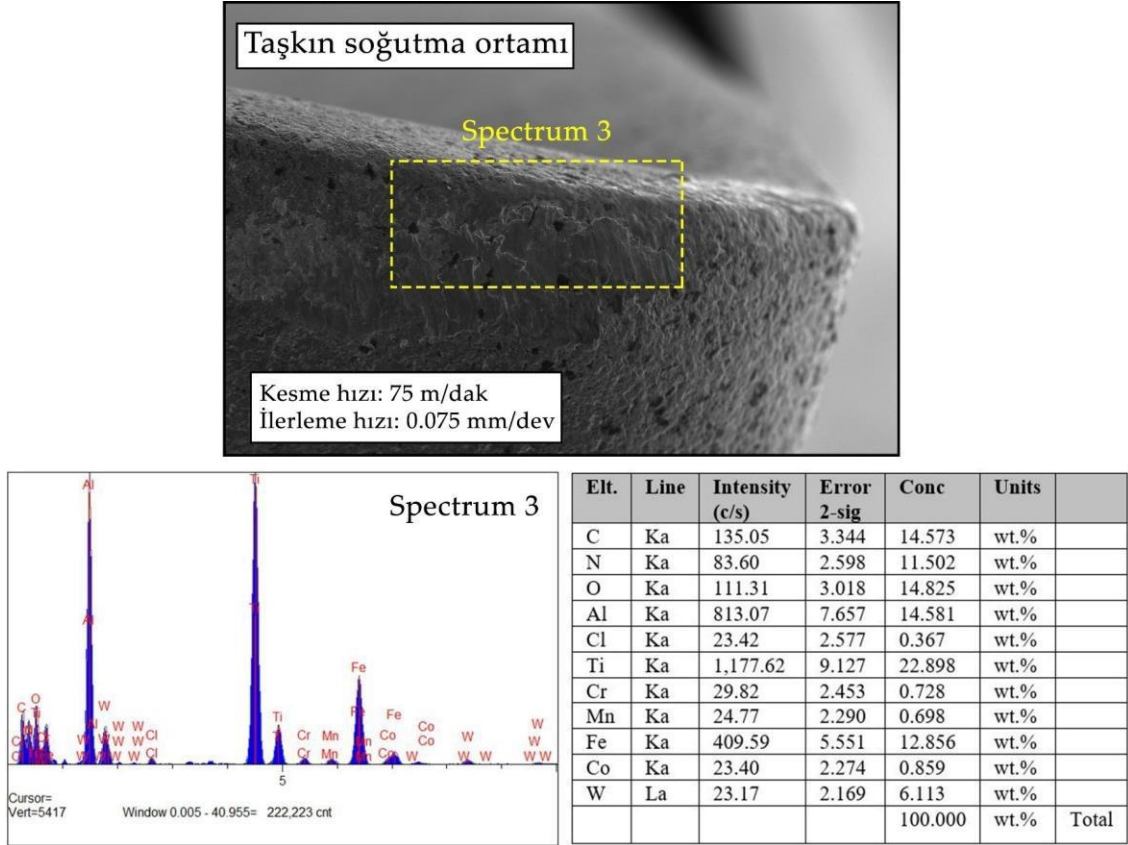
SEM analizinin yanı sıra EDS analizi ile de yapışma ve aşınmanın varlığı tespit edilmektedir. Takım üzerinde iş parçasından bulaşan malzemelerin olup olmadığı vetakım içerisinde yer alan elementlerin tespiti için kesici takımların EDS analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler kuru ortam için Şekil 4.7’de, Minimum miktar yağlama ortamı için Şekil 4.8’de, taşkın soğutma ortamı için Şekil 4.9’de ve nanoakışkan soğutma ortamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan kesici takımlar ise Şekil 4.10’de verilmiştir.



Şekil 4.8. MMY ortamında kullanılan kesici takım EDS analizi

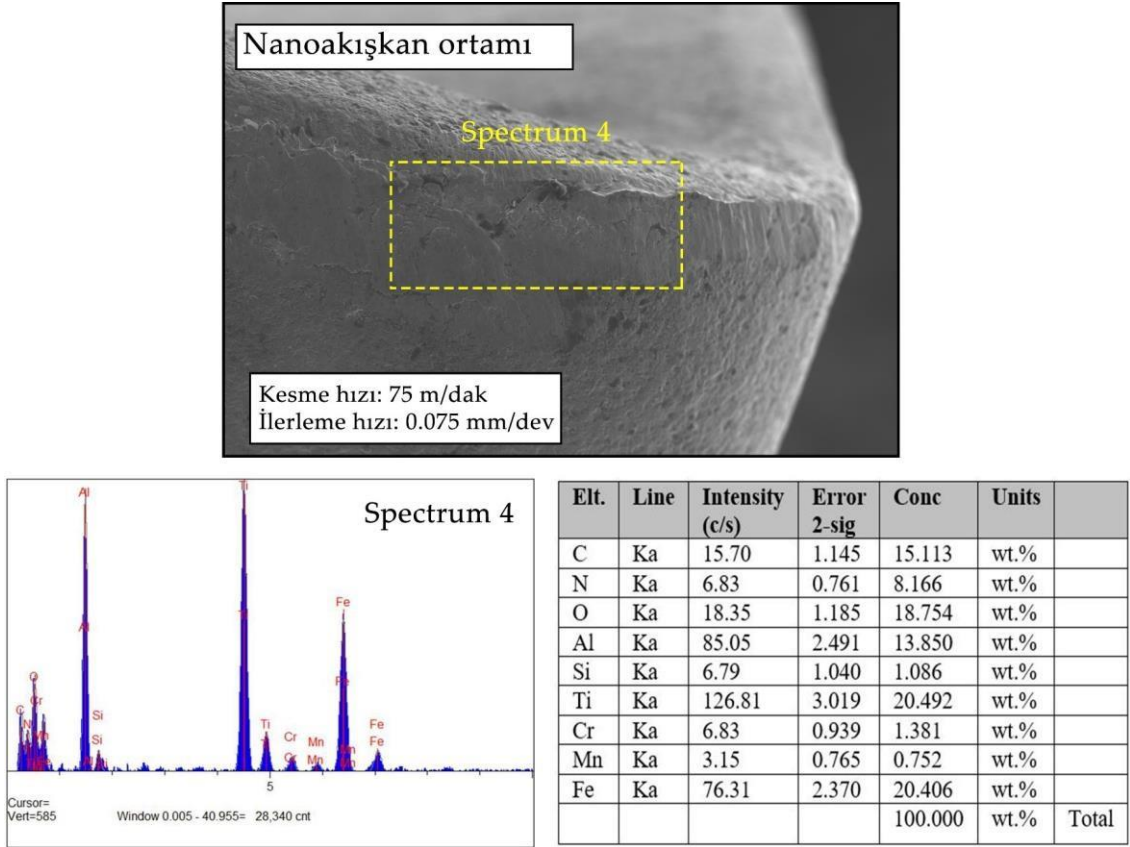
Frezeleme işlemi sırasında kesici takım ile iş parçası arasında yüksek kesme sıcaklıkları nedeniyle kimyasal difüzyona neden olur. Kesme sırasında yüksek sıcaklıklarda meydana gelen plastik deformasyon, malzemeyi talaş akış bölgesinde kararsız hale getirir. Böylece yapışma aşınma mekanizmasına neden olur. Kuru koşullar altında kesici takım üzerinde BUE (Birikmiş kenar) oluşumları tespit edildi. Daha düşük kesme hızlarında yapılan deneylerde BUE oluşumlarının azaldığı belirlendi. EDS analizleri sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde elde edilen element oranları takım içerisinde yer alan elementlerle birlikte iş parçasının içeriği ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kuru ortamda iş parçasının içeriğinde yer alan elementlerin oranı daha yüksek iken diğer soğutma ortamlarında oranların azaldığı görülmüştür. Bu durum takım aşınmalarının ve yapışmaların daha az olduğunu göstermektedir. Bunun nedeninin MMY ve nanoakışkan ortamlarında kesme

sıcaklıklarının ve yüzey aşınmalarının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. BUE kararsız olmasına rağmen kesici takımın kesme kabiliyetini azalttığı ve yüzey pürüzlülük değerlerini arttırdığı bilinmektedir. Bu çalışmada kuru ortamda oluşan yüksek yüzey pürüzlülük değerleri BUE oluşumuna bağlanabilir.

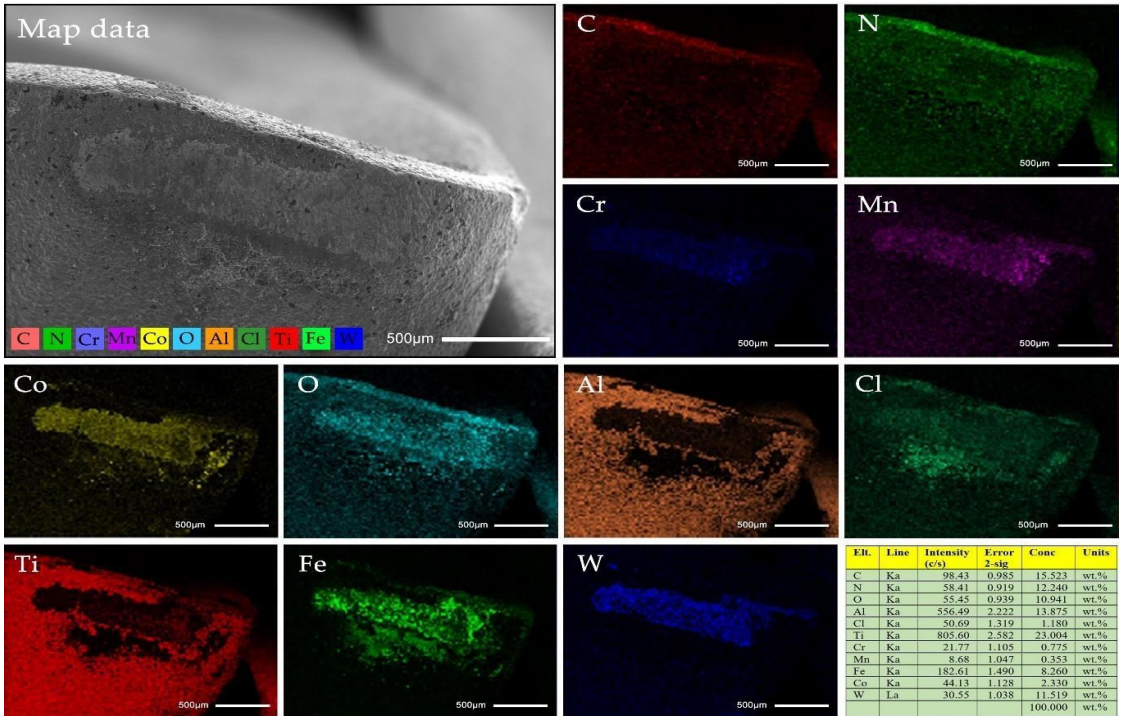


Şekil 4.9. Taşkın soğutma ortamında kullanılan kesici takımın EDS analizi

Şekil 4.11’de kuru ortamda yapılan işleme sonucunda kesici takım haritalama analizi ve geriye saçılmış görüntüler verilmiştir. Şekilde kesici takım genel görünümü, haritalama ve yüzdelik olarak element analizi gösterilmektedir. EDS analizinden anlaşıldığı gibi kuru işlemede kesici takım üzerinden kaplamanın soyulduğu ve soyulan kısımlarda kesici takımın ana elementlerinin varlığı gözlenmiştir.



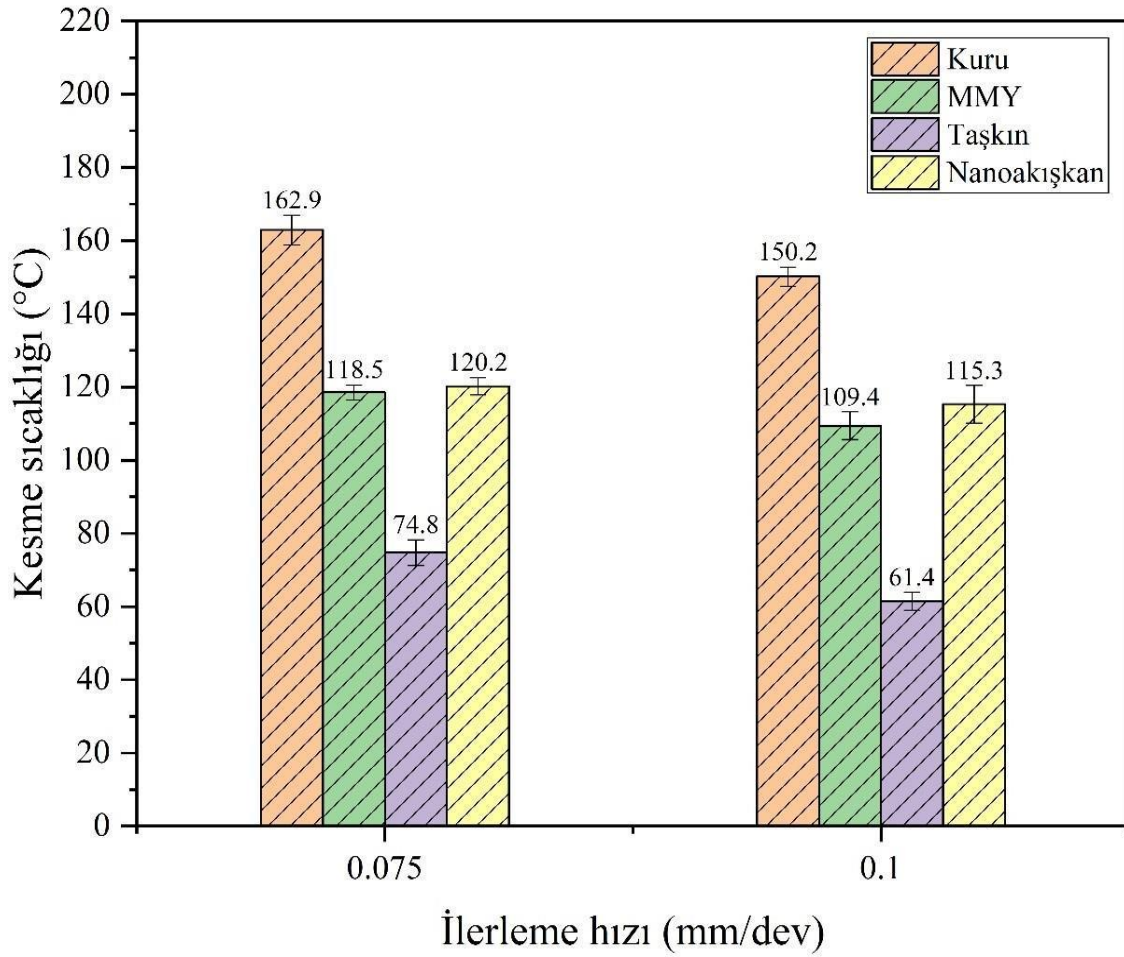
Şekil 4.10. Nanoakışkan ortamında kullanılan kesici takımın EDS analizi



Şekil 4.11. Kuru ortamda kesici takım haritalama analizi

4.3. Kesme Sıcaklıkları Analizleri

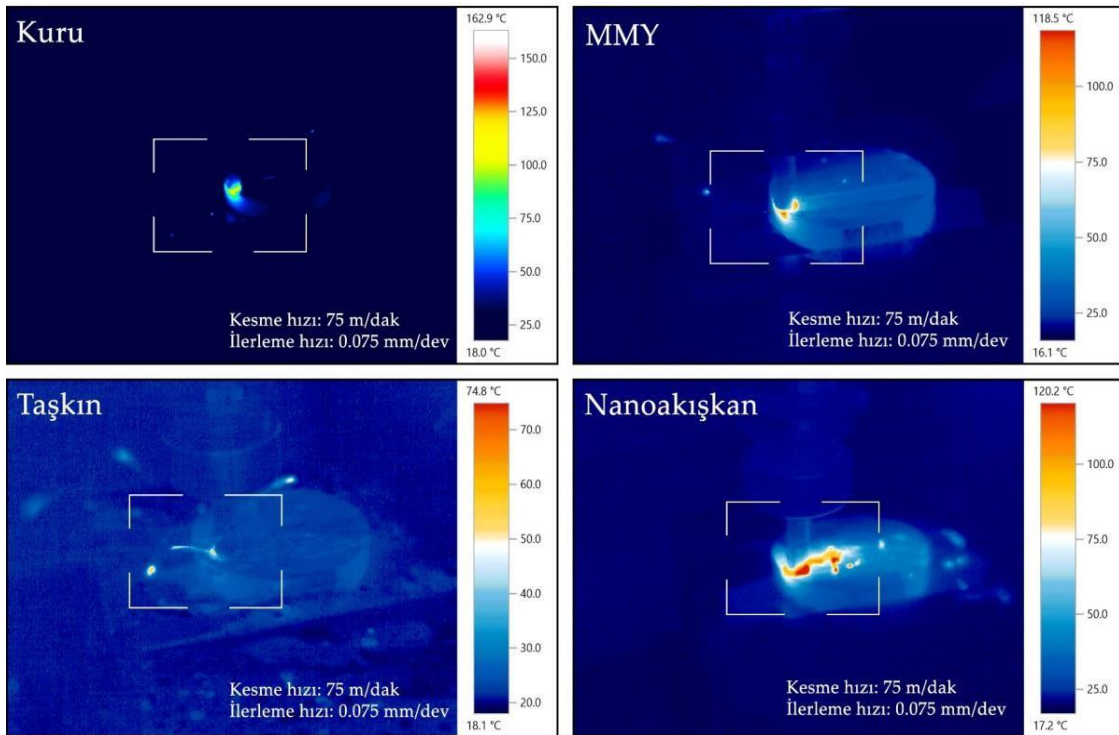
Kesme bölgesindeki sıcaklıklar kesici takımın tribolojik performansını ve boyutsal hassasiyeti direkt olarak etkileyen önemli bir parametredir. Ayrıca kesme bölgesindeki sıcaklıklar iş parçasının yüzey bütünlüğünü üzerinde etkili olabilmektedir [151]. Diğer bir ifade ile kesici takım ile talaş yüzeyi arasında oluşan sıcaklıklar kaliteli bir işleme ve verimlilik için önemlidir. Bu nedenle kesme sırasında oluşan sıcaklıkların analizi detaylı olarak ele alınmalıdır [152].



Şekil 4.12. 75 m/dk kesme hızında farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri

Şekil 4.12’de 75 m/dk kesme hızında farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri gösterilmektedir. 75 m/dk kesme hızında gerçekleştirilen deneyler sonucunda taşkın soğutma ortamının diğer kesme ortamlarına kıyasla daha iyi

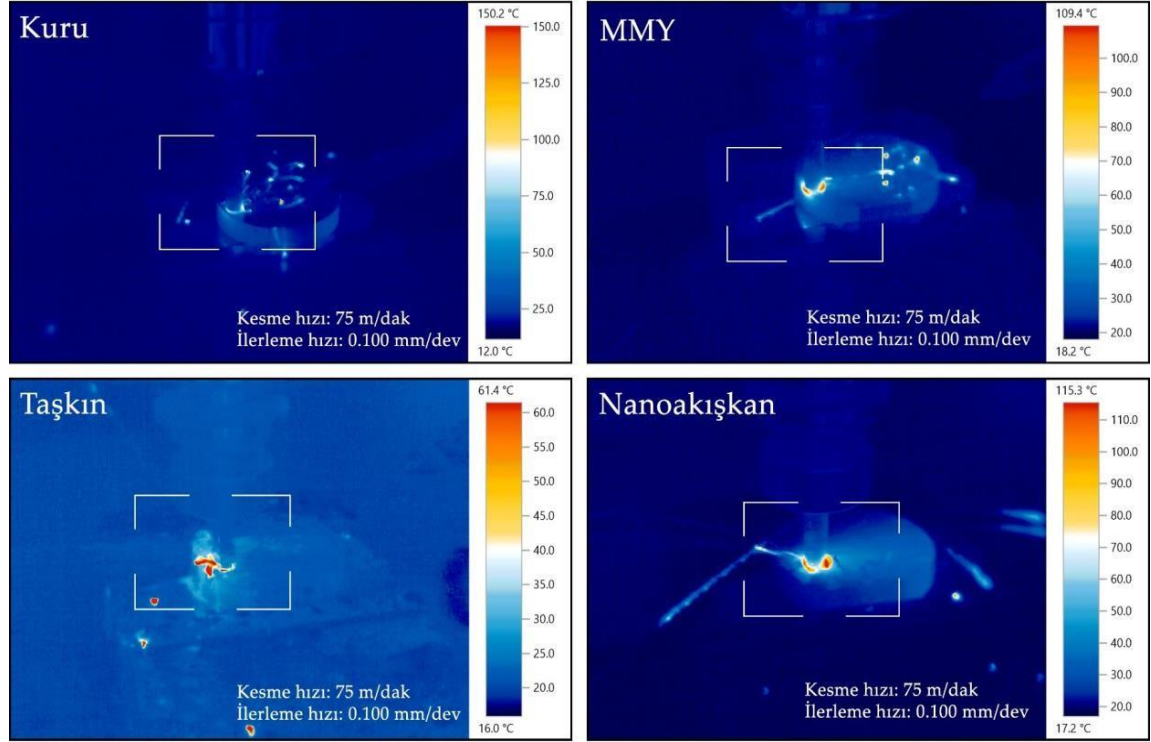
bir soğutma sergilediği tespit edilmiştir. Taşkın soğutma ortamının tüm kesme parametrelerinde daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Ortalama sıcaklıklar baz alındığında kuru ortama kıyasla taşkın soğutma ortamında sıcaklıkların 0,075mm/dev için yaklaşık %54, 0,100 mm/dev için ise yaklaşık %59 oranında azaltıldığı belirlenmiştir. Bu durum kesme bölgesine taşkın soğutma şeklinde gönderilen kesme sıvısının daha fazla soğutma yapmasıyla açıklanabilir. Taşkın soğutma stratejisi kesme hızı, ilerleme hızı, takım geometrisi ve iş parçası gibi birçok parametreye bağlı olarak kesme sıcaklıklarını etkileyebilmektedir.



Şekil 4.13. 75 m/dk kesme hızı ve 0,075mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri

En yüksek kesme sıcaklığı 0,075mm/dev için 162,9 C°, 0.100 mm/dev için ise 150,2 C° ile kuru ortamda oluşmuştur. MMY kullanılması durumunda kuru ortama göre ilerleme hızları için sırasıyla %7,26 ve %27,16 oranında sıcaklıkların azaldığı görülmüştür. Nanoakışkan kullanılması durumunda ise sırasıyla %26,22 ve %23,24 oranında sıcaklıkların azaldığı görülmüştür. MMY ve nanoakışkan ortamlarındaki işlemlerde birbirine oldukça yakın kesme sıcaklıkları oluşmuştur. İlerleme hızı arttıkça tüm

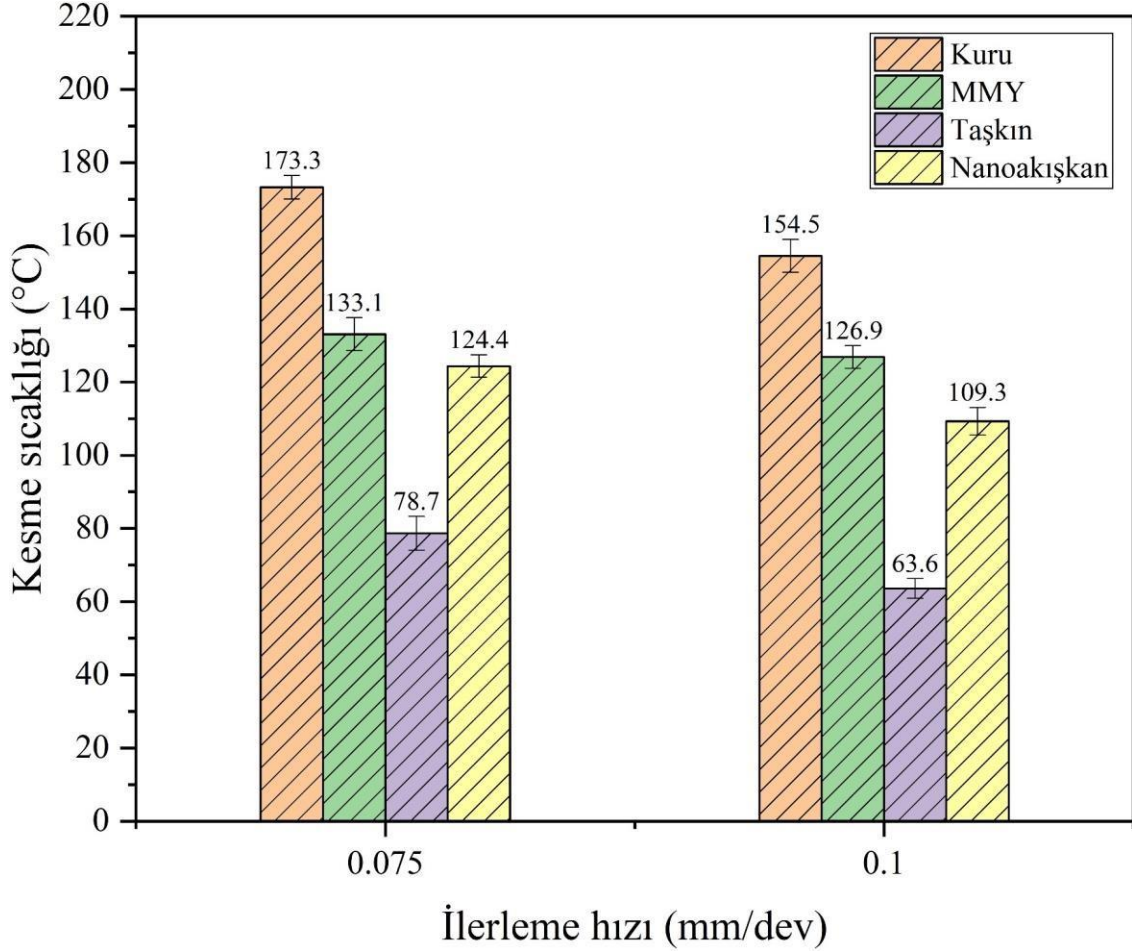
soğutma/yağlama ortamı için kesme sıcaklıklarının azaldığı görülmüştür. 75 m/dk kesme hızında gerçekleştirilen deneyler esnasında çekilen termal kamera görüntüleri şekil 4.13 ve şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. 75 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri

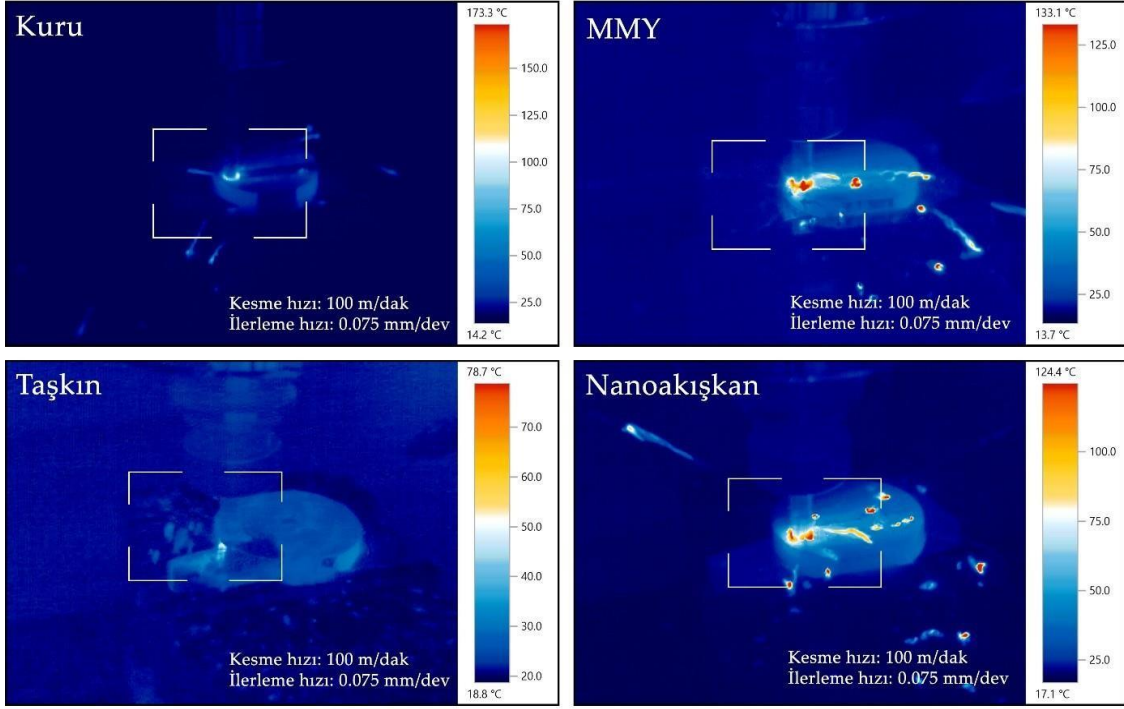
100 m/dk kesme hızında farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini incelemek için elde edilen veriler Şekil 4.15'te verilmiştir. 100 m/dk kesme hızında gerçekleştirilen deneyler incelendiğinde 75 m/dk kesme hızında olduğu gibi taşkın soğutma ortamında diğer soğutma ortamlarına göre daha iyi bir soğutma sağlandığı tespit edilmiştir. Taşkın soğutma ortamının her iki ilerleme hızında dadaha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Ortalama sıcaklıklar dikkate alındığında kuru ortama kıyasla taşkın soğutma ortamında sıcaklıkların 0,075 mm/dev ilerleme hızı için yaklaşık %55 oranında, 0,100 mm/dev ilerleme hızı için ise yaklaşık %59 oranında azaldığı görülmüştür. En yüksek kesme sıcaklığı ise 0,075 mm/dev ve 0,100 mm/dev ilerleme hızları için sırası ile 173,3 C° ve 154,5 C° olarak kuru ortamda ölçülmüştür. MMY ve nanoakışkan kullanılması durumunda ise kuru ortama göre 0,075 mm/dev ilerleme hızı

için sırasıyla %23,2 ve %28,2 oranında, 0,100 mm/dev ilerleme hızı için ise sırasıyla % 17,9 ve % 29,26 oranında sıcaklıkların azaldığı görülmüştür.

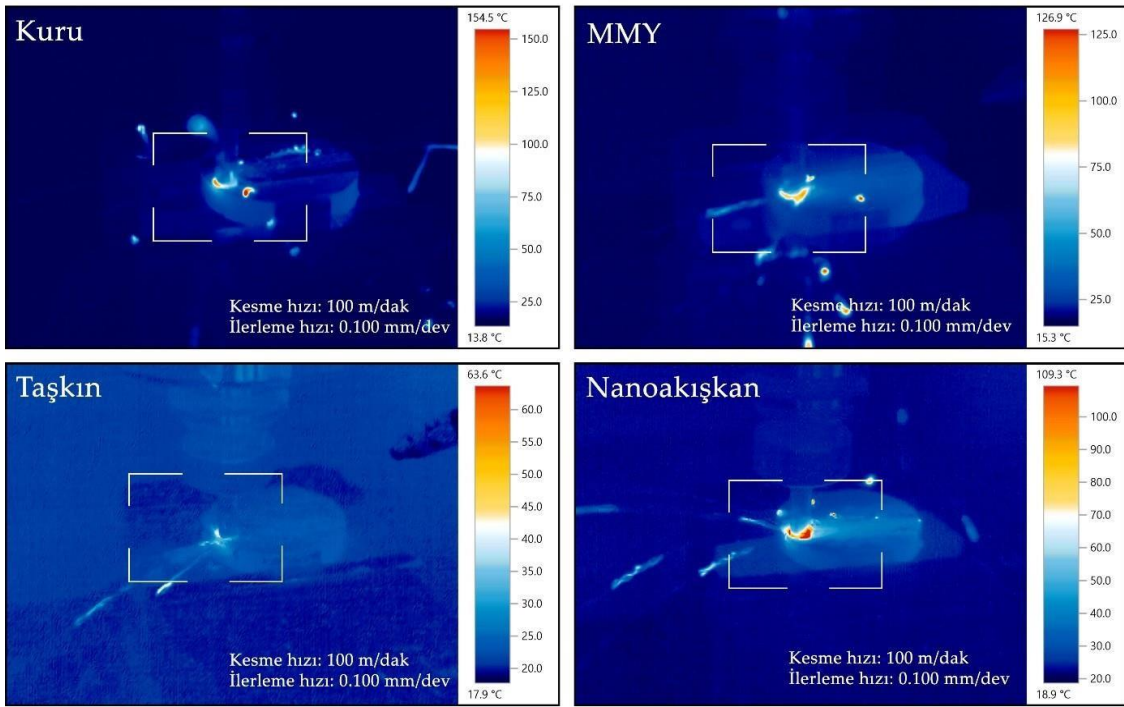


Şekil 4.15. 75 m/dk kesme hızında farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri

Kesme hızı açısından değerlendirildiğinde düşük hızlarda yüksek hızlara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. İlerleme hızı açısından bakıldığında düşük ilerleme hızına kıyasla yüksek ilerleme hızında daha düşük kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Kesici takım ile talaş yüzeyi arasındaki sıcaklıklar kontrol edilerek etkili bir soğutma sağlanabilir [153]. En düşük kesme sıcaklığı (61,4 °C) 75 m/dk kesme hızında, 0,100 mm/dev ilerleme hızında ve taşkın soğutma ortamında elde edilmiştir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de 100 m/dk kesme hızında gerçekleştirilen deneyler esnasında çekilen termal kamera görüntüleri görülmektedir.



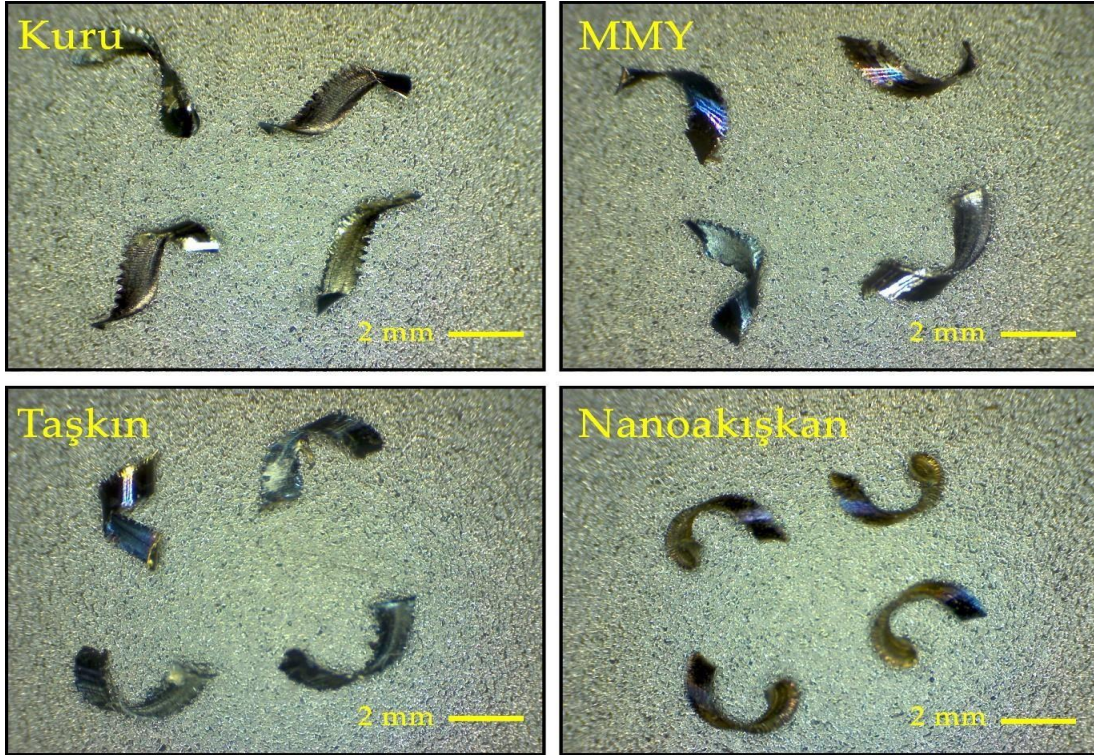
Şekil 4.16. 100 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri



Şekil 4.17. 100 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için işleme sırasında çekilen termal kamera görüntüleri

4.4. Talaş Morfolojisi

Frezelemede talaş morfolojisi, işleme sürecinde oluşan talaşların şekil, boyut, tür ve yapısını tanımlar. Talaş morfolojisi, iş parçası malzemesi, kesici takım özellikleri, kesme parametreleri ve soğutma sıvısının kullanımı gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Kesme ortamındaki yüksek sıcaklıkların dışarıya atılmasına talaşlarında yardımcı olduğu düşünülmektedir. Talaş morfolojisi, işleme sürecinin verimliliğini, yüzey kalitesini ve takım aşınmasını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Kesme hızı ve ilerleme hızının kesme sıcaklığını etkilemesi nedeni ile farklı talaş tiplerinin oluşumuna sebep olabilmektedir. Talaş morfolojisi, iyi yüzey kalitesi, optimum takım aşınması ve titreşim gibi birçok işlenebilirlik parametresiyle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca ortaya çıkan talaşların geometrisi, rengi ve boyutu işleme performansı için önemli bilgiler vermektedir [154]. Daha iyi yüzey kalitesi ve daha temiz işleme açısından talaşların tüm işleme boyunca kısa kırılma ile kesme bölgesinden daha kolay dışarı atılması beklenmektedir [155,129]. Şekil 4.18’de farklı soğutma/yağlama koşullarında 75 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için oluşan talaş türlerini göstermektedir.



Şekil 4.18. 75 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri

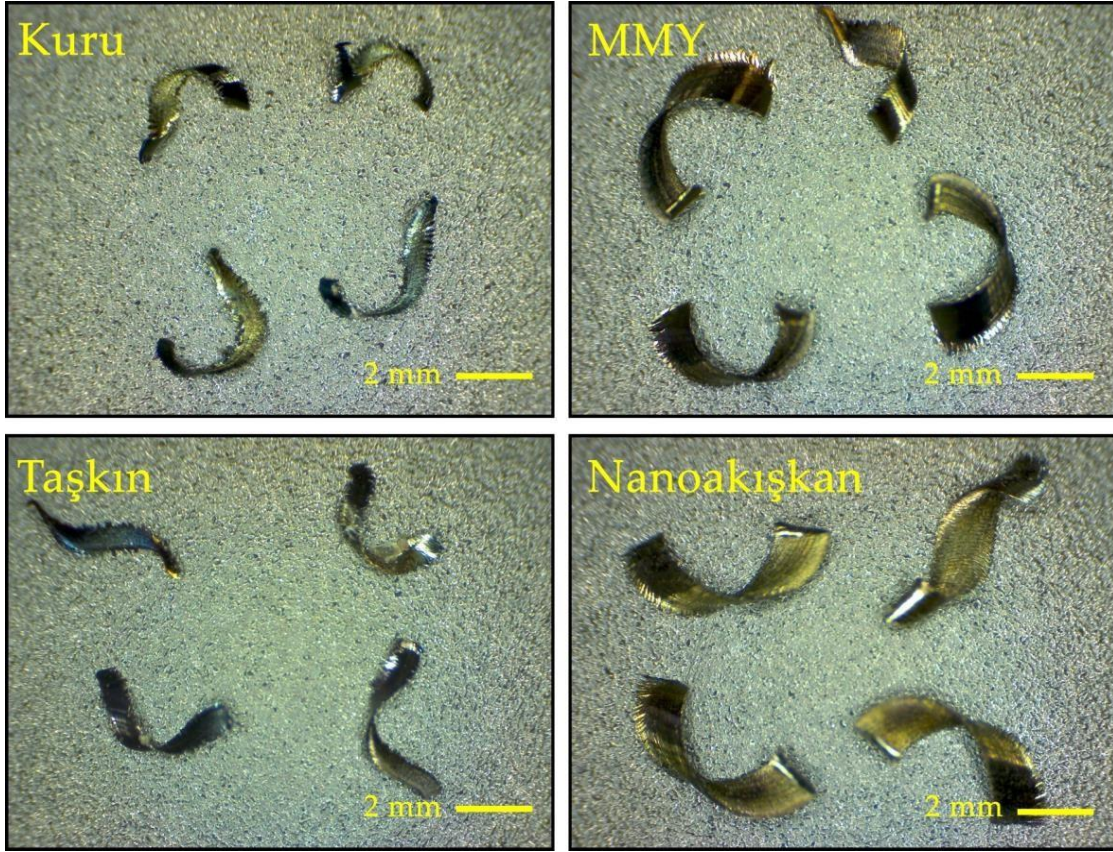
75 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen talaş morfolojileri soğutma/yağlama koşulları açısından incelendiğinde kuru ortamda oluşan talaşların daha kıvrımlı ve daha tırtıklı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Tırtıklar arasındaki mesafelerinde yüksek ve düzensiz olduğu görülmektedir. Kuru işleme koşullarında daha yüksek ısı üretiminden dolayı malzemenin yumuşaması nedeniyle kıvrımlı, sürekli ve düzensiz talaşlar oluşabilmektedir. Ayrıca soğutmanın olmaması talaş takımının temas uzunluğunu ve sürtünmesini arttırır ve kuru işlemede düzensiz talaşlara neden olur [129].

Kuru ortam yerine soğutma/yağlama ortamlarının kullanılması talaş morfolojisini iyileştirmiş ve “C” tipi talaş formlarının oluşumu artmıştır. CNC frezeleme sırasında talaşların belli bir uzunluğa ulaştıktan sonra c tipi talaşlar halinde bükülüp kırılması istenen bir durumdur. MMY ve nanoakışkan ortamlarında elde edilen talaşların kuru ortamdakilere göre daha düzenli ve daha az tırtıklı olduğu, tırtıklar arasındaki mesafelerine ise daha az olduğu görülmüştür. Nanoakışkan ortamlarında elde edilen talaşların MMY ve taşkın soğutma ortamlarına göre daha düzgün ve istenen bir talaş formu olan “C” tipi talaş formuna daha yakın olduğu görülmüştür. Talaşların kesme yüzeyleri incelendiğinde MMY ve Nanoakışkan ortamlarında yüzeylerin daha düzgün olduğu ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ile uyum gösterdiği görülmüştü



Şekil 4.19. 75 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri

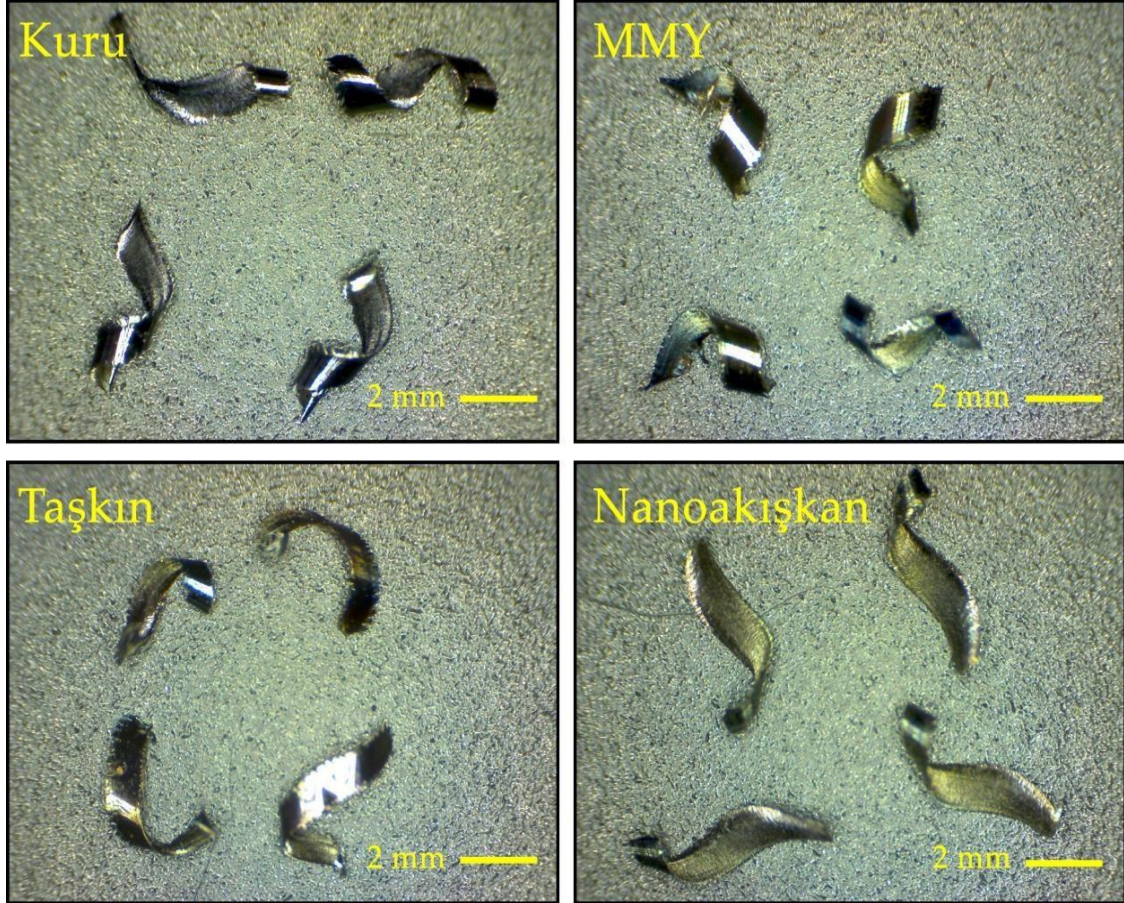
75 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri Şekil 4.19’da görülmektedir. Sonuçlar soğutma/yağlama koşulları açısından incelendiğinde kuru ortamda oluşan talaşların benzer şekilde daha düzensiz ve tırtıklı bir yapıda iken nanoakışkan ortamında gerçekleştirilen işlemlerde daha az tırtıklı ve daha düzgün talaşların oluştuğu gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerinde olduğu gibi talaş yüzeyleri açısından da nanoakışkan ortamdaki talaşların yüzey kalitelerinin iyi olduğu görülmüştür. İlerleme hızı açısından incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça talaş boylarında uzama olduğu ve buna bağlı olarak kıvrılmaların arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20. 100 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri

Daha yüksek kesme hızları için şekil 4.20’de verilen 100 m/dk kesme hızı ve 0,075 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri incelendiğinde ilerleme hızı sabit bırakılıp kesme hızı arttıkça kuru ortamda talaş kesitlerinin azaldığı ancak düzensiz ve tırtıklı talaş formunun devam ettiği görülmüştür. Talaş-takım ara yüzündeki yüksek sürtünme ve plastik deformasyon nedeni ile kuru işleme altında maksimum tırtıllara sahip talaşlar oluşmuştur. MMY ve nanoakışkan ortamlarında ise daha geniş kesitli talaşların oluştuğu gözlenmiştir. Bu durumun, MMY ve nanoakışkan altında işleme bölgesinden artan ısı transferi ve talaş- takım ara yüzünde daha düşük sürtünme etkisi ile oluştuğu düşünülmektedir. Bu ortamlarda elde edilen talaş formları da “C” talaş formuna oldukça yakın ve düşük kesme hızlarına göre iyi formlarda olduğu görülmüştür. MMY ve nanoakışkan ortamlarında işleme, talaş takımı temas alanları arasındaki azalmayı sağlar. MMY ve nanoakışkan uygulanmasının talaş-takım ara yüzündeki sürtünmenin kontrol edilmesinde önemli bir role sahip olduğu fark edilmiştir. Nanoakışkan ortamında daha düşük kıvrılma yarıçapına

sahip talaşların oluşumu nanoakışkan uygulamasıyla yağlama kalitesinin geliştirildiğinin bir kanıtıdır. Bu aynı zamanda MMY ve nanoakışkan ile daha iyi penetrasyon ve yağlama sağlayan, düşük kıvrılma yarıçapına sahip talaşlar formundaki önceki çalışmalar tarafından bildirilen sonuçlarla da uyumludur [156,157].



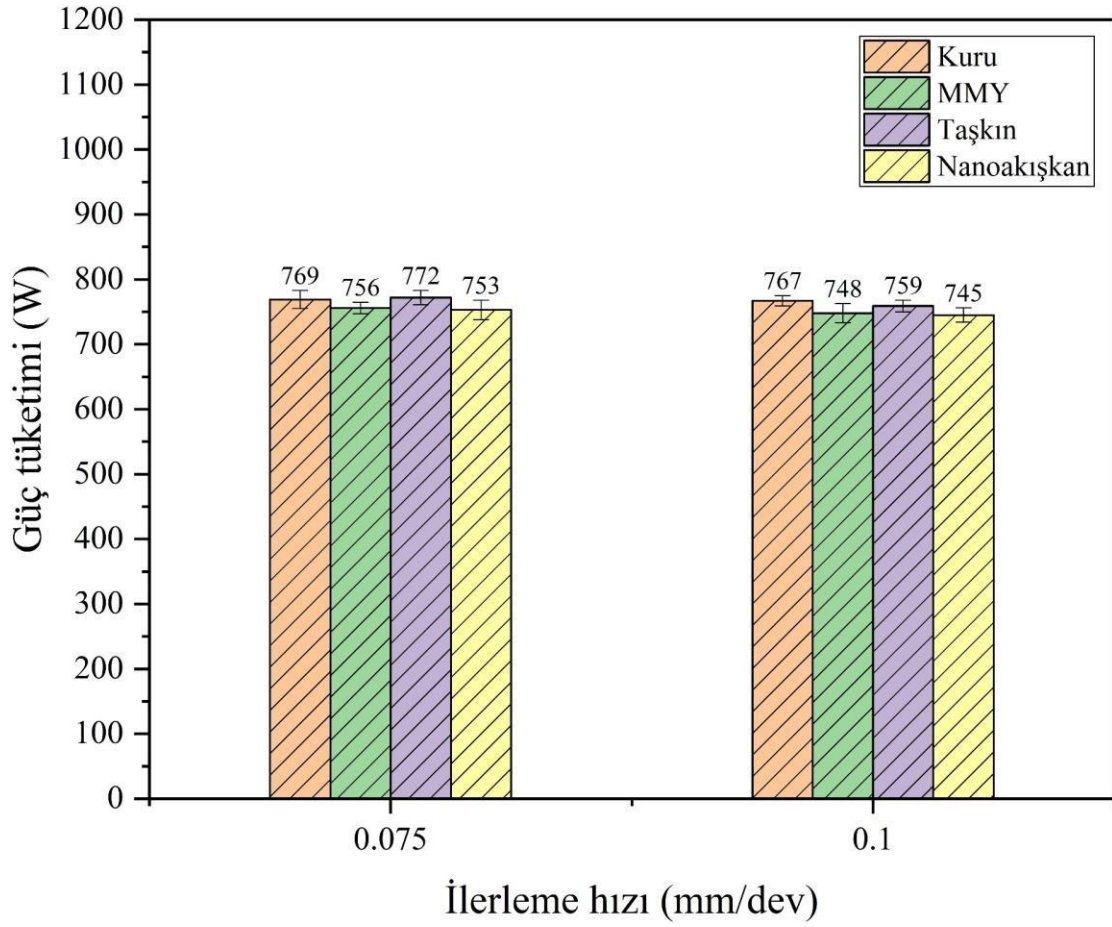
Şekil 4.21. 100 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı için farklı soğutma/yağlama ortamlarında elde edilen talaş morfolojileri

100 m/dk kesme hızı ve 0,100 mm/dev ilerleme hızı ile en yüksek kesme ve ilerleme hızlarında elde edilen talaş yapıları Şekil 4.21'de verilmiştir. Talaş morfolojileri incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça talaş boylarının uzadığı görülmüştür. Bu uzamaya bağlı olarak kıvrılmalarda artış olmuştur. İlerleme hızındaki artış kuru ortamda talaş kesitini de artırmıştır. Diğer kesme parametrelerinde olduğu gibi bu kesme ve ilerleme hızlarında da MMY ve nanoakışkan ortamlarında elde edilen talaşların daha iyi olduğu görülmüştür. MMY ve nanoakışkan sıvıları kesme bölgesine yüksek basınçla gönderildiği için oluşan yüksek basınçlı sis bulutu sayesinde talaş kaldırma işlemi kolaylaşmaktadır.

Bunun yanı sıra nanoakışkan kullanımında toz halindeki yağ parçacıkları, kesici takım ile talaş yüzeyi arasında ince bir film oluşturarak talaşların çıkarılmasına yardımcı olur. Kuru işlemede soğutma eksikliğinden kaynaklanan durum nedeniyle kesme bölgesinde yüksek ısı ve sürtünme oluşabilmektedir. Bu nedenle kuru işleme sonucu elde edilen talaş türlerinin düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak Nanoakışkan soğutma tekniği kullanılması talaşlı imalatta daha uygun talaş türleri elde edilebilmektedir. Üstün soğutma ve yağlama koşulları sayesinde talaş oluşum kalitesi artmış ve buna bağlı olarak talaşlardan etkilenen diğer işlenebilirlik ölçütlerine önemli avantajlar sağladığı görülmüştür.

4.5. Güç Tüketimi Analizleri

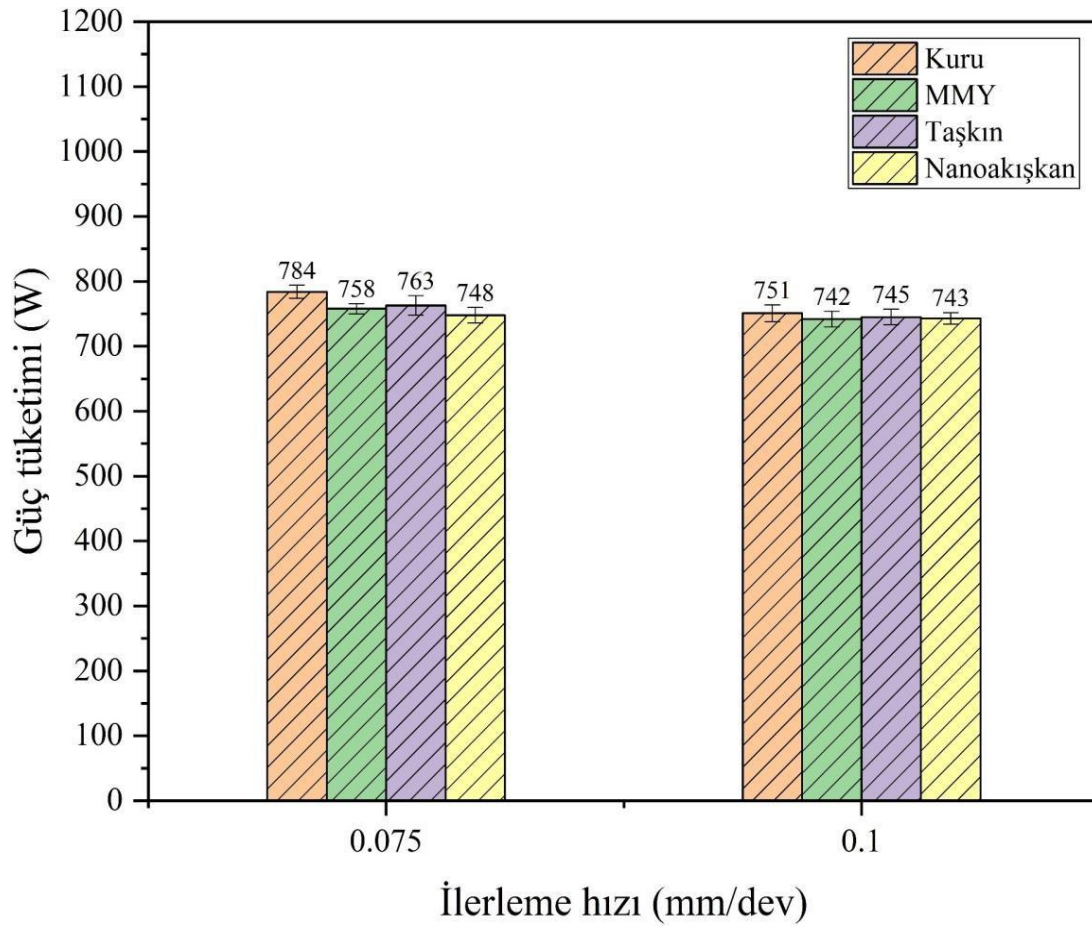
Temel imalat işlemleri sırasında işleme süreçlerinde enerji tüketimi gerçekleşmektedir [158]. İmalat sektörünün önemli ajanlarından biri olan talaşlı imalat ekonominin gelişmesinde önemli katkılar sağlamıştır. Talaşlı imalat sektöründe kesici takım, soğutma/yağlama teknikleri ve kesme parametreleri gibi birçok faktör üzerinde araştırmalar yapılmıştır [159,160]. Bu araştırmalar yapılırken hem ekonomik hem de çevre dostu bir proses oluşturmak için yoğun çaba sarf edilmiştir. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak kesici takımlarda kesme hızları önemli ölçüde artmaktadır. Böylece takım talaş ara yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklıklar maliyeti yüksek kesici takımların ömrünü azaltmakta ve iş parçasının yüzey kalitesini etkilemektedir. Bu durum metal işleme sektöründe kaynak ve ürün kaybına neden olmaktadır. Metal kesme endüstrisinde çeliklerin işlenmesi sırasında soğutma sıvılarının kullanılmasıyla yüzey kalitesi ve kesici takım ömrü artırılabilir. Fakat günümüzde çoğunlukla kullanılan petrol kökenli kesme sıvıları hem ekonomik açıdan hem de insan sağlığı açısından telafisi mümkün olmayan sorunlara yol açabilmektedir. Bu bölümde farklı kesme sıvıları ve farklı kesme parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 75 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme ve farklı soğutma/yağlama ortamlarındaki güç tüketimleri Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. 75 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının güç tüketimi üzerindeki etkileri

75 m/dk kesme hızı baz alındığında, kuru ortama ve taşkın soğutma ortamına nazaran minimum miktar yağlama ve nanoakışkan ortamlarında güç tüketimlerinin azaldığı görülmüştür. Kuru ortama kıyasla nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızları için güç tüketiminde sırasıyla yaklaşık %2 ve %3 oranında iyileşme kaydedilmiştir. İlerleme hızı arttıkça genel olarak güç tüketimlerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 6.23’de ise 100 m/dk kesme hızına ait güç tüketimlerinin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. 100 m/dk kesme hızı baz alındığında, kuru ortama nazaran nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında güç tüketiminde sırasıyla yaklaşık %4,6 ve %1 oranında iyileşme kaydedilmiştir. En düşük güç tüketimi değeri (743W) 100 m/dk kesme hızında, 0,100 mm/dev ilerleme hızında ve nanoakışkan ortamında elde edilmiştir. Kesme hızları açısından bakıldığında artan kesme hızları güç tüketiminin azalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde ilerleme hızının artmasıyla güç tüketimi azalma eğilimindedir.

Tüm kesme parametrelerinde güç tüketimi için en iyi soğutma ortamı nanoakışkan olarak tespit edilmiştir. Makhesana et al. [129] nikel tabanlı süper alaşımların işlenmesi sırasında MoS₂ ve grafit takviyeli nanoakışkanları kesme sıvısı olarak kullanmışlardır. Sonuç olarak MoS₂ katkılı nanoakışkanın güç tüketimini azalttığını rapor etmişlerdir. Usca [146] tarafından yapılan bir çalışmada Selüloz nanokristal esaslı nanoakışkan kesme sıvısının Dillimax 690T'nin işlenmesi sırasında soğutma sıvısı olarak kullanıldığı bildirilmiştir. Bu çalışmada, kesme ve ilerleme hızındaki artışın güç tüketimini azalttığını rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, çalışmamızda elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.



Şekil 4.23. 100 m/dk kesme hızı için farklı ilerleme hızı ve kesme ortamlarının güç tüketimi üzerindeki etkileri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, Molibden Katkılı Nano-Akışkan Soğutma Sıvısının AISI 5140 Çeliğinin frezelenme performansına etkileri araştırılmış ve İşleme performansı farklı soğutma/yağlama sıvıları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada iki farklı kesme hızı, iki farklı ilerleme hızı ve dört farklı soğutma yağlama koşulları için imalat sanayisinde kullanılan AISI 5140 çeliğinin takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, talaş morfolojileri ve enerji tüketimi gibi çıktı parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 75 m/dk kesme hızı için kuru ortama nazaran nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla yaklaşık %36,7 ve %34 oranında iyileşme kaydedildiği görülmüştür.
- İlerleme hızı açısından yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde 75 m/dk kesme hızı için ilerleme hızı arttıkça dört soğutma ortamında da yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür.
- 100 m/dk kesme hızı için Kuru ortama nazaran nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla yüzey pürüzlülüğünde yaklaşık %27,7 ve %35,4 oranında iyileşme kaydedilmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü için en iyi ortamın nanoakışkan olduğu tespit edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü (0,684 μm) 100 m/dk kesme hızında, 0,075 mm/dev ilerleme hızında ve nanoakışkan ortamında elde edilmiştir.
- 75 m/dk kesme hızı için kuru ortama kıyasla nanoakışkan ortamında 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında yan aşınmada sırasıyla yaklaşık %24 ve %27 oranında iyileşme kaydedilmiştir. İlerleme hızı açısından incelendiğinde her bir

soğutma/yağlama ortamında ilerleme hızı arttıkça genel olarak takım aşınması azalmaktadır.

- 100 m/dk kesme hızı için nanoakışkan ortamında kuru ortama kıyasla 0,075 ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında takım aşınmasında sırasıyla yaklaşık %26 ve %22 oranında iyileşme kaydedilmiştir.
- Diğer ortamlarla kıyaslandığında nanoakışkan ortamının takım aşınmasını azalttığı gözlenmektedir. En düşük takım aşınma değeri (0,301 mm) 75 m/dk kesme hızında, 0,100 mm/dev ilerleme hızında ve nanoakışkan ortamında elde edilmiştir.
- En yüksek kesme sıcaklığı 100 m/dk kesme hızı için 0,075 mm/dev ve 0,100 mm/dev ilerleme hızlarında sırası ile 173,3 C° ve 154,5 C° olarak kuru ortamda ölçülmüştür.
- MMY ve nanoakışkan kullanılması durumunda ise kuru ortama göre 0,075 mm/dev ilerleme hızı için sırasıyla %23,2 ve %28,2 oranında, 0,100 mm/dev ilerleme hızı için ise sırasıyla %17,9 ve %29,26 oranında sıcaklıkların azaldığı görülmüştür.
- Ortalama sıcaklıklar baz alındığında kuru ortama kıyasla taşkın soğutma ortamında sıcaklıkların yaklaşık %56,5 oranında azaltıldığı belirlenmiştir. En düşük kesme sıcaklığı (61,4 °C) 75 m/dk kesme hızında, 0,100 mm/dev ilerleme hızında ve taşkın soğutma ortamında elde edilmiştir.
- Kuru ortam yerine soğutma/yağlama ortamlarının kullanılması talaş morfolojisini iyileştirmiştir. Nanoakışkan ortamlarında elde edilen talaşların kuru ortamdakilere göre daha düzenli ve daha az tırtıklı olduğu, tırtıklar arasındaki mesafelerin ise daha az olduğu görülmüştür. Nanoakışkan ortamlarında elde edilen talaşların MMY ve taşkın soğutma ortamlarına göre daha düzgün ve istenen bir talaş formu olan “C” tipi talaş formuna daha yakın olduğu görülmüştür. Talaş morfolojisi açısından en iyi talaş formu 100 m/dk kesme hızı, 0,075 mm/dev ilerleme hızı ve nanoakışkan ortamında elde edilmiştir.

- Tüm kesme parametrelerinde güç tüketimi için en iyi soğutma ortamı nanoakışkan olarak tespit edilmiştir. En düşük güç tüketimi değeri (743W) 100 m/dk kesme hızında, 0.100 mm/dev ilerleme hızında ve nanoakışkan ortamında elde edilmiştir. Kesme hızları açısından bakıldığında artan kesme hızları güç tüketiminin azalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde ilerleme hızının artmasıyla güç tüketimi azalma eğilimindedir.

5.2. Öneriler

Molibden katkılı nano-akışkan soğutma sıvısının AISI 5140 çeliğinin frezelenme performansına etkilerinin araştırılması ve işleme performansının farklı soğutma/yağlama sıvıları ile karşılaştırılması üzerine yapılan bu çalışmanın sonucunda ilerleyen süreçte yapılabilecek araştırma önerileri aşağıda belirtilmiştir.

- Nano-akışkan içerisindeki farklı molibden katkı oranının AISI 5140 çeliğinin işlenebilirlik performansları üzerindeki etkileri incelenebilir.
- AISI 5140 çeliğinin aynı koşullar altında frezelenmesinde kesme derinliğinin etkisi ve nanoakışkanın uygulama mesafesi ve uygulama miktarının etkisi araştırılabilir.
- AISI 5140 çeliğinin molibden katkılı nano-akışkan soğutma ortamındaki tornalama ve delme gibi farklı işleme yöntemlerindeki performansları araştırılabilir.
- AISI 5140 çeliğinin farklı nanopartikül ve akışkan içeriğine sahip nano-akışkan soğutma koşullarındaki frezeleme performanslarının araştırılması yapılabilir.
- Farklı malzemelerin molibden katkılı nano-akışkan soğutma ortamındaki işlenebilirlik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Degirmenci U, Erturk AS, Yurtalan MB, Kirca M Tensile behavior of nanoporous polyethylene reinforced with carbon-based nanostructures. *Computational Materials Science* 2021; (186): 109971
- [2] Şirin Ş, Sarıkaya M, Yıldırım ÇV, Kıvak T Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL. *Tribology International* 2021; (153): 106673
- [3] Değirmenci Ü (2023). Mechanical and tribological behavior of a hybrid WC and Al₂O₃ reinforced Al-4Gr composite. 2021; (65): 1416-1436
- [4] Degirmenci U, Yildiz YO Examination of mechanical behaviour of fullerene doped aluminium matrix composite produced by sintering process. *Materials Today Communications*. 2024; (38): 107916
- [5] Değirmenci Ü, Usca ÜA, Şap S Machining characterization and optimization under different cooling/lubrication conditions of Al-4Gr hybrid composites fabricated by vacuum sintering. *Vacuum*. 2023; (208): 111741
- [6] Fernando WLR, Karunathilake HP, Gamage JR Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021; (3): 100100
- [7] Usca ÜA, Şap S, Uzun M, Değirmenci Ü Assessment of the machinability and energy consumption characteristics of Cu-6Gr hybrid composites under sustainable operating. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024; (46): 221
- [8] Ryabchikov A, Sivin D, Ananin P, Ivanova A, Lopatin I, Korneva O, Shevelev A High intensity, low ion energy implantation of nitrogen in AISI 5140 alloy steel. *Surface and Coatings Technology*. 2018; (355): 129-135
- [9] Kuntoğlu M, Acar O, Gupta MK, Sağlam H, Sarıkaya M, Giasin K, Pimenov DY Parametric Optimization for Cutting Forces and Material Removal Rate in the Turning of AISI 5140. *Machines*. 2021; (9):

- [10] Gao K, Qin X, Wang Z, Zhu S Effect of spot continual induction hardening on the microstructure of steels: Comparison between AISI 1045 and 5140 steels. *Materials Science and Engineering: A* 2016; (651): 535-547
- [11] Kuntoğlu M, Aslan A, Sağlam H, Pimenov DY, Giasin K, Mikolajczyk T Optimization and Analysis of Surface Roughness, Flank Wear and 5 Different Sensorial Data via Tool Condition Monitoring System in Turning of AISI 5140. *Sensors*. 2020; (20): 4377
- [12] Sepet H, Tarakcioglu N, Misra RDK Investigation of mechanical, thermal and surface properties of nanoclay/HDPE nanocomposites produced industrially by melt mixing approach. *Journal of Composite Materials*. 2015; (50): 3105-3116
- [13] Sepet H, Tarakcioglu N, Misra RDK Effect of inorganic nanofillers on the impact behavior and fracture probability of industrial high-density polyethylene nanocomposite. *Journal of Composite Materials*. 2017; (52): 2431-2442
- [14] Aslan A, Salur E, Gunes A, Sahin OS, Karadag HB, Akdemir A The mechanical properties of composite materials recycled from waste metallic chips under different pressures. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019; (16): 5259-5266
- [15] Usca ÜA, Şap S, Uzun M Evaluation of Machinability of Cu Matrix Composite Materials by Computer Numerical Control Milling under Cryogenic LN2 and Minimum Quantity Lubrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023; (32): 2417-2431
- [16] Gerardi D, Marlin TE, Swartz CLE Optimization of Primary Steelmaking Purchasing and Operation under Raw Material Uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013; (52): 12383-12398
- [17] Kayadelen M, *Scientific Mining Journal*. 1976; (15): 39-47
- [18] Ersöz F, Ersöz T, Erkmn İN Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi. 2016; (32): 0-0
- [19] Tisza M, Czinege I Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2018; (1): 229-238
- [20] Ersöz T, Düğenci M, Ünver M, Eyiol B Demir Çelik Sektörüne Genel Bir Bakış ve Beş Milyon Ton Üstü Demir Çelik İhracatı Yapan Ülkelerin Kümeleme Analizi ile İncelenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2016; (4): 75-90

- [21] Subaşı S, Çullu M. Demir Cevheri Ve Hurda Demirden Üretilen Beton Çelik Çubukların Yeterliliklerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2013; (21): 0
- [22] Özcan C, Köprü E. Yapay Sinir Ağları ile Sıvı Ham Demir Tahmini ve 5.Yüksek Fırın Uygulaması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi: 155-162
- [23] Cabrera C, Moron C, Garcia A, Learning Process of the Steel Use in Building Engineering Students. American Journal of Educational Research. 2024; (2): 366-371
- [24] Hayat F, Trip Çeliklerinin Otomotiv Endüstrisinde Kullanımının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2013; (25): 0
- [25] Alsaran A, Karakan M, Çelik A. The investigation of mechanical properties of ion-nitrided AISI 5140 low-alloy steel. Materials Characterization. 2002; (48): 323-327
- [26] Karakan M, Alsaran A, Çelik A. Effects of various gas mixtures on plasma nitriding behavior of AISI 5140 steel. Materials Characterization. 2002; (49): 241-246
- [27] Aytaç A, Işık MS, Çanakçı B, Özdemir T, Aztekin K, İpek H. AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. Savunma Bilimleri Dergisi. 2018; (17): 139-165
- [28] Kuntoğlu M, Aslan A, Pimenov DY, Giasin K, Mikolajczyk T, Sharma S. Modeling of Cutting Parameters and Tool Geometry for Multi-Criteria Optimization of Surface Roughness and Vibration via Response Surface Methodology in Turning of AISI 5140 Steel Materials, vol; 2020.
- [29] Adalı Y, Kurnaz CAN. Sakarya University Journal of Science. 2003; (7): 251-258.
- [30] Uzun G, Çiftçi İ. Politeknik Dergisi. 2012; (15): 29-34.
- [31] Şap S. AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin Güç Tüketimi Üzerine Etkileri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; (35): 313-320
- [32] Kuntoğlu M, Aslan A, Sağlam PD. AISI 5140 Çeliğinin Tornalanması Esnasında Yaklaşma Açısı ve Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. Politeknik Dergisi. 2022; (25): 145-155.

- [33] Apichai P. Effects of quenchants on microstructures and mechanical properties of steel grade AISI 5160. *Journal of Metals, Materials and Minerals*.2020; (30):
- [34] Bhadeshia HKDH, Honeycombe SR. 9 - The Tempering of Martensite. *Steels (Third Edition)*, (eds.) Bhadeshia HKDH, Honeycombe SR, Butterworth-Heinemann, Oxford. 2006; 183-208
- [35] Sirin SY, Sirin K, Kaluc E. Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel. *Materials Characterization*. 2008; (59): 351-358
- [36] Barut N, Yavuz D, Kayalı Y. Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 Çeliklerinin Difüzyon ve Adhezyon Davranışlarının İncelenmesi (015701) (1-8). *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2014; (14): 1-8.
- [37] Zhao L, Hu Z, Wang X, Chen X, Huan P, Zhang H. Laser Surface Remelting of AISI 4140 Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; (774): 012082.
- [38] Siyambaş Y, Turgut Y. Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AISi10Mg Alaşımli Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü-Bir Araştırma. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2022; (10): 368-390.
- [39] Camposeco-Negrete C, de Dios Calderón-Nájera J. Sustainable machining as a mean of reducing the environmental impacts related to the energy consumption of the machine tool: a case study of AISI 1045 steel machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019; (102): 27-41
- [40] Çarboğa C. Düşük Karbonlu Çeliklere Bor İlavesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Gazi Üniversitesi*; 2010.
- [41] Karaoğlu S. Structural characterization and wear behavior of plasma-nitrided AISI 5140 low-alloy steel. *Materials Characterization*. 2002; (49): 349-357
- [42] Topaloğlu C. *Metal Kesme Teknolojilerinde Kesme Yüzeylerinin İncelenmesi, Metal Eğitimi, Sakarya Üniversitesi*; 2010.
- [43] Çetkin E. Farklı Kaynak Parametrelerinde Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI304/AISI5140 Çelik Çiftlerinin Mekanik ve Mikroyapılarının Araştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2020; (9): 1724-1733
- [44] Qamar SZ, Sheikh AK, Arif AFM, Pervez T, Siddiqui RAJAoms, engineering. Heat treatment of a hot-work die steel. 2007; (28): 503-507

- [45] Opez de Lacalle * LN, Lamikiz A, Muñoa J, Sánchez JA. The CAM as the centre of gravity of the five-axis high speed milling of complex parts. *International Journal of Production Research*. 2005; (43): 1983-1999
- [46] Groover MP. Book *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. Third edition. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons; 2007.
- [47] Ersöz O. Kriyojenik İşlem Uygulanmış Ve Uygulanmamış Kesici Takımlarla Tornalanan A1S1 1050 Çeliğinin İşlenebilirliği Ve Talaş Morfolojisinin Araştırılması, Makine Mühendisliği Anabilim Dalını Batman Üniversitesi; 2021.
- [48] Yılmaz V, Dilipak H, Sarıkaya M, Yılmaz CY, Özdemir M. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi. 2014; (30): 220-226
- [49] Gürbüz H, Baday Ş, Gönülaçar YE. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi. 2017; (7): 59-78
- [50] ALİBEY İT. Kalıp Malzemelerinin Uygulama Alanlarına Göre Sınıflandırılması Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Uludağ Üniversitesi s; 2010.
- [51] Uzun G, Çiftçi İ, Demir B, Hayat F. Book *Ç 5140 Çeliğinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İşlenebilirliğe Etkisi The Effect Of Microstructural And Mechanical Properties On The Machinability Of AISI 5140*; 2009.
- [52] Karayel B Ç 4140 Malzemesinin Tornalanmasında İlerleme, Kesme Hızı Ve Kesici Takımın Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Ömrü Ve Aşınmaya Etkileri, Makina Eğitimi Anabilim Dalı Gazi Üniversitesi, s. 104
- [53] Sarıdemir S, Çakmak S. AISI 4140 Çeliğinin İşlenmesinde Kesici Uç Geometrisinin Talaş Kırmaya Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2016; (4): 765-771
- [54] Kıyak M. Frezeleme işleminde silici uç kullanımının incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*. 2020; (11): 585-592
- [55] YILMAZ E. Takım Çeliğinden (AISI 4340) Farklı İki Yöntemle Üretilen Takım Tutucularının Kesme Anındaki Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılarak, Uygun Takım Seçimine Karar Verilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi; 2019.
- [56] Mahdavinejad RA. Effect of Lubricant in Output Parameters of Milling. *Applied Mechanics and Materials*. 2011; 44-47: 335-339

- [57] Aslan AJTDvFD. Krater Aşınması Ve Kesici Takım Sıcaklığı Arasındaki İlişkinin Araştırılması: Aısı 5140 Tornalamada İstatistiksel Analiz Ve Optimizasyon.; 2021.
- [58] Gökçe H, Çiftçi İ, Gökçe H. Frezeleme Operasyonlarında Kesme Kuvvetlerinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi: Saf Molibdenin İşlenmesi Üzerine Bir Çalışma. Politeknik Dergisi. 2019; (22): 947-954.
- [59] Yaka H, Engin K. Improvement of Hole Qualities and Optimization of Machining Parameters Through Experimental and Finite Element Analysis in Drilling of AISI D2 Cold Work Steel. Journal of the Institute of Science and Technology. 2023; (13): 2973-2985.
- [60] Koçanoğulları S, Köksal N. Celal Bayar University Journal of Science. 2015; (11): 0.
- [61] Şahin Hm, Acır A. Politeknik Dergisi. 2003; (6): 541-549.
- [62] Cakıroglu R, Uzun G. Yüksek İlerleme ile Frezeleme İşlemi Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetinin ve İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2021; (7): 58-66.
- [63] Başar G. TOPSIS Yöntemi ile AISI 4140 Malzemesinin Yüzey Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu. Mühendislikte Konstrüksiyon, İmalat Vemalzeme Üzerine Güncel Araştırmalar, (Ed.) Yücelbaş Döç; 2021.
- [64] Mamaghanı SA. Frezeleme işleminde eş yönlü ve zıt yönlü talaş kaldırmanın pvd kaplanmış sert metal uçlardaki aşınma türlerine etkisinin incelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Gazi Üniversitesi; 2016.
- [65] AKGÜN A. Dalgalı kesim özelliğine sahip değişken talaş açılı parmak freze tasarımı ve performansının değerlendirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Gazi Üniversitesi, s. 87; 2020.
- [66] Yaka H, Akkuş H, Uğur L. Celal Bayar University Journal of Science. 2016; (12): 0.
- [67] ÖZDEMİR E. Biyomedikal Endüstrisinde Kullanılan Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Talaşlı İmalat Sürecinde Yüzey Bütünlüğü Ve Fonksiyonel Performansının Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi; 2020.
- [68] Ünver Ü, Koç A, Bahadıroğlu A, Atay BN. Soğutucu Akışkan Performanslarının Farklı Kriterlere Göre Karşılaştırılması. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2021; (4): 22-31.

- [69] Cingiz Z. Ticari tip soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanların termal görüntü işleme tekniği ile performanslarının incelenmesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi s; 2020.
- [70] Demir V, Günhan T, Yalçın Ç, Karacabey E, Bilgen H. Absorpsiyonlu Soğutma Sistemleri ve Tarımsal Amaçlı Kullanılabilirliği*. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi. 2012; (8): 421-431.
- [71] Aydın E. Geleneksel ve bitkisel tabanlı kesme sıvılarının insan/çevre sağlığı ve işlenebilirlik bakımından değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2023; (12): 1360-1371.
- [72] Duman O, Bozkurt Y. İş Sağlığı ve Güvenliğinde Metal İşleme Sıvıları. OHS ACADEMY.2021: (4): 27-43.
- [73] Çakır A, Kavak N, Şeker U. Sürdürülebilir Üretim İçin Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının Geri Dönüşümü. Mühendis ve Makine. 2017; (58): 15-30.
- [74] Sharma AK, Tiwari AK, Dixit AR. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production. 2016; (127): 1-18.
- [75] Kabaş K. Sıvı soğutma sistemli masaüstü CNC freze tezgahı tasarımı ve prototip imalatı Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı Karabük Üniversitesis. 2011; 116.
- [76] Öner A. Yanıcı/Parlayıcı Sıvı Depolanan Binalarda Yangın Güvenliği ve Söndürme Sistemleri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. 2009; 14:
- [77] Velikanov N.L. NVA. Efficiency of the pump in the lubricating and cooling fluid supply system. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2023; (6): 72-78.
- [78] Karaguzel U, Bakkal M, Budak E. Book Frezeyle Tornalama İşleminde Kesme Sıcaklığı Modeli Ve Deneysel OlarakDoğrulanması; 2015.
- [79] Güngör Ö, Zungur A, Koç M, Kaymak-ertekin F. Emülsiyonların Özellikleri ve Emülsifikasyon Koşullarının Aroma ve Yağların MikroenkapsülasyonuÜzerine Etkisi. Akademik Gıda. 2013; (11): 116-124.
- [80] Tosun N, Kuru C, Altıntaş E, Erdin O. Hava Ve Geleneksel Soğutma Yöntemi İle Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2013; (25): 0.

- [81] Kishawy HA, Dumitrescu M, Ng EG, Elbestawi MA. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high- speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005; (45): 219-227.
- [82] Koşan M, Demirci E, Özkaymak PDM, Akkoç AE, Aktaş M. Doğal Soğutucu Akışkan Kullanımında Son Gelişmeler. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2020; (6): 184- 199.
- [83] Ozdemir E, Güllü A. Talaşlı İmalat İşleminde Uygulanan Soğutma-Yağlama Yöntemlerindeki Yeni Yaklaşımların Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kesme Performansına Etkisi. s. 35-64; 2022.
- [84] Demirpolat AB, Das M. Cuo ve Zno İçeren Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi ve Yapay Sinir Ağı İle Modellenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*. 2020; (11): 225-238.
- [85] Şirin Ş, Yıldırım ÇV, Kıvak T. Waspaloy Süper Alaşımının Frezelenmesinde Nanopartikül Katkılı Yağlamanın Takım Aşınması Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2019; (7): 466-476.
- [86] Aytaç İ. Hibrit Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Isıl Davranışları. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2020; (8): 810-829
- [87] Ögüt E, Dilki S. Borulu Bir Isı Değiştiricide Kullanılan Nanoakışkanların Isıl ve Hidrolik Performansa Olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*. 2024; (27): 313-328.
- [88] Kılıç M. Elektronik Sistemlerin Soğutulmasında Nanoakışkanlar ve Çarpan Jetlerin Müşterek Etkisinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2018; (33): 121-132.
- [89] Chinchankar S, Kore SS, Hujare P. A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021; (68): 56-70.
- [90] Koca T. Otomobil Radyatöründe Su Bazlı Grafen Nanoakışkan Kullanımının Isıl Verimliliğe Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*. 2020; (11): 1157-1166.
- [91] Dağdevir T, Özceyhan V. Bir Isı Değiştiricisinde Su Bazlı Hibrit Nanoakışkan Kullanımının Termal ve Hidrolik Performans Üzerine Etkisinin Araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*. 2021; (37): 61-73.

- [92] Taşkesen E, Alahmad H, Bilen EN. Geleceğin Enerji Depolama Teknolojileri, Sürdürülebilirlik Ve Enerji Dönüşümü. Mühendis ve Makine. 2024; (65): 1-26.
- [93] Yang Y-T, Lai F-H. Numerical investigation of cooling performance with the use of Al₂O₃/water nanofluids in a radial flow system. International Journal of Thermal Sciences. 2011; (50): 61-72.
- [94] Zakaria I, Azmi WH, Mohamed WANW, Mamat R, Najafi G. Experimental Investigation of Thermal Conductivity and Electrical Conductivity of Al₂O₃ Nanofluid in Water - Ethylene Glycol Mixture for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Application. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2015; (61): 61- 68.
- [95] Gökçe H, Çiftçi İ. Molibden ve Alaşımlarının Frezelenmesinde Takım Aşınmasının İncelenmesi. Politeknik Dergisi: 1-1. 2024.
- [96] Yasmin H, Giwa SO, Noor S, Aybar HŞ. Reproduction of Nanofluid Synthesis, Thermal Properties and Experiments in Engineering: A Research Paradigm Shift Energies, vol. 2023; 16.
- [97] Hussein AM, Bakar RA, Kadrigama K, Sharma KV. Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2014; (53): 195-202.
- [98] Budak Ziyadanoğulları N. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi. 2017; (7): 253-260.
- [99] Leong KY, Saidur R, Kazi SN, Mamun AH. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). Applied Thermal Engineering. 2010; (30): 2685-2692.
- [100] Ahmet KABUL ÖK, Ali Kemal YAKUT. Gövde Borulu Isı Değiştirici İçin Isı Transfer Katsayısının Teorik Ve Deneysel İncelenmesi SDU International Technologic Science. 2011; (3): 38-54.
- [101] Mia M, Dey PR, Hossain MS, Arafat MT, Asaduzzaman M, Shoriat Ullah M, Tareq Zobaer SM. Taguchi S/N based optimization of machining parameters for surface roughness, tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition. Measurement. 2018; (122): 380-391.
- [102] Sarıkaya M, Güllü A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. Journal of Cleaner Production. 2014; (65): 604-616.

- [103] Grzesik W, Wanat T. Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006; (46): 1988-1995.
- [104] Bilga PS, Singh S, Kumar R. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*. 2016; (137): 1406-1417.
- [105] Abbas AT, Ragab AE, Al Bahkali EA, El Danaf EA (2016). Optimizing Cutting Conditions for Minimum Surface Roughness in Face Milling of High Strength Steel Using Carbide Inserts. *Advances in Materials Science and Engineering* 2016: 7372132.
- [106] Elbah M, Yallese MA, Aouici H, Mabrouki T, Rigal J-F. Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel. *Measurement*. 2013; (46): 3041-3056.
- [107] Sajjady SA, Nouri Hossein Abadi H, Amini S, Nosouhi R. Analytical and experimental study of topography of surface texture in ultrasonic vibration assisted turning. *Materials & Design*. 2016; (93): 311-323.
- [108] Grzesik W, Wanat T. Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005; (169): 364-371.
- [109] Aslan A. Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: A comprehensive study. *Measurement*. 2020; (163): 107959.
- [110] Kahraman F. Optimization of cutting parameters for surface roughness in turning of studs manufactured from AISI 5140 steel using the Taguchi method. *Materials Testing*. 2017; (59): 77-80.
- [111] Ji M, Xu J, Chen M, Mansori MEI. Effects of Different Cooling Methods on the Specific Energy Consumption when Drilling CFRP/Ti6Al4V Stacks. *Procedia Manufacturing*. 2020; (43): 95-102.
- [112] Zhang S, Li JF, Wang YW. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*. 2012; (32): 81-87.
- [113] Yıldırım ÇV, Kıvık T, Sarıkaya M, Erzincanlı F. Determination of MQL Parameters Contributing to Sustainable Machining in the Milling of Nickel-Base Superalloy Waspaloy. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2017; (42): 4667- 4681.

- [114] Usca ÜA, Uzun M, Şap S, Giasin K, Pimenov DY, Prakash C. Determination of machinability metrics of AISI 5140 steel for gear manufacturing using different cooling/lubrication conditions. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; (21): 893-904.
- [115] Kara F, Köklü U, Kabasakaloğlu U. Taguchi optimization of surface roughness in grinding of cryogenically treated AISI 5140 steel. 2020; (62): 1041-1047.21
- [116] Maruda RW, Krolczyk GM, Wojciechowski S, Powalka B, Klos S, Szczotkarz N, Matuszak M, Khanna N. Evaluation of turning with different cooling- lubricating techniques in terms of surface integrity and tribologic properties. *Tribology International*. 2020; (148): 106334.
- [117] Singh RK, Sharma AK, Dixit AR, Tiwari AK, Pramanik A, Mandal A. Performance evaluation of alumina-graphene hybrid nano-cutting fluid in hard turning. *Journal of Cleaner Production*. 2017; (162): 830-845.
- [118] Sinha MK, Madarkar R, Ghosh S, Rao PV. Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*. 2017; (141): 1359-1375.
- [119] Bakalova T, Svobodová L. Quality assessment of milling technology and the biocidal effects of SiO₂ or TiO₂ nanoadditives in cooling lubricant emulsions. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; (45): 509-519.
- [120] Wang X, Li C, Zhang Y, Ding W, Yang M, Gao T, Cao H, Xu X, Wang D, Said Z, Debnath S, Jamil M, Ali HM. Vegetable oil-based nanofluid minimum quantity lubrication turning: Academic review and perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020; (59): 76-97.21
- [121] Zadafiya K, Shah P, Shokrani A, Khanna N. Recent advancements in nano-lubrication strategies for machining processes considering their health and environmental impacts. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021; (68): 481-511.
- [122] Günan F, Kıvık T, Yıldırım ÇV, Sarıkaya M. Performance evaluation of MQL with AL₂O₃ mixed nanofluids prepared at different concentrations in milling of Hastelloy C276 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020; (9): 10386- 10400.
- [123] Şirin Ş, Kıvık T. Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy. *Tribology International*. 2019; (137): 180-192.

- [124] Maruda RW, Arkusz K, Szczotkarz N, Wojciechowski S, Niesłony P, Królczyk GM. Analysis of size and concentration of nanoparticles contained in cutting fluid during turning of 316L steel in minimum quantity lubrication conditions. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023; (87): 106-122.
- [125] Yıldırım ÇV. Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL. *Tribology International*. 2020; (144): 106127.
- [126] Maruda RW, Szczotkarz N, Michalski M, Arkusz K, Wojciechowski S, Niesłony P, Khanna N, Królczyk GM. Evaluation of tool wear during turning of Ti6Al4V alloy applying MQL technique with Cu nanoparticles diversified in terms of size. *Wear*. 2023; 532-533: 205111.
- [127] Yıldırım ÇV, Şirin Ş, Kıvak T, Ercan H, Sarıkaya M. An attempt towards green machining of Ni-based Hastelloy C4 alloy: Effect of vegetable oils and their combination with TiO₂ and SiO₂ nanoparticles on outputs. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023; (37): e00668.21
- [128] Makhesana MA, Patel KM, Krolczyk GM, Danish M, Singla AK, Khanna N. Influence of MoS₂ and graphite-reinforced nanofluid-MQL on surface roughness, tool wear, cutting temperature and microhardness in machining of Inconel 625. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023; (41): 225-238.
- [129] Sayuti M, Sarhan AAD, Salem F. Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption. *Journal of Cleaner Production*. 2014; (67): 265-276.
- [130] Nam JS, Lee P-H, Lee SW. Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011; (51): 649-652.
- [131] Habibnia M, Sheikholeslami M, Tabarhoseini SM, Taheri A, Sheykhi M. Cooling improvement for the machining process with the inclusion of nanoparticles using the experimental approach. *Journal of Molecular Liquids*. 2023; (370): 120985.
- [132] Şap S. Machining and Energy Aspect Assessment with Sustainable Cutting Fluid Strategies of Al-12Si Based Hybrid Composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024; (11): 33-53.
- [133] Ross NS, Ganesh M, Srinivasan D, Gupta MK, Korkmaz ME, Krolczyk JB. Role of sustainable cooling/lubrication conditions in improving the tribological and machining characteristics of Monel-400 alloy. *Tribology International*. 2022; (176): 107880.

- [134] Gong Y, Xu J, Buchanan RC. Surface roughness: A review of its measurement at micro-/nano-scale. 2018;(3):
- [135] Şap S. Understanding the Machinability and Energy Consumption of Al- Based Hybrid Composites under Sustainable Conditions Lubricants, vol. 11; 2023.
- [136] Şap S. Understanding the Machinability and Energy Consumption of Al- Based Hybrid Composites under Sustainable Conditions. Lubricants. 2023; (11): 111.
- [137] Jamil M, Khan AM, Hegab H, Gong L, Mia M, Gupta MK, He N. Effects of hybrid Al₂O₃-CNT nanofluids and cryogenic cooling on machining of Ti-6Al- 4V. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019; (102): 3895-3909.
- [138] Khalilpourazary S, Meshkat SS. Investigation of the effects of alumina nanoparticles on spur gear surface roughness and hob tool wear in hobbing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014; (71): 1599-1610.
- [139] Hegab H, Kishawy HA, Gadallah MH, Umer U, Deiab I. On machining of Ti-6Al-4V using multi-walled carbon nanotubes-based nano-fluid under minimum quantity lubrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018; (97): 1593-1603.
- [140] Waikar RA, Guo YB. A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding. Journal of Materials Processing Technology. 2008; (197): 189-199.
- [141] Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Sap E, Gupta MK. Investigations on tool wear, surface roughness, cutting temperature, and chip formation in machining of Cu-B-CrC composites. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021; (116): 3011-3025.
- [142] Thakur DG, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. Materials & Design. 2009; (30): 1718-1725.
- [143] Şap S, Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E. Performance evaluation of AlTiN coated carbide tools during machining of ceramic reinforced Cu-based hybrid composites under cryogenic, pure-minimum quantity lubrication and dry regimes. Journal of Composite Materials. 2022; (56): 3401-3421.

- [144] Demirpolat H, Binali R, Patange AD, Pardeshi SS, Gnanasekaran S. Comparison of Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Forces, Tool Tip Temperature, and Chip Shape during Sustainable Turning of Bearing Steel. *Materials*. 2023; (16): 4408.
- [145] Usca ÜA. The Effect of Cellulose Nanocrystal-Based Nanofluid on Milling Performance: An Investigation of Dillimax 690T. *Polymers*. 2023; (15): 4521
- [146] Şap E, Usca ÜA, Şap S, Polat H, Giasin K, Kalyoncu M. Understanding the effects of machinability properties of Incoloy 800 superalloy under different machining conditions using artificial intelligence methods. *Materials Today Communications*. 2024; (38): 108521.
- [147] Şap S. Machining and Energy Aspect Assessment with Sustainable Cutting Fluid Strategies of Al–12Si Based Hybrid Composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2023; (11): 33-53
- [148] Şirin E. Evaluation of tribological performance of MQL technique combined with LN₂, CO₂, N₂ ecological cooling/lubrication techniques when turning of Hastelloy C22 superalloy. *Tribology International*. 2023; (188): 108786.
- [149] Binali R, Demirpolat H, Kuntoğlu M, Sağlam H. Machinability Investigations Based on Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Temperature, Chip Morphology and Material Removal Rate during Dry and MQL-Assisted Milling of Nimax Mold Steel. *Lubricants*. 2023; (11): 101.
- [150] Ross NS, Manasea Selvin BJA, Nagarajan S, Mashinini PM, Dharmalingam SK, Savio AP, Gupta MK, Korkmaz ME. Novel use of cryogenic cooling conditions in improving the machining performance of Al 8011/nano-SiC composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023; (129): 1703-1715.
- [151] Usca ÜA, Uzun M, Şap S, Kuntoğlu M, Giasin K, Pimenov DY, Wojciechowski S. Tool wear, surface roughness, cutting temperature and chips morphology evaluation of Al/TiN coated carbide cutting tools in milling of Cu–B–CrC based ceramic matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; (16): 1243-1259.
- [152] Kaynak Y. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014; (72): 919-933.
- [153] Kouam J, Songmene V, Balazinski M, Hendrick P. Effects of minimum quantity lubricating (MQL) conditions on machining of 7075-T6 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015; (79): 1325-1334.

- [154] Bordin A, Sartori S, Bruschi S, Ghiotti A. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2017; (142): 4142-4151.
- [155] Darshan C, Jain S, Dogra M, Gupta MK, Mia M, Haque R. Influence of dry and solid lubricant-assisted MQL cooling conditions on the machinability of Inconel 718 alloy with textured tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019; (105): 1835-1849.
- [156] Kumar Mishra S, Ghosh S, Aravindan S. Machining performance evaluation of Ti6Al4V alloy with laser textured tools under MQL and nano-MQL environments. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020; (53): 174-189.
- [157] Kshitij G, Khanna N, Yıldırım ÇV, Dağlı S, Sarıkaya M. Resource conservation and sustainable development in the metal cutting industry within the framework of the green economy concept: An overview and case study. *Sustainable Materials and Technologies*. 2022; (34): e00507.
- [158] Shah P, Bhat P, Khanna N. Life cycle assessment of drilling Inconel 718 using cryogenic cutting fluids while considering sustainability parameters. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021; (43): 100950.
- [159] Usca ÜA, Şap S, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E, Karabiber A, Pimenov DY, Giasin K, Wojciechowski S. Estimation, optimization and analysis based investigation of the energy consumption in machinability of ceramic-based metal matrix composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; (17): 2987-2998