



**AISI 4140 ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM VE
YAĞLAMA/SOĞUTMA ORTAMLARI İLE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN YİLEŞTİRİLMESİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Mehmet YALNIZ

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ**

**AISI4140 ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM VE YAĞLAMA/SOĞUTMA
ORTAMLARI İLE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Mehmet YALNIZ

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ**

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

**KARABÜK
Haziran 2024**

Mehmet YALNIZ tarafından hazırlanan “AISI4140 ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM VE YAĞLAMA/SOĞUTMA ORTAMLARI İLE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28/06/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Rüstem BİNALI (SÜ)
Üye : Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU (KBÜ)

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

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Mehmet YALNIZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AISI4140 ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM VE YAĞLAMA/SOĞUTMA ORTAMLARI İLE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Mehmet YALNIZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ

Haziran 2024, 70 sayfa

Eklemeli imalatta önemli yer alan bu çalışma, malzemenin tribolojik özelliklerini kapsamaktadır. Bu çalışma da ayrıca yağlama ortamında eklemeli olarak üretilmiş AISI 4140 çeliğin mikrokimyasal özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Tribolojik deneyleri kuru kayma, MMY altında bilyeli düz makine ile yapılmıştır. Akabinde hacim kaybı, en kritik sürtünme kuvvetleri, migrograflar, aşınma derinliği ve aşınma genişliği gibi tribolojik değişkenler tespit edildi. MMY, kuru kayma gibi ortama uygun 4140 çelik top numunelere karşı uygulanmıştır. Aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlüğü gibi tribolojik özellikler ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler : Isıl İşlem, Aşınma, Sertlik, Yağlama, Kuru Kayma.

Bilim Kodu : 91419

ABSTRACT

Master Thesis

IMPROVING THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AISI4140 STEEL THROUGH HEAT TREATMENT AND LUBRICATION/COOLING ENVIRONMENTS

Mehmet YALNIZ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ

June 2024, 70 pages

Reflecting broad interest in additive manufacturing, this work focuses on the tribological behavior of the material. This study also investigated the effect of the lubrication regime and the tribological properties of additively produced AISI4140 steel in the lubrication environment. Tribological tests were carried out on a dry sliding, ball bearing flat machine under minimum amount of lubrication. Tribological variables such as the most critical friction forces, volume loss, wear depth and micrographs were then investigated. 4140 balls suitable for (MQL), cryogenic and hybrid cryo+MQL conditions were used against additive manufacturing. Tribological properties such as wear rate, surface roughness and friction coefficient have been revealed.

Key Word : Heat Treatment, Wear, Efficiency, Lubrication, Dry Sliding.

Science Code : 91419

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ'a ve tez süresince gerek literatür çalışmaları gerekse teknik çalışmalarda desteğini esirgemeyen sayın hocam Arő. Gör. Mehmet Tayyip ÖZDEMİR'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca KBÜBAP-24-YL-026 nolu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	7
BÖLÜM 2	15
AŞINMA	15
2.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ	15
2.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	16
2.2.1. Malzeme Seçimi.....	17
2.2.2. Sürtünme.....	17
2.2.3. Yüzeğe Uygulanan Yük	17
2.2.4. Kayma Mesafesi.....	17
2.2.5. Yüzeğe Sertliğı	17
2.2.6. Yüzeğe Pürüzlüğü.....	18
2.2.7. Yağlama.....	18
2.2.8. Çevre	18
2.2.9. Zaman.....	18
2.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ.....	19

	<u>Sayfa</u>
2.3.1. Adhesiv(yapışma) Aşınma	19
2.3.2. Abrazif Aşınma	20
2.3.3. Yüzey Yorulması ve Aşınması	21
2.3.4. Erozyon Aşınması	22
2.3.5. Korozyon Aşınması.....	22
2.3.6. Aşınmanın Azaltılması İçin Gereken Önlemler.....	24
2.4. SÜRTÜNME.....	25
BÖLÜM 3	26
YAĞLAMA.....	26
3.1. YAĞLAYICILARIN GÖREV ve ÖZELLİKLERİ	26
3.2. KATI YAĞLAYICILAR.....	27
3.3. SIVI YAĞLAYICILAR	27
3.3.1. Minimum Miktarda Yağlama (MMY)	29
3.3.2. MMY Sisteminin Çalışma Prensipleri	29
BÖLÜM 4	31
MATERYAL VE METOT.....	31
4.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	31
4.2. LİNEER İLERİ-GERİ (BALL ON FLAT) AŞINMA DENEYİ	31
4.2.1. Deneysel Parametreleri.....	33
BÖLÜM 5	39
BULGULAR VE SONUÇLAR.....	39
5.1. SERTLİK DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	39
5.2. SÜRTÜNME KUVVETİ VE KATSAYISININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..	40
5.3. AŞINMA GENİŞLİĞİ VE DERİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	44
5.4. NUMUNELERİN HACİM KAYBI VE AŞINMA ORANLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	50
5.5 SERTLEŞTİRİLMİŞ NUMUNELERİN MİKROYAPI İNCELENMELERİ	51
5.6 SEM VE EDX ANALİZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	54

	<u>Sayfa</u>
5.6.1 Sem Görüntülerin Analizi.....	54
BÖLÜM 6	59
SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKÇA	61
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. 1.	4140 çeliğine ait zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) grafiği	5
Şekil 1. 2.	4140 çeliğine ait sürekli soğuma dönüşümü (CTT) grafiği.	6
Şekil 2. 1.	Aşınma zaman ilişkisi.	16
Şekil 2. 2.	Adheziv aşınmanın şematik olarak gösterimi.	19
Şekil 2. 3.	Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi.	20
Şekil 2. 4.	Yorulma aşınması.	21
Şekil 2. 5.	Erozyon aşınması.	22
Şekil 2. 6.	Korozyon aşınma örneği.	23
Şekil 2. 7.	Sürtünen yüzeylerde temas noktaları.	25
Şekil 3. 1.	Torna tezgahında açılan dişlinin işleme esnasında kullanılan yağlama yöntemi	26
Şekil 3. 2.	MMY sisteminin şematik gösterimi.	29
Şekil 4. 1.	Aşınma deney düzeneği şematik gösterimi.	32
Şekil 4. 2.	Çelik numunesi ve aşındırıcı top.	33
Şekil 4. 3.	Numuneleri kesme cihazı.	33
Şekil 4. 4.	Numunelerin kesilmesi.	34
Şekil 4. 5.	Numunenin parlatma, temizleme ilk ve son hali.	34
Şekil 4. 6.	Zımparalama ve parlatma cihazı.	35
Şekil 4. 7.	Tungsten karbür aşındırıcı top numuneleri.	35
Şekil 4. 8.	Deney düzeneği uygulama proses işlemleri.	36
Şekil 4. 9.	Deney ortamı	36
Şekil 4. 10.	Vickers sertlik deneyi şematik gösterimi.	38
Şekil 5. 1.	Numunelerin vickers mikro sertlik sonuçları.	39
Şekil 5. 2.	Kuru ortam şartlarında ısıl işlem görmemiş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.	40
Şekil 5. 3.	Kuru ortam şartlarında ısıl işlem görmüş ve hava ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.	41
Şekil 5. 4.	Kuru ortam şartlarında ısıl işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.	41
Şekil 5. 5.	MMY ortamında ısıl işlem görmemiş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.	42

Şekil 5. 6. MMY ortamda ısıtıl işlem görmüş ve hava ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.	42
Şekil 5. 7. MMY ortamında ısıtıl işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.	43
Şekil 5. 8. Kuru ortam şartlarında ısıtıl işlem görmemiş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.	45
Şekil 5. 9. Kuru ortam şartlarında ısıtıl işlem görmüş ve hava ile soğutulmuş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.	46
Şekil 5. 10. Kuru ortam şartlarında ısıtıl işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.	47
Şekil 5. 11. MMY ortamda ısıtıl işlem görmüş ve hava ile soğutulmuş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.	48
Şekil 5. 12. MMY ortamında ısıtıl işlem görmemiş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.	48
Şekil 5. 13. MMY ortamında ısıtıl işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş aşınma derinliği ve genişliği grafiği.	49
Şekil 5. 14. Isıtıl işlem görmemiş çelik numunesi SEM görüntüsü.	51
Şekil 5. 15. Havada soğutulmuş çelik numunesinin SEM görüntüsü.	52
Şekil 5. 16. Yağda soğutulmuş çelik numunesi SEM görüntüsü.	53
Şekil 5. 17. Kuru ortamda ısıtıl işlem görmemiş çelik numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.	54
Şekil 5. 18. MMY ortamında ısıtıl işlem görmemiş numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.	55
Şekil 5. 19. Kuru ortamda ısıtıl işlem görmüş hava ile soğutulmuş numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.	55
Şekil 5. 20. MMY ortamda ısıtıl işlem görmüş hava ile soğutulmuş numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.	56
Şekil 5. 21. Kuru ortamda ısıtıl işlem görmüş yağ ile soğutulmuş çelik numunesinin SEM analizi ve edx grafiği.	56
Şekil 5. 22. MMY ortamında ısıtıl işlem görmüş yağ ile sertleştirilmiş çelik numunesinin SEM analizi ve edx grafiği.	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1. 1. AISI 4140 çeliğın kimyasal özellikleri.	2
Çizelge 1. 2. AISI 4140 çeliğın ısı özellikleri.	2
Çizelge 1. 3. AISI 4140 çeliğın mekanik özellikleri.....	3
Çizelge 1. 4. AISI 4140 çeliğın elektriksel özellikleri.....	3
Çizelge 1. 5. AISI 4140 çeliğın ısı işlem özellikleri.	4
Çizelge 1. 6. AISI 4140 çeliğın yaklaşık kritik sıcaklıkları.	4

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

μM	: Mikrometre
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
C	: Karbon
Cr	: Krom
CrMo	: Krom Molibden
Dak	: Dakika
Dev	: Devir
Fe	: Demir
HRC	: Rocwell Sertliği
HV	: Vickers Sertliği
M	: Metre
MM	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MoS₂	: Molibden Disülfid
MPa	: Megapascal
N	: Newton
Ni	: Nikel
NM	: Nanometre
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
SiO₂	: Silisyum Oksit
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür
V	: Vanadyum

W : Tungsten
WC : Tungsten Karbür

KISALTMALAR

3DFEM : The Three Dimensional Finite Element Method (Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi)
AISI : American Iron Steel Institute (Amerikan Demir Çelik Enstitüsü)
CCT : Continuous Cooling Transformation (Sürekli Soğutma Dönüşümü)
EDS : Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılım Spectrometresi)
EDX : Energy Distribution X-Ray (Enerji Dağıtım X-Işını)
MECT : Maskless Electrochemical Texturing (Maskesiz Elektrokimyasal Dokulandırma)
MFREC : Multiple Filler Reinforced Epoxy Composites (Çok Dolgulu Madde Takviyeli Epoksi Kompozitleri)
ML : Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama)
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SLL : Self Lubricating Layer (Kendinden Yağlamalı Tabaka)
ST : Steel (Çelik)
TIG : Tungsten Inert Gas (Tungsten Gazı)
TTT : Time Temperature Transformation (Zaman Sıcaklık Dönüşümü)
XRD : X Ray Diffractometry (X Işını Difraktometresi)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

42CrMo4 ve 1.7225 çelik olarakta bilinen AISI 4140 çeliği düşük alaşımlı Cr-Mo'lu ıslah çeliklerin en yaygın kullanım alanına sahip olup Cr-Mo çeliği olarak bilinmektedir. 4140 çeliği dövme kalite çelikler, alaşımlı yapı çelikleri, alaşımlı çelik ve orta karbonlu çelik olarakta isimlendirilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki korozyon ve oksidasyona karşı dirençleri yüksektir [1]. Bu çelik grubu çeşitli makine, otomotiv, maden sektörü yedek parça temini, motor dişli kutusu çarkları, süper şarj cihazların tahrik dişlisi, aktarma organı, biyel kolu, dişliler, miller, aktarım sağlayan shaftlar, termal yorulmanın ve yüksek sıcaklığın çok olduğu petrol arama makineleri gibi çalışma alanlarında tercih edilmektedir [2]. Ancak bu çeliklerin sertlikleri düşük olduğundan kaynaklı aşınma dirençleri zayıftır. Dolayısıyla yüksek ekonomik giderlere sahip bu alaşımların abrazif ve adhesiv aşınma şartlarında kullanılacak ise buna uygun aşınma önleyici bir çözüm gerekmektedir [3,4]. Aşınma ve korozyon genel anlamda malzeme yüzeyi ile doğrudan ilgili olduğundan alaşımların yüzey modifikasyonu pratik bir yaklaşım sunmasının yanı sıra tüm alaşımın bileşimini değiştirmeye göre daha ekonomik seviyededir. Nikel esaslı süper alaşımların tribolojik özelliklerini geliştirmek için bu alaşımların yüzey modifikasyonları alanında yapılan çalışmalar son 20 yılın en popüler konuları arasında yer almaktadır. Enstrümantasyon mekanik bileşenleri ve endüstriyel ürünler arasındaki düşük sürtünme en kritik özelliklerden biridir. Daha düşük bir sürtünme katsayısına ulaşmak için en önemli çözüm yağlamadır. Sürtünme ve yağlamanın en kritik olduğu sistemlerde nano yağlayıcı kullanımı verimlilik artışına ve parça ömrünün artmasında önemli rol oynamaktadır. Aşınmış bir yüzeyde nanoparçacıkların birikmesi kayma gerilmelerini azaltır, dolayısıyla sürtünme ve aşınmayı azaltmaktadır. Nanopartikül katkı maddesi sürtünmeyi azaltma davranışını geliştirmektedir. Bunun nedeni vizkozite artışıdır. Vizkozite düştükçe yağ filmi oluşturmak zorlaşmaktadır.

Gelişmiş yağlayıcılar, enerji tasarrufu sayesinde verimliliği artırabilir. Yağlama uygulamalarının büyük bir kısmı, önde gelen özelliklerinden dolayı mineral yağ bazlı yağlayıcılardır [5].

Çizelge 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 ve 1.6'da AISI 4140 çeliğine ait kimyasal özellikleri, mekanik, ısıl işlem, ısı ve elektrik özellikleri ile kritik sıcaklıklar verilmiştir.

Çizelge 1.1. AISI 4140 çeliğin kimyasal özellikleri [6].

Element	% Ağırlık
C	0.38
Mn	0.75-1.00
P	0.035 (max)
S	0.04 (max)
Si	0.15-0.30
Cr	0.80-1.10
Mo	0.15-0.25

Çizelge 1.2. AISI 4140 çeliğin ısıl özellikleri [7].

Özellikler	Koşullar	
	T(°C)	İşlem
Isıl Genleşme ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12.3	20-100 Yağda sertleştirilmiş, 600°C'de temperlenmiş
Isıl İletkenlik (W/m-K)	42.7	100
Özgül Isı (J/kg-K)	473	150-200

Çizelge 1.3. AISI 4140 çeliğın mekanik özellikleri [6].

Özellikler	Koşullar		
		T (°C)	İşlem
Yoğunluk ($\times 1000$ kg/m ³)	7.7-8.03	25	
Poisson Oranı	0.27-0.30	25	
Elastisite Modülü (GPa)	190-210	25	
Çekme Dayanımı (Mpa)	655		815°C 'de tavllanmış
Akma Dayanımı (Mpa)	417.1		
% Uzama	25.7	25	
% Kesit Daralması	56.9		
Sertlik (HB)	197	25	815°C 'de tavllanmış
Darbe Dayanımı (J)	54.5	25	815°C 'de tavllanmış

Çizelge 1.4. AISI 4140 çeliğın elektriksel özellikleri [6].

Özellikler	Koşullar		
	Değer	T (°C)	İşlem
Elektrik Direnci (10^{-9} Ω -m)	12.3	222	20
		263	100
		326	200
		475	400
		646	600

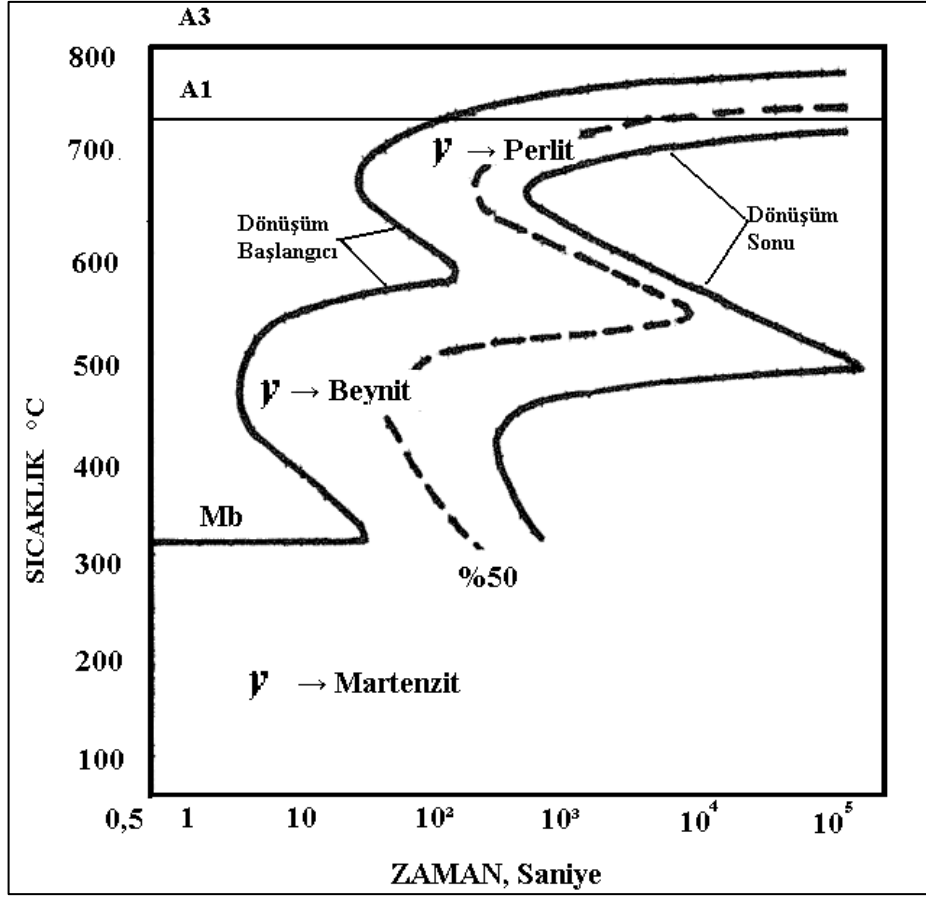
Çizelge 1.5. AISI 4140 çeliğin ısıtım özellikleri [6].

	Koşullar	
	Sıcaklık (°C)	Soğutma
Sıcak Şekil Verme	850-1050 °C	
Normalizasyon	840-880 °C	
Yumuşak Tavlama	680-720 °C	
Sertleştirme	820-860 °C	Su
	820-860 °C	Yağ

Çizelge 1.6. AISI 4140 çeliğin yaklaşık kritik sıcaklıkları [6].

Element	Mf	Ms	Ar1	Ac1	Ar3	Ac3
Sıcaklık(°C)	260°C	343°C	680°C	732°C	743°C	804°C

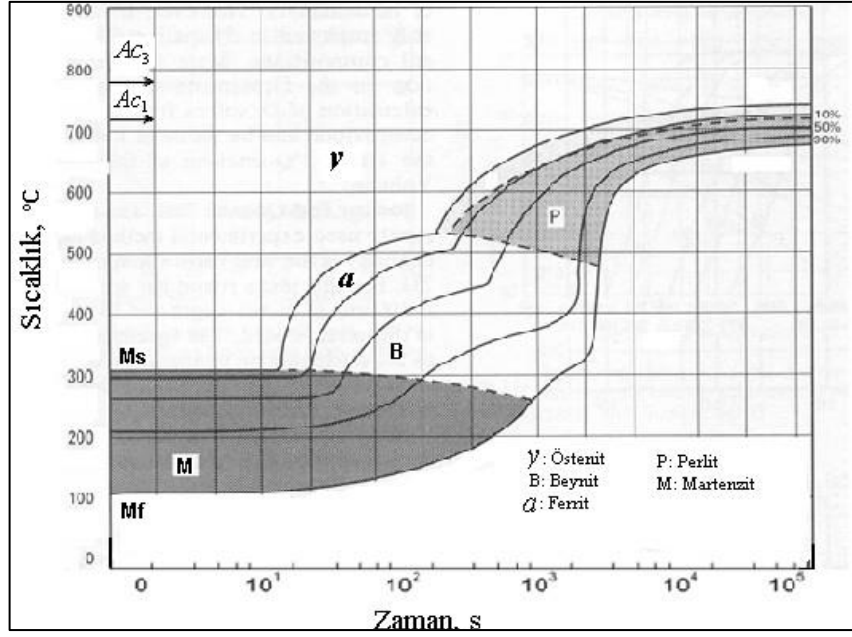
AISI 4140 aynı çelik grupları arasındaki çeliklerle karşılaştırıldığı zaman orta derecede sertleştirilebilir. Ancak onlara göre dayanım ve tokluğu daha iyidir. Yüksek karbon içerdiğinden dolayı mukavemeti artar ve daha iyi şekilde sertleştirme sağlanır. 4140 çeliğin çekme dayanımı 1650MPa'a kadar çıkabilir [6]. Sertleştirme ve temperlemeye uygun yapıdadır. 480°C'den sonra çalışma ortamlarındaki dayanımı azalmaktadır. Bu çeliklerden çalışma şartlarında yüksek dayanım istenildiğinde, ısıtım sonucu hidrojen gevrekliği oluşabilir. Ancak bu durumda hidrojen gevrekliğini önleyip süneklik kazandırmak için 2 ile 4 saat arasında 190°C'de ısıtım işlemi tabii tutulması gerekmektedir. Sürtünme dirençlerini 540 °C'ye kadar korumaktadır. Sıcak şekillendirme 110-1200°C'de sağlanır ve bu aşamadan sonra yavaşça soğutulmalıdır. Bu işlemden sonra 4140 çeliklerin kaynak kabiliyetleri artmaktadır. Soğuk şekillendirme ile malzemenin %62 oranında şekillendirilmektedir. Östenit dönüşümü esnasında görülen ve öncelikle dönüşüm ürünün özelliklerini belirleyen ve buna bağlı olarak çok yönlü işlemlerin anlaşılmasında zaman-sıcaklık dönüşüm ve sürekli soğuma dönüşüm diyagramları kullanılmaktadır [6].



Şekil 1.1. 4140 çeliğine ait zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) grafiği [7].

Zaman sıcaklık dönüşüm grafiği ile malzeme istenilen yapıda belirlenen bir sıcaklığa kadar soğutulur ve aynı sıcaklıkta bekletilir. İstenilen dönüşüme ulaşıncaya kadar sabit sıcaklıkta bekletilir ve tekrar soğutulur (Şekil 1.1). Bu çeliğin yapısının tamamen perlit ya da beynit olmasını istediğimizde zaman-sıcaklık grafiğindeki bilgiler okunarak bu yapılar elde edilir [7].

Şekil 1.2'de 4140 çeliğine ait sürekli soğumalı dönüşüm diyagramı verilmiştir. Bu şablon özel soğutma ortamlarında ulaşılabilen soğutma hızının, östenitten martenzite kadar faz dönüşümünün etkilerini içermektedir. Bu grafikler su verme ortamının etkilerini teorik olarak görülebileceği grafiklerdir [7].



Şekil 1.2. 4140 çeliğine ait sürekli soğuma dönüşümü (CTT) grafiği [7].

Bu diyagramda AISI 4140 çeliğinin soğutma prensibini anlamak için martenzit dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıkları (Ms-Mf) okunabilmektedir. Bu sıcaklıklarla birlikte 4140 çeliğine ait olarak çeliğin ısıtılmasında kritik östenit dönüşüm sıcaklıkları olan Ac1 ve Ac3 ile çeliğin soğutulmasında östenit ortamından perlit ortamına dönüşüm sıcaklığı olan sıcaklıkları Şekil 1.2’de verilmiştir. Sürekli soğuma dönüşümü grafiği ile soğutma hızları sonunda malzemedeki yapılar görülmektedir. Çok hızlı soğutmaya örnek olarak su ile soğutmaya örnek olarak bu işlemde yapının tamamen martenzite dönüşeceği de grafikte anlaşılmaktadır [7]. Çok hızlı olmamak şartı ile soğutma işlemine örnek verecek olursak yağda soğutularak beynitik bir yapı elde edilebilmesi mümkündür. Şekilde görüldüğü gibi yine malzemedeki ferrit ve beynit yapılarını oluşturmak için yavaş soğutma gerektiği anlaşılmaktadır [8].

1.1. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Erdoğan vd. 2024 yılında bilyalı dövme yönteminden sonra numuneyi nitrürlemenin 4140 çeliğinin kuru kaymada aşınma direnci incelemiştir. Çalışmada silindir disk halde uygulanan 4140 çeliği numuneleri aşınma ve metalografi için hazırlanmıştır. Numunelerden bazıları hiçbir şekilde işleme tabi tutulmayıp, geri kalan numuneler ise belirli şartlardaki parametrelerde dövme ve nitrürleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde çalışmada numunelerin nitrürlü ve nitrürsüz şekilde normal çalışma sıcaklığında kuru kaymada aşınma davranışı incelenmiştir. Çalışma lineer ileri-geri aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerde meydana gelen hacim kaybını belirtmek için mikroskop kullanılmıştır. Numunelerin yüzey morfolojisi içinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntüler incelenmiştir. Sonuç olarak bilyalı dövme işleminin 4140 çeliğin adhesiv aşınma özelliği üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir [9].

Çağan vd. 2018 yılında titanyum (Ti) ve alaşımlarının minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi altında işlenebilirlik çalışmaları incelenmiştir. Hafif metallerden yapılan titanyum ve alaşımlarının işlenmesi son derece zor ve maliyetlidir. Bu makalenin temel amacı, bu alandaki bilimsel çalışmalara katkıda bulunmak ve Ti ve alaşımlarının işlenmesi sırasında doğru kesici takımın seçimi, işleme operasyonu ve kesme parametrelerinin belirlenmesine yardımcı olmaktır. Çalışmanın bir diğer amacı ise MMY sisteminin otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılmasının stratejik öncelik olan Ti ve alaşımlarının işlenebilirliğine etkilerini incelemektir. Tüm bu hedeflere ulaşabilmek için dünyada MMY sistemi ile işlenen titanyum ve alaşımları üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş olup titanyum ve alaşımlarının işlenmesi sonucunda ortaya çıkan kesme sıcaklıkları, takım ömrü, kesme kuvveti, yüzey pürüzlüğünü olumsuz etkilemiştir. Bunun yanı sıra MMY yöntemi ile yapılan çalışmada bu olumsuz etkileri en aza indirilmiştir. MMY sistemi takım ömrü kesme kuvveti, açısından kuru işleme göre daha iyi sonuç vermiştir. Güç yönünden bakıldığında normal yönteme göre çok daha az güç gerektirerek sonuca ulaşılması sağlanmıştır [10].

Tong vd. 2023 yılında çalışmalarında oksitlerin kendinden yağlamalı tabaka (SLL) etkisi araştırılmak üzere ıslah çeliği olan 00Cr12Ni4Mo üzerinde kuru kayma ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Çeşitli oksitlerle kendinden yağlamalı tabaka oluşumunun kesitlerdeki ve yüzeydeki morfolojilerine olan etkisi araştırılmıştır. Kendinden yağlamalı tabakayı pullu dağılımı gösteren camlı yüzey, düz yüzey ve pürüzlü yüzeye sahip olan grimsi beyaz yüzey olarak 3 ana grupta incelemiştir. Düz yüzeyin ana oksitlerini Fe ve Cr oksitler, camlı yüzey oksitlerine minimum miktarda SiO_2 içeren Fe-oksit olarak açıklamıştır. Cr- oksitin kendinden yağlamalı tabakanın taşıma kapasitesini geliştirdiğini ve matris arasındaki tutunma gücünün arttığı, minimum miktarda SiO_2 içeren kendinden yağlamalı tabakanın pürüzsüz bir yüzeyde parlama eğilimindeki aşınma etkisine fayda sağladığı maksimum miktarda SiO_2 in ise kendinden yağlamalı tabakada çatlama ve parçalanmasını engellemeye karşı olumlu sonuçlandığı kanısına varmıştır [11].

Okada vd. 2014 yılında minimum miktarda yağlama tekniğinin performansını AISI 1050 ve AISI 304 tipi paslanmaz çelikler ve Ti64 titanyum alaşımların kaplamalı karbür takımlarla frezelenmesi üzerine gözlemlemiştir. Yaptıkları incelemelerde, takımın serbest yüzeyindeki sıcaklık, kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey pürüzlüğü gibi ölçütler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Minimum miktarda yağlama kullanıldığında takımın serbest yüzey sıcaklığının kuru kesmeye göre özellikle düşük kesme hızlarında azaldığı tespit edilmiştir [12].

Tian vd. 2023 yılında çalışmalarında çoklu dolgu madde takviyeli epoksi kompozitleri (MFREC) test etmiştir. MFREC'in termal ve mekanik özellikleri, aşınma mekanizmaları ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada MFREC'in gerilme mukavemeti, kopma uzaması ve çekme tokluğunda artışlar görülmüştür. Sıcaklık ve yapılan yükler sonucunda elastik bölgeden plastik bölgeye geçişte MFREC'in aşınma oranı ile birlikte sınır pürüzlülüğü sürtünme katsayısının sürtünmeyi azalttığı görülmüştür [13].

Mitevski 2021 yılında çalışmasında yüzeyi sertleştirilmiş çelik, östenitik çelik ve korozyona dayanıklı martenzitik çeliğin aynı ortamlarda aşınma testi uygulanarak aşınma davranışları gözlemlenmiştir. Çalışmanın amacı 3 farklı çelik türünün

malzeme yapısına bağlı olarak aynı şartlarda aşınmaya maruz bırakılarak aşımaya karşı davranışı olarak tespit edilmiştir.

Yağlayıcı madde silikon yağı seçilerek 30N yük ve 5.000 devir için 0,06-1,00 m/s kayma hızı altında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak yüzeyi sertleştirilmiş çeliğin en düşük aşınma ve sürtünme katsayısı verdiği, martenzitik çeliğin minimum miktarda plastik deformasyona maruz kalıp çatlaklar meydana geldiği ve en son olarak östenitik çeliğin gövde üzerinde ağır adhezyona maruz kaldığı görülmüştür [14].

Bolling vd. 2015 yılında ısıl işlem görmüş AISI 4140 çeliğin işlenmesinde minimum miktarda yağlama kullanılarak 2D ve 3DFEM simülasyonunda çeliğin işleme proseslerin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısı, kuru ortam şartlarında bağlı kayma kızı, kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme miktarı, yüzey pürüzlüğü gibi parametreler incelenmiştir. İncelemeler sonucunda minimum miktarda yağlamanın kuru ortam şartlarına göre sıcaklığının düşürdüğü ve hacim kaybının azaldığı test edilmiştir [15].

Dhar vd. 2006 yılında AISI 316 çelik numunesinin tornalama işleminde, MMY ortam şartlarında ve kuru ortam şartlarında işlenilebilirliği karşılaştırmıştır. İyi bir yüzey kalitesi elde etmek için MMY ortamında işlemenin kuru ortamda işlemeye göre çok daha avantajlı olduğu, yanak aşınması azaltılarak takım ömrüne artış sağladığını ve maliyeti düşürdüğü tespit etmiştir [16].

Gönülçalar 2018 yılında çalışmasında AISI 4140 çelik numunesinin tornalama işleminde kullanılan MMY'nin etkilerini incelemiştir. Farklı işleme şartlarında kesilen numune ve kesici takımda gerçekleşen aşınma deneyleri gerçekleştirmiştir. Numunenin işleminde kuru ortamda işleme ve 3 farklı MMY debisi ile işleme esas alınmıştır. İşleme kriterleri ise kesme kuvveti, yüzey pürüzlüğü ve kesici takım aşınması değerlendirilmeye alınmıştır. Kesme parametrelerinde 4 farklı kesme hızı (75-100-125-150 m/dk), 3 farklı ilerleme hızı (0,16-0,25-0,5mm/dev), sabit kesme derinliği (2,5mm) kullanılırken kesici takım aşınması deneylerinde ise sabit kesme hızı 125m/dk, ilerleme 0,16 mm/dev ve kesme derinliği 2.5mm kullanılmıştır. Deneyler MMY artışının kesme kuvvetlerini belirli bir noktaya kadar olumlu yönde etkilediğini

göstermiştir. MMY uygulamasıyla yüzey pürüzlüğünde en düşük değerlerin elde edildiği gözlemlenmiştir. Ancak MMY debisi arttıkça yüzey pürüzlüğü değerlerinde düzenli bir eğilim görülmemiştir. MMY uygulamasıyla kesici takımın ortalama yan yüzey aşınmasının azaldığı ve MMY debi artışıyla olumlu etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca, tüm işleme koşullarında esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ile arttığı, kesme hızı ile azaldığı görülmüştür [17].

Etri 2022 yılında çalışmasında Ti-6Al-4V titanyum alaşımının tungsten karbür bilyelere karşı tribolojik performansını incelemiştir. Çeşitli soğutma koşulları kullanarak, MMY ve nanografen eklenmiş hibrit grafen/bor nitrid karışımı (nano-3) uygulamaları değerlendirmiştir. Deneyleri 100 m kayma mesafesi 50mm/sn ve 75 mm/sn kayma hızları ile 10N ve 20N yüklerde gerçekleştirmiştir. Hacim kaybı, sürtünme kuvvetleri ve aşınma derinliği gibi özellikleri incelemiştir. Sonuçlar, en düşük hacim kaybının nano-3 durumunda olduğunu, en büyük aşınma derinliğinin ise kuru ortamda 105µm olarak tespit etmiştir [18].

Akben 2009 yılında çalışmasında çelik malzemedeki delik ince işlenmesinde sulu kesme ve minimum miktarda yağlama yöntemlerinin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından karşılaştırma yapmıştır. Flanş çatallar ve çatallı miller üzerinde yapılan deneylerde TiAlN kaplamalı karbür uçlar kullanılmıştır. Deliklerin ince işlenmesi, delme işleminin ardından yapmıştır. Sulu kesme minimum miktarda yağlama yöntemleri kullanılarak yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınması karşılaştırmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, flanş çatalları için 0.13mm/dev ilerleme ile 363m/dak, 278m/dak ve 225m/dak kesme hızlarında deneyler yapmıştır ve 225m/dak üst sınır olarak belirlemiştir. Kesme hızı 225m/dak'a düşürüldükten sonra, aynı üretim hızlarını korumak için ilerleme 0.21mm/dev'e yükseltilerek deneyleri tekrarlamıştır. Ayrıca 225m/dak kesme hızında 0.13mm/dev ve 0.21mm/dev ilerlemelerde kesici uçların aşınmalarını incelemiştir. Çatallı miller için fabrikada kullanılan 0.11mm/dev ilerleme ve 250m/dak kesme hızında deneyler gerçekleştirmiştir.

Çalışmanın sonuçlarına göre firmanın önerdiği kesme hızı aralığında minimum miktarda yağlama, sulu kesmeye göre daha iyi yüzey kalitesi ve daha uzun takım ömrü sağlamaktadır. Yüksek kesme hızları yüzey kalitesini artırırken takım ömrünü kısaltacaktır. Kesme hızı azaldıkça minimum miktarda yağlamanın takım ömrüne olumlu etkisi, sulu kesmeye göre daha belirgin hale gelmektedir. Minimum miktarda yağlama, serbest yüzey aşınmalarını azaltmazken, ikincil serbest yüzeydeki çentik aşınmasını sulu kesmeye göre azaltmıştır. Minimum miktarda yağlamada az miktarda aşınma gözlenmiştir. Sonuç olarak minimum miktarda yağlamaya geçişle flanş çatallarında %94, çatallı millerde %50 takım ömrü artışı gözlenmiştir [19].

Gencer çalışmasında çeliğe ısıl işlem ile östemperleme, martemperleme ve vakum altında yağda sertleştirme ve temperleme ısıl işleminin çeliğin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel ortamda incelenmesi amaçlamıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, martemperleme ve vakum altında yağda sertleştirme numunelerinde martenzitik, östemperleme numunesinde ise beynitik yapı elde edilmiştir. Hiçbir numunede kalıntı östenit tespit edilmemiştir. Martemperleme ısıl işlemine tabii tutulan en yüksek akma, çekme ve sertlik değerleriyle birlikte en düşük yüzde uzamayı göstermiştir. Martemperleme ve vakum yağda sertleştirme numunelerinin darbe kırılma enerjisi yakın iken, östemperleme numunesi en yüksek çentik darbe kırılma enerjisine sahiptir. İleri-geri aşınma deneyleri sonrasında, tüm numunelerin benzer aşınma davranışı gösterdiği ve adhezif, abrazif ve oksidatif aşınma mekanizmalarının ortak etkisiyle aşındıkları kanıtlanmıştır [20].

Ulutan vd. 2010 yılında çalışmalarında AISI 4140 çelik yüzeylerine tungsten inert gaz (TIG) ısı kaynağı kullanılarak SiC tozları ile alaşımlanmıştır. Üretim parametrelerinin mikroyapı, sertlik ve aşınma direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüzey alaşımlama sonrası optik mikroskobu, SEM, EDS ve XRD gibi teknikler kullanılarak mikroyapı analizleri yapılmış, sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve aşınma özellikleri disk üzerinde blok aşınma testi ile değerlendirilmiştir. Bulgular, alaşımlı bölgelerin üretim parametrlere bağlı olarak farklı mikroyapılarda katılaştığı göstermiştir. Alaşımlı yüzeylerde sertlik ve aşınma direncinde artış gözlemlenmiştir.

Bu artış daha sert fazların ve grafitin varlığına bağlanmıştır. Grafit, katmanlı yapısıyla sürtünme katsayısı azalmıştır. Sertlik değerleri 670 HV-1165 HV arasında değişmiştir. En düşük kütle kaybı 0,0581 cm/s işlem hızı, 0,5 g/s toz besleme hızı ve 29,1 kJ/cm ısı girdisi ile alaşımlanan numunede görülmüştür. Sonuç olarak TIG yöntemi AISI 4140 alaşımlı çelik yüzeylerinin aşınma direncini arttırmak için etkili bir yüzey alaşımlama yöntemi olarak kanıtlanmıştır [21].

Kılıç vd. 2024 yılında çalışmalarında AISI 4140 çeliğinden aşınma, sertlik ve çekme test numuneleri hazırlanmış ve dört malzeme grubu oluşturmuştur. Bunlar; işlem görmemiş, yumuşatma tavlama, normalizasyon ve sertleştirme tavadır. Tüm numunelere sertlik, çekme ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri 50 m/dak sabit hızda toplam 240 metre kayma yolunda gerçekleştirilmiştir. Aşınma miktarını belirlemek için üç farklı yük ve üç farklı zımpara tane büyüklüğü (120,180, 360 numara) kullanılmıştır. Ayrıca, zımpara çalışma çapının etkisini gözlemlemek için 80mm, 120mm ve 160mm çaplar kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, sertleştirme ve normalizasyon işlemleri çeliğin sertliğini, çekme dayanımını ve aşınma direncini artırırken, yumuşatma tavlama bu özellikleri düşürmüştür. En yüksek aşınma yumuşatma tavlama olan numunede 5N yük, 120 numaralı zımpara ve 160mm çalışma çapında; en düşük aşınma ise sertleştirilmiş numunede 2N yük, 160 numaralı zımpara ve 80mm çapında gözlemlenmiştir. Yük ile aşınma miktarı arasında doğrusal bir ilişki bulunmuş, taze zımpara boyundaki artış aşınma miktarını arttırmıştır. Toplam aşınma yolu arttıkça aşınma miktarı da artmış, fakat birim yoldaki aşınma miktarı azaldığı tespit edilmiştir [22].

Akın vd. 2017 yılında çalışmalarında, alaşımsız düşük karbonlu C-22, AISI 1045 ve St 50-2 çelikleri katı ortamda borlama tekniği kullanılarak incelemelerde bulunmuştur. Borlama işlemi için Ekabor 2 tozu kullanılmıştır. Çalışmada borlama süresi ve sıcaklığın bor katman kalınlığı, sertlik ve korozyon dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. X-ışını kırınım analizi ve SEM ile borürlerin şekli, yapısı ve aşınma yüzeyleri analiz edilmiştir. Borlama süresi ve sıcaklığı arttıkça çeliklerin yüzeyindeki borlu tabaka kalınlığında artış gözlemlenmiştir.

Özellikle, 6 saat boyunca 940°C'de borlanan AISI 1045 çeliği numunesinde en yüksek bor tabakası kalınlığı olan 131,4 µm ölçülmüştür. En düşük bor tabakası kalınlığı ise 4 saat boyunca 900°C'de borlanan St 50-2 çeliği numunesinde 38,04 µm olarak belirlenmiştir. 900°C'de bor tabakası kalınlığının azalmasının sebebi, faz geçişinin gerçekleşmesi ve C elementinin çözünmesi sonucu bor elementinin çeliğin yüzeyine difüze olmasının engellenmesi olarak tespit edilmiştir [23].

Uzun 2012 yılında çalışmasında sıcak haddelenmiş Ç5140 çeliğinde ısıl işlemlerle değiştirilen mekanik özelliklerin takım aşınması ve kesme kuvvetlerine etkisi incelemiştir. Tornalama yöntemi kullanılarak yapılan deneyler, kuru kesme şartlarında dört farklı kesme hızlarında (90-110-130-150m/dak), 0,1mm/dev ilerleme hızında ve 1mm kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, kesme hızının artışı ile kesme kuvvetlerinde genel bir düşüş olduğu göstermiştir. En yüksek kesme kuvveti değeri (593,78N), 755°C'de yağda sertleştirilmiş numunenin 90m/dak. kesme hızında işlenmesi sonucu elde edilmiştir. Bu durum, numunenin yüksek sertlik ve dayanımının yüksek kesme kuvvetine neden olduğu şeklinde yorumlamıştır. Ayrıca, sertliği nispeten yüksek olan malzemelerde belirgin takım aşınmaları gözlemlenmiştir [24].

Güner 2019 yılında çalışmasında AISI 4140 çeliğinin lazerle yüzey sertleştirme işlemine tabi tutularak farklı sertlik değerlerine sahip numunelerin oda sıcaklığında kuru kayma aşınma davranışı incelemiştir. Deneyler 5N ve 10N yükler altında 40x40x40mm boyutundaki numuneler üzerinde lineer ileri-geri aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin hacim kayıpları 3D optik mikroskobu ile incelenmiştir. Aşınan yüzeylerin morfolojisi ise SEM cihazı ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, artan yüklerle birlikte numunelerdeki hacim kayıplarının arttığı göstermiştir. Yüzey sertleştirmesine tabii tutulan numunelerde hacim kaybı oranları diğer numunelere göre daha düşük bulunmuştur. En yüksek hacim kayıpları ise sertleştirme işlemi yapılmamış numunelerde gerçekleşmiştir. Kuru kayma işlemine tabii tutulan numunelerin yüzeylerinde tribolojik katman oluşmuş ve 5N ile 10N yüklerde yorulma aşınma mekanizması görülmüştür. Ayrıca 10N yük altında oksidasyon aşınma mekanizmasında tespit edilmiştir [25].

Duran 2016 yılında çalışmasında burç imalatı için 100Cr6 çeliğine 15dev/dk dönme hızında indüksyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulamıştır. Sertleştirme işlemi sonrası merkeze doğru sertlik ve içyapı değişimi incelenmiş, sertleşmiş tabaka kalınlığı belirlenmiştir. İndüksyonla sertleştirilen yüzeylere, imal edilecek burcun dış ölçüleri sertleşen tabakada kalmak koşuluyla, lineer ileri-geri aşınma cihazında deneyler yapılmıştır. Bu deneyler kuru ortamdaki oda sıcaklığında 49.2 mm/sn kayma hızında ve 2.5, 5 ve 10 N kuvvetler altında gerçekleşmiştir. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayıları ölçülmüş ve aşınan yüzeylerdeki izler optik ve elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deneyler sonucunda indüksyon işlemi ile yüzeyde martenzit yapının oluştuğunu ve yüzey sertliğinin çekirdek sertliğinden 2,5 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Aşınma deneylerinde 5N yük uygulandığında daha fazla ağırlık kaybı olduğu gözlemlenmiştir [26].

BÖLÜM 2

AŞINMA

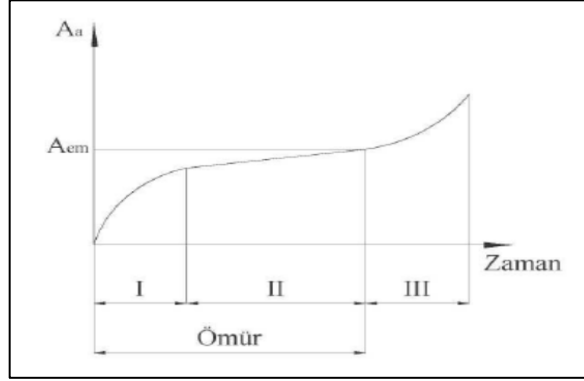
Aşınma; malzemelerin katı sıvı gaz gibi dış ortam temasına maruz kalması ile birlikte mekanik yollarla yüzeyden küçük parçalar kopması sonucu meydana gelen malzeme yüzey bozulmasına denir [2]. Aşınma sonucunda malzemede oluşan yüzey bozukluğu ile birlikte kalıcı hasarlarda meydana gelir ve maddi kayıplara yol açmaktadır [27]. Aşınma olayı 5 ana unsurda incelenmektedir.

- 1) Aşınan (ana malzeme)
- 2) Aşındıran (karşı malzeme)
- 3) Ara malzeme
- 4) Yük
- 5) Hareket

2.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ

- 1) Zaman ile aşınma
 - a) 1. Safha (Rodaj): Rodaj birbirine alıştıırma safhasıdır. Bu kısımda parçaların ilk çalışma sırasında yüksek bir aşınma oluşur. Bu sebeple malzemelerin rodaj yapılarak birbirine alıştıırılması malzeme için oldukça önemli bir olgudur. Genellikle rodaj yüksüz veya çok düşük hızlarda yapılır. Alıştıırmanın iyi yapılması için malzemeye bu safha için özel yükler uygulanmaktadır [6].
 - b) 2. Safha: Bu safhada aşınma, temas noktalarından oluşmaktadır.
 - c) 3. Safha: Bu safhada artan aşınma hızı ve şiddetli aşınma meydana gelir [6].

2) Anlık aşınma



Şekil 2.1. Aşınma zaman ilişkisi [6].

Aem çalışma şartı sınırı tain edilmiş olup malzemenin normal çalışma zamanı ömür olarak gözükmektedir (Şekil 2.1). 3. kademedен sonra malzeme değiştirilmesi ya da tamir edilip tekrardan kazanılması tavsiye edilir. Anlık aşınmada malzemelerin yüzeyleri birdenbire bozulmalar oluşur veya birbirine kitlenebilir çalışmaz hale gelir. Genelde malzeme seçiminden kaynaklı hatalar ya da yağlamanın yetersiz kaldığı aşınma şekli, statik zorlanmanın etkisi altında kopmaya benzerdir [28].

Genel olarak aşınma dış etkenler altında yüzeylerde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Dış etkilere maruz kalarak fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çeşitliliği birden çok aşınma halini oluşturmaktadır [28].

2.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

- 1) Malzeme seçimi,
- 2) Sürtünme,
- 3) Yüzeğe uygulanan yük,
- 4) Kayma mesafesi,
- 5) Yüzeğe sertliği,
- 6) Yüzeğe kalitesi,
- 7) Yağlama,
- 8) Çevre,
- 9) Zaman.

2.2.1. Malzeme Seçimi

Malzeme seçimi iş parçası için oldukça önemli olgulardan biridir. Bu olay doğru yapılmadığı takdirde hem maddi açıdan hemde performans açısından ciddi hasarlar meydana gelir. Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken ana hususlar mekanik mukavemet, imal edilebilirlik, maliyet ve sünekliktir [29].

2.2.2. Sürtünme

Sürtünme çoğu zaman aşınma ile doğru orantılı olsada bu durum bazı metallerde durum tersine dönmektedir. Bu metallerin sürtünme katsayıları düşük olmasına rağmen oldukça büyük aşınma oluşmaktadır [29].

2.2.3. Yüzeğe Uygulanan Yük

Yüzeğe uygulanan yük tamamen aşınma ile doğru orantılıdır. Yük arttıkça aşınma ortamına bağlı değişiklik göstererek aşınmada arttığı deneysel çalışmalarda test edilmiştir [29].

2.2.4. Kayma Mesafesi

Kayma mesafesinde aynı şekilde yüzeğe uygulanan yük gibi aşınma ile doğru orantılıdır. Bu mesafe arttıkça zamana bağlı olarak aşınma artmaktadır [29].

2.2.5. Yüzeğe Sertliği

Malzemenin yüzeğe sertliği aşınma için oldukça önemli maddelerden birtanesidir. Yüzeğe sertliği artırıldığında aşınma azaltılabilir ya da yüzeğe deformasyonu sabit tutulabilmektedir [29].

2.2.6. Yüzey Pürüzlüğü

Yüzey pürüzlüğü 10-70 µm arasında olmalıdır. Yüzeyin çok temiz olması yüzeyler arasında soğuk kaynak oluşumunu arttırmaktadır. Fakat yüzey kaba olarak işlenmiş ise bu aşınmayı daha fazla artmasına neden olmaktadır [29].

2.2.7. Yağlama

Yağlama aşınmayı doğrudan etkileyen etmenlerden birisidir. Sürtünme, yağlama yöntemi ile azaltılmaktadır. Ayrıca sürtünmeden kaynaklı oluşan ısıda uzaklaştırılmalıdır. Bu olay hem maliyet açısından hemde uygulanmasının kolaylığı açısından en çok tercih edilen yöntemler arasındadır. Yağlama yöntemi sürtünmede önemli rol oynamaktadır. Yağların çalışma ortamına bağlı yüksek sıcaklıklarda dahil özelliğini devam ettirmesi oldukça önemlidir [30].

2.2.8. Çevre

Aşınmada etki eden faktörlerden biri olan çevredir. Atmosferdeki oksijen yüzey bölgesinde koruyucu oksit tabakası ortaya çıkarmaktadır. Eğer ortamda soygaz varsa bu oran düşecektir. Oksit tabakasının ayrılması nedeniyle parçada metal-metal teması meydana gelerek adhezyon aşınması oluşacaktır. Aynı şekilde bağıl nem oranında aşınma miktarına bağlı olarak ters orantı oluşacaktır. Yani bağıl nem azaldıkça aşınma miktarı artması söz konusudur [30].

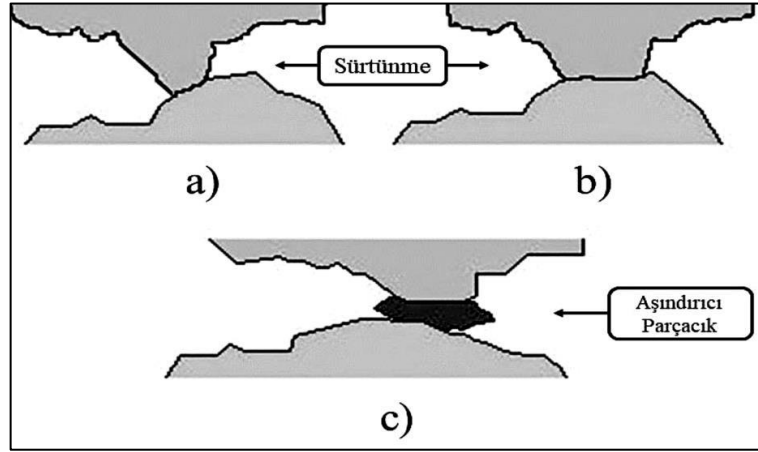
2.2.9. Zaman

Metal yüzeyinde deformasyon, devir sayısına,ve toplam zamanla ilişkisi olduğu için zamanın dikkate alınması oldukça önemli bir husustur [30].

2.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

2.3.1. Adhesiv(yapışma) Aşınma

Bu aşınma türü yapışma ve kayma aşınması olarak bilinmektedir. İki düzgün malzeme yağlamalı ve yağlamasız ortamda kayma teması ile oluşmaktadır. Adhezyon arayüzündeki parçaların teması ile oluşur ve bu temas noktaları kayma ile kesilir. Bu olayla birlikte yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilirler. Kayma devam ettiği takdirde diğer yüzeye yapışmış olan parçalar orjinal yüzeye yapışır ya da her iki yüzeyden bağımsız aşınma oluşabilir [31]. Yüzeylerine temas eden iki malzemelere yük yüklendiğinde temas noktalarında yüksek gerilmeler oluşur. Akma sınırı geçildiğinde ise ufak kaynak bağı oluşur. Artan yük ve sıcaklık kaynak bağlarının oluşumuna katkı sağlamaktadır. Birbirine temas eden malzemelerde kaynak ya da yapışma oluşsa bile birbirine olan hareketi sonucu bu bağ kopacak ve temas noktalarında kırılmalar oluşacaktır (Şekil 2.2). Genel olarak söyleyecek olursak kopma ve kırılmalar zayıf malzemelerde meydana gelmektedir [31].

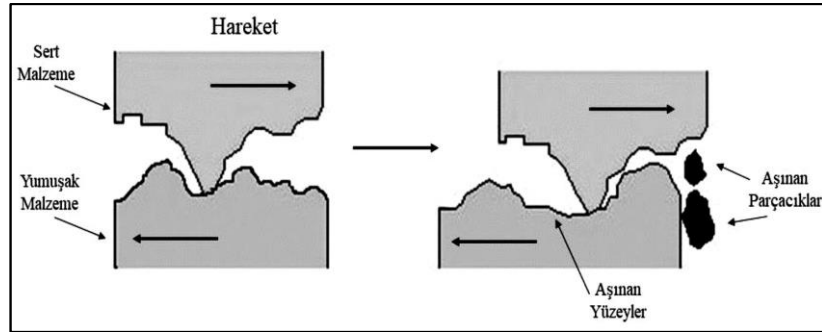


Şekil 2.2. Adheziv aşınmanın şematik olarak gösterimi [32].

Burada sürtünmeden kaynaklı kopma meydana gelip bunun sonucunda yapışma ve kayma oluşmuştur.

2.3.2. Abrazif Aşınma

Birbirine temas eden iki yüzeyler arasında pürüzlü ve sert yüzey ile malzemeyi hasara uğratan aşınma türüdür. Bu aşınma türü için iki durum vardır. Birinci durum iki cisimli abrazyondur. Sert yüzey iki sürtünen yüzeyin daha sert olma olayına denir. Bu duruma öğütlü kesme ve talaşlı imalat gibi makine çalışmalarıdır. İkinci durum ise üç cisimli abrazyondur. Sert yüzey üçüncü bir cisimdir. Genelde küçük abrazif partiküllerdir, kalan iki yüzey arasında bulunur ve yüzeylerden en az birini aşındırabilir. Serbest abrazyon ve parlatma buna örnek çalışmalardır. Çoğu zaman aşınma olaylarında ilk aşınma türü adhezivdir. Adheziv aşınmada partiküller oluşur, oluşan partiküller ara yüzeyde sıkışır ve üç cisimli abrazif aşınmayı meydana getirir [33]. Malzemenin artan sertliği, sertleşme hızı ve azalan deformasyon, ana fazdan daha sert, tok, elastik modülü fazla ve iri boyutlu taneler aşınma direncini artırabilir. Şekil 2.3'te abrazif aşınması şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 3. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi [32].

Aşınma sırasında kullanılan sert ve yüzeyi keskin aşındırıcılar, sünek malzemelerle temas sağlandığında yüzeylerde pullanma ve oluk oluşması malzemenin kayba uğramasına yol açar [34]. Gevrek malzemelerde direk çatlak oluşumuna neden olarak kırılmalar meydana gelmektedir [35].

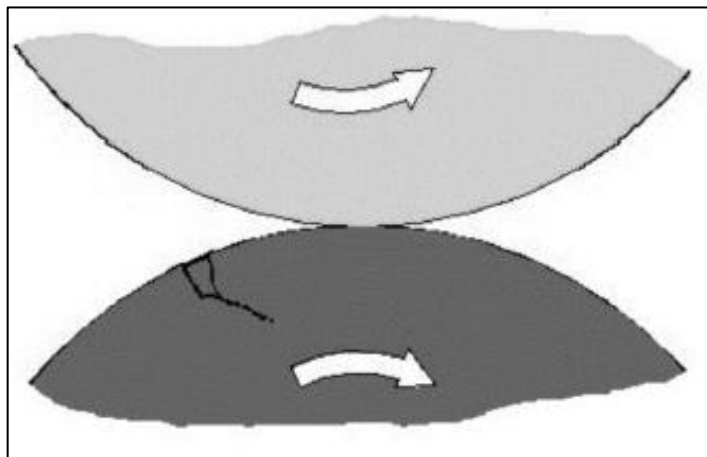
Abrazif aşınma türüne bağlı olan faktörler şu şekildedir;

1. Uygulanan yük,
2. Aşındırıcı partikülün boyut ve şekli,
3. Kayma hızı,
4. Malzemenin kırılma tokluğu [36].

Abrazif aşınmanın engellenmesi ya da minimum düzeye getirilmesi mümkündür. Bunun için malzemeye sert kaplamalar yapılabilir ya da yüzeyine ısıtıl işlem uygulanabilir; dışarıdan gelen partiküllerin malzeme yüzeyleri arasındaki geçişi engellenilebilir ya da aşınmaya maruz parçaların değiştirilmesinin kolay olacağı tasarımlar yapılabilir [32].

2.3.3. Yüzey Yorulması ve Aşınması

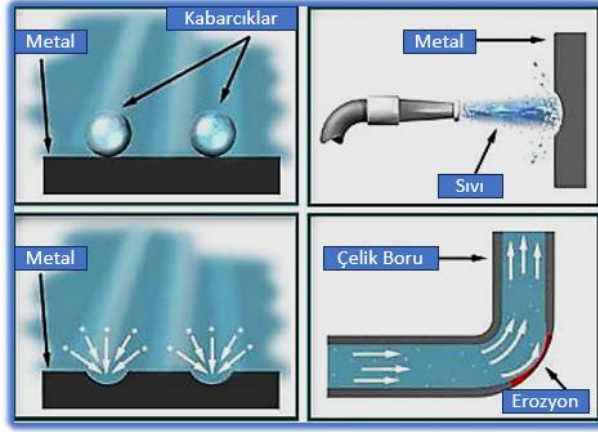
Yüksek basınçta çalışan parçaların fazla sayıda yük tekrarlı çevrimlere maruz kalması ardından, yüzey altında oluşan çatlakların büyüüp yüzeye kadar ulaşması ya da yüzeyde oluşup çatlağın ana gövdeyi sarıp çatlakların bir araya gelip parçanın kopup ayrılması ile oluşan bir aşınma türüdür [37]. Bu aşınma türü yetersiz yağlama sonucu çatlaklardan oluşan hasarlardan farklıdır [38]. Çoğu aşınma prosesinde yorulma görülmektedir. Öncelikle malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durumda malzemenin yüzeyinden parçaların kopmasına, çukurların oluşmasına işaret göstermektedir [39]. Yorulma aşınması; bilyeli yataklar ve birbiri ile temas eden dişlilerin kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Yüzeylerin alt kısmında maksimum gerilmeye ulaştığında, dislokasyonların yoğunlaştığı bölgede çatlaklar hızla ilerler ve yüzeyin hızlı bir şekilde hasara uğramasına sebep olur [12]. Şekil 2.4'te yorulma aşınması şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.4. Yorulma aşınması [12].

2.3.4. Erozyon Aşınması

Bir sıvı içerisindeki sert partiküllerin malzeme yüzeyinden geçmesiyle ya da yuvarlanmasıyla yüksek hızlarda meydana gelen çok sayıda parça kopması olayıdır. Katı parçacık çarpması, bir yüzey üzerine parçacıkların sürekli çarpması neticesinde meydana gelen aşınma şeklidir [40].

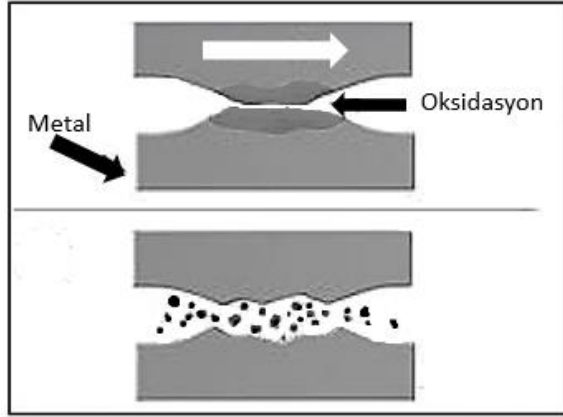


Şekil 2.5. Erozyon aşınması [6].

Uçak üzerine savrulan yağmur damlaları sıvı damlacıkları dışarı atan fanlar, akışkan püskürtme nozulları, difüzyon pompaları gibi akıştan ve sestten daha hızlı akışkan sağlayan cihazlar, buhar türbin vanaları bu aşınma türüne örnektir (Şekil 2.5).

2.3.5. Korozyon Aşınması

Temas yüzeylerinden en az birinin çalışma ortamında korozyona uğraması ve stabil hareket sebebiyle meydana gelen korozyon tabakası silinerek alınması ve bunun tekrarlı şekilde meydana gelen aşınma türüdür (Şekil 2.6). Başka bir ifadeyle aşınan yüzeyler, aynı zamanda korozif etkilerde uğramasınada korozyon aşınması denir [6].



Şekil 2.6. Korozyon aşınma örneği [6].

Metal grubu malzemeler çoğu uygulamalarda yüksek sıcaklıklarda korozif ortamlara maruz kalırlar ve malzemenin korozyon direnci bu ortamda etkilenir. Ortam ve sıcaklığa maruz kalarak aşınma 8 farklı şekilde oluşmaktadır:

- 1) Oksitleme,
- 2) Karbürleme ve metal tozlaşması,
- 3) Nitrürleme,
- 4) Halojen korozyonu,
- 5) Sülfürleme,
- 6) Kül (tuz) çökeleği korozyonu,
- 7) Erimiş tuz korozyonu,
- 8) Sıvı metal korozyonu [38].

En önemli yüksek korozyon aşınma türü oksitlenmedir. Metaller yüksek sıcaklıklarda hava veya oksitleyici ortamda kaldıklarında yüzeylerinde oluşan oksit tabakası büyüme yönünde etki eder. Metalik malzeme ve üzerinde bulunan oksit tabakası farklı ısıl genleşme katsayılarına sahiptir. Oksit tabakası, çalışma ortamında oluşan ısınma soğuma döngüleriyle oluşan iç gerilmeler nedeniyle zaman zaman dökülür ve hemen kendini yineler. Bu koruyucu oksitin kendini yineleyemeyeceği halinde savunmasız kalan metal hızla oksitlenir ve zamanla pul pul dökülerek yüzeyde malzeme kaybı oluşur [38].

2.3.6. Aşınmanın Azaltılması İçin Gereken Önlemler

- 1) Aşınmaya karşı dayanıklı malzeme seçimi, parçanın çalıştığı ortamdaki mevcut aşınma türü ve şiddeti belirtilerek yapılmalıdır.
- 2) Parçanın geometrik tasarımı, aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır.
- 3) Sadece aşındırıcı ortamlarla temas halindeki yüzeyler veya tüm yüzey alanı, esas malzemenin özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip ve mevcut aşınma türüne daha dayanıklı bir malzeme ile kaplanmalıdır.
- 4) Parçanın tamamının aşınmaya dirençli malzemeden üretilmesi yerine, maliyeti düşürmek açısından sadece aşınan yerleri aşınmaya dirençli malzemeden üretilip bakım onarım yapılması uygun olacaktır.
- 5) Parçanın üretim aşamasında herhangi bir imalat hatasına (gözenek, cüruf, çatlak, kalıcı çekme gerilmeleri, istenmeyen mikro yapı, yüksek yüzey pürüzlüğü) yer verilmemelidir.
- 6) Parça, dayanım limitlerini aşan yükleme şartlarında (yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve yüksek hız gibi) dikkat edilmelidir.
- 7) Bir yağın vizkozitesi sıcaklığa göre değişir. Vizkozite indeksi büyük olan yağlar, sıcaklık ile özellikleri daha az değişim gösteren yağlardır. Yağlayıcı ile çalışan ortamlarda yüksek viskozite değerli ve yüksek basınca dayanıklı yağlar (fosfor ve kükürt katkı) kullanılarak yağ filminin çabuk bozulması önlenebilir. Bununla beraber, katkı yağların oksidasyon aşınmasını arttırıcı önemli bir rol oynadığı da düşünüldüğünde malzeme seçiminde daha dikkatli olunmalıdır.
- 8) Soğutucu seçimi, parçanın çalışma ortamına bağlı olarak seçilmelidir.
- 9) Yağlayıcı ve soğutucunun uygun bir filtreleme işleminden geçirilerek içindeki aşındırıcı partiküllerin sisteme tekrar girmesine engel olunmalıdır.
- 10) Yağlayıcının kontrolleri düzenli olarak yapılmalı ve en düşük kullanım limiti belirleyerek belirli aralıklarla yenilenmelidir.
- 11) Sürtünme elemanları malzeme açısından birbirine uygun seçilmelidir [38].

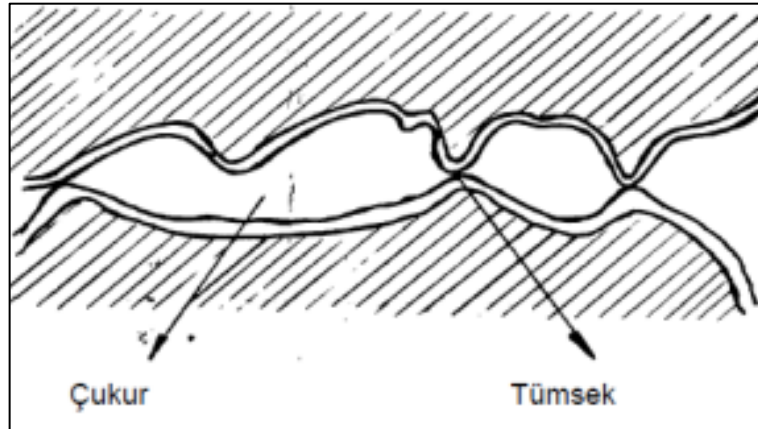
2.4. SÜRTÜNME

Birbiriyle temas halinde hareket eden iki cisim arasında hareket yönüne ters yönde oluşan direnç gösteren teğetsel kuvvete sürtünme denir [41]. Farklı bir söylemle sürtünme katı bir cismin kendisi ile temas halinde olan cismin ters yönde bağlı hareketine harekete karşı gösterdiği dirence denir [42].

Birbiri ile hareket halindeyken yüzeyler arasında yağlayıcı ortam bulunup bulunmamasına göre sürtünme kuru, sınır sürtünmesi veya sıvı sürtünmesi olmak üzere üç grupta incelenir.

- 1) Kuru Sürtünme: Sürtünme yüzeyleri arasında herhangi bir yağlayıcı tabakası yoktur. Yüzeyler doğrudan temas halindedirler.
- 2) Sınır Sürtünme: Yüzeyler arasında yağlayıcı bir tabaka vardır ancak yüzeyleri tam olarak birbirinden ayıramaz. Eğer yüzeyler arasındaki yağlayıcı sıvı iki yüzeyi birbirinden ayırıyorsa bu durumda sınır sürtünme durumu ortaya çıkar.
- 3) Sıvı Sürtünme: Yüzeyler arasındaki yağlayıcı sıvı iki yüzeyi birbirinden ayırma olayına denir [43].

Sürtünme; kayma, yuvarlanma ya da bu iki hareket türünün bir arada bulunduğu sistemlerde görülür. Sürtünme birbiri üzerinde hareket eden cisimlerin geometrilerinden çok yüzeylerin pürüzlük durumu ile ilişkilidir (Şekil 2.7). Bunun nedeni malzemeler temas halinde iken birbirine değen noktalar yüzeyin tamamından ziyade pürüzlerin tepe noktalarının temas etmesinden kaynaklanmaktadır [44].



Şekil 2.7. Sürtünen yüzeylerde temas noktaları.

BÖLÜM 3

YAĞLAMA

Yağlama, iki katı cisim arasında gerçekleşen sürtünme gücünü minimuma indirerek bulunduğu ortama göre kullanılan yağlar sayesinde kolay hareket yapılmasını sağlayarak mekanik aşınmaları azaltan sistemdir [45].



Şekil 3.1. Torna tezgahında açılan dişlinin işleme esnasında kullanılan yağlama yöntemi.

3.1. YAĞLAYICILARIN GÖREV ve ÖZELLİKLERİ

- 1) Yatak, dişli grubu, şaftlar gibi dönen ve iki cisim arasında temas eden makine parçalarında sürtünme ve aşınmayı azaltmak (Şekil 3.1),
- 2) Yağlama içerisinde istenmeyen parçaları fitre yöntemi ile dışarı atmak,
- 3) Yağlayıcı maddeler sistem içerisinde soğutucu görevi görmektedir. Yani sistem içerisindeki ısıyı dağıtıp uzaklaştırmak,
- 4) Çalışan sistemi korozyon ve paslanmaya karşı korumak,
- 5) Hidrostatik güç sistemlerinde mekanik gücü aktarmak gibi çeşitli alanlarda görevleri bulunmaktadır [46].

3.2. KATI YAĞLAYICILAR

Katı yağlayıcılar tek başına ya da sıvı yağlayıcıların içinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Grafit, molibden disülfür ve Boron Nitrit en çok kullanılan katı yağlayıcılardır. Bunlarla beraber asbest, mika, çeşitli plastiklerde yağlayıcı olarak kullanılmaktadır [47].

- 1) Grafit yağlayıcısı roket tarzı savunma sanayide kullanılan teçhizatların yüksek sıcaklıkta çalışan mafsal yataklarında kullanılmaktadır. Ayrıca sentetik kolloidal grafit, yağlarla birleştirilerek sürtünme halindeki yüzeylerin aşınma durumlarını düzeltmektedir [46].
- 2) Molibden diSülfür (MoS_2) yağlayıcısı, metal affinesi yüksek olup yüksek basınçta aşınma ve sürtünmeyi azaltmaktadır. Yüksek sıcaklık, yüksek yük, yüksek hız, kimyasal korozyon, modern ultra vakum koşullarında dahi kullanılan malzemeye iyi bir kayganlık sağlamaktadır [48].
- 3) Boron nitrit yağlayıcı yüksek termal iletkenlik ve yüksek sıcaklıklara kadar dayanabilen yüzeylerin birbirlerine yapışmasını engelleyebilen, iş parçasının ömrünü aşınmaya karşı koruyabilen bir yağlama etkisine sahiptir [49].

3.3. SIVI YAĞLAYICILAR

- 1) Mineral yağlar, doğal olarak oluşan petrolün rafine edilmesiyle elde edilen yağlardır. Bu yağlar genellikle baz yağı olarak kullanılır ve çeşitli endüstri uygulamalarında bulunabilmektedirler [50]. Genellikle düşük maliyetli olup geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilirler. Basınç ve sıcaklık kullanım türüne göre değişen bu yağların genel tipik çalışma basıncı 200 ile 300 bar ve çalışma sıcaklığı $-20^{\circ}C$ ile $80^{\circ}C$ arasındadır [50].
- 2) Sentetik yağlar, kimyasal olarak sentezlenen ve genellikle mineral yağlardan daha yüksek performans gösteren yağlardır. Bu yağlar moleküler düzeyde tasarlanabilmektedirler [51].

Ayrıca termal ve kimyasal kararlılıkları oldukça iyi yağlardır. Genellikle şu özelliklere sahiptirler;

- a) Daha yüksek viskozite endeksi,
 - b) Daha düşük uçuculuk,
 - c) Daha düşük sürtünme,
 - d) Daha iyi oksidasyon stabilitesi,
- 3) Daha iyi düşük sıcaklık performansı [51]. Bitkisel yağlar, bazı özel uygulamalarda, biyoçözünürlük veya çevresel faktörler göz önünde bulundurularak tercih edilen yağlayıcı grubudur.
- 4) Dişli yağları, dişli sistemlerinde kullanılan özel yağlar yüksek basınç ve sürtünme koşullarında dayanıklılık sağlayan yağlayıcı grubudur. Genellikle farklı viskozite sınıfına ve geniş çalışma sıcaklık aralığında olabilen yağ grubudur. Aşağıda dişli kutuları için kullanılan viskozite sınıfları ve genel çalışma sıcaklıklarına göre yağlar aşağıda verilmiştir [52].
- a) ISO VG 68: Genellikle orta derecede yüksek viskoziteli yağdır. Çalışma sıcaklığı -18°C ile 40°C arasındadır [53].
 - b) ISO VG 100: Daha yüksek viskoziteli bir yağdır. Çalışma sıcaklığı -12°C ile 50°C arasındadır.
 - c) ISO VG 150: Daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip bir yağdır. Çalışma sıcaklığı genellikle -9°C ile 60°C arasındadır [54].
- 5) Hidrolik yağlar, hidrolik güç gerektiren makinelerde kullanılan düşük viskoziteli ve iyi bir sıvı gücü transferi sağlayan yağlayıcı grubudur. Bu yağların çalışma basıncı hidrolik sistemlerin tasarım ve kullanım amacına göre değişmekte olup, genellikle -15°C ile 60°C çalışma sıcaklığı arasında optimum performans göstermektedirler [55].
- 6) Gres yağlar, yarı katı yağlayıcı olarak bilinmektedir. -20°C ila 150°C sıcaklık aralığında ve 100.000 psi çalışma basıncına kadar dayanıklıdır ve yağlama noktalarına doğrudan etki yapılabilmektedir [56].

Bu yağlayıcılar; makine verimliliğini, dayanıklılığını ve ömrünü arttırmak için önemli bir rol oynarlar ve seçimleri genellikle kullanım koşullarına, sıcaklık aralığına, basınç ve hız gibi faktörlere bağlı olarak yapılmaktadır [57].

MMY, emülsiyon dolaşım yağlama metodu yerine açık devre yağlama metodudur [70,71]. Buda soğutma sıvıları ve ester baz yağları gibi daha temiz kullanım sunmaktadır. Yağlama miktarındaki büyük düşüş kuruya yakın iş parçalarını ve talaşlarının ortaya çıkmasına sebep olur. Bu durum ise, soğutma yağı emisyonlarının insan cildinde yol açtığı hastalıkları ve çalışma alanındaki havadan dolayı çalışanın soluk alıp vermesine bağlı sağlık risklerini önemli ölçüde düşürür [72,73]. Soğutma yağları makine etrafına yayılmaz, böylece daha temiz çalışma ortamı sağlanır [74,75].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

4.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

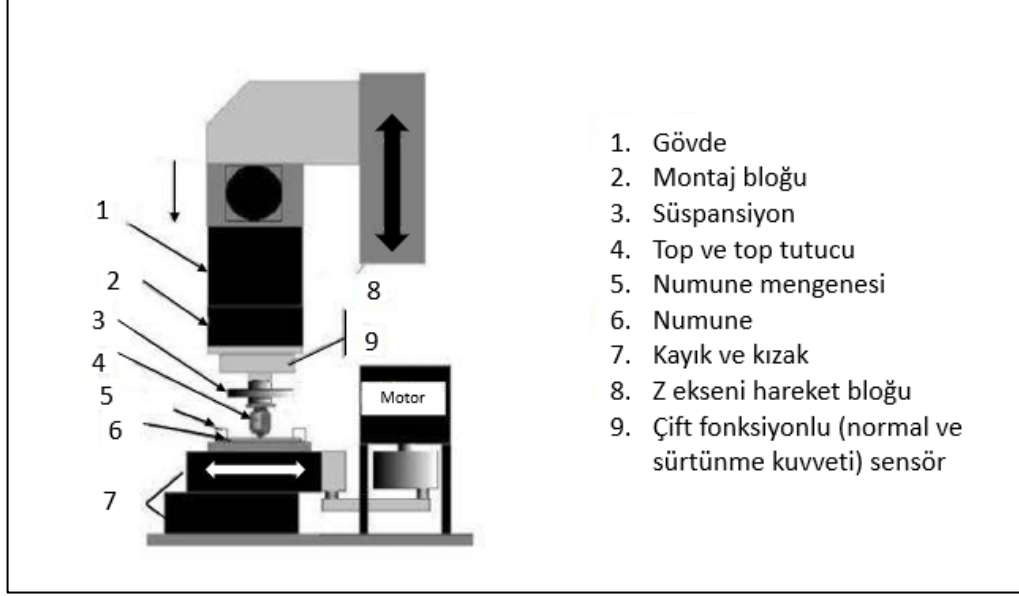
Çelik numuneleri 6 adet 30mm çapında 5mm kalınlığında olması kaydıyla kesme cihazında kesilerek hazırlanmıştır. Kesilen bu numuneler kenarlarında çapak vs. kalmaması için radüs işlemi yapılmıştır. Daha sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji x ışını (Edx) görüntüleme cihazında daha net ve canlı sonuçlar elde etmemiz için yüzeyde zımparalama ve partlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama işlemi kademeli olarak yapılmıştır. Her bir kademesinde kabadan hassasa doğru gitmektedir. En son 1200 numaralı zımpara kâğıdı ile yüzeyindeki çizikler ve yüzeyde kesmeden kaynaklı oluşan deformasyonlar tamamen arındırılmıştır. Zımparalama bittikten sonra Al_2O_3 tozları ile partlatma işlemleri yapılmıştır. En son numunelerin yüzey temizliği için alkolle yıkanıp kurutulmuştur. Böylece çelik numuneleri hazır hale getirilmiştir.

4.2. LİNEER İLERİ-GERİ (BALL ON FLAT) AŞINMA DENEYİ

Lineer ileri- geri aşınma deneyi düzeneğinde hareket lineer olarak gerçekleşmektedir. Belirli bir strok mesafesi boyunca ve hıza bağlı olarak doğrultusu değişen formdadır [76]. Düz hareket eden bir numunenin yüzeyine yük altındaki topun temas etmesiyle aşınma oluşmuştur. Bu aşınma deneyinde uygulanan yük, ileri-geri hareketi, hareket hızı, sıcaklık ve toplam yol başlıca önemli parametredendir. Toplam yol ve hız deney süresi belirlenmelidir. Aşınmayı önlemek için kullanılan yağ aşınmayı tamamen kesmeyip minimum düzeye indirmektedir. Bu nedenden dolayı yağlayıcı ortam için aşınma özelliklerinin belirlenmesi gereklidir. Bu cihazda yağlayıcı ortamda incelemeler yapıldığı gibi kuru ortamdada çalışmalar sürdürülebilmektedir. Ayrıca

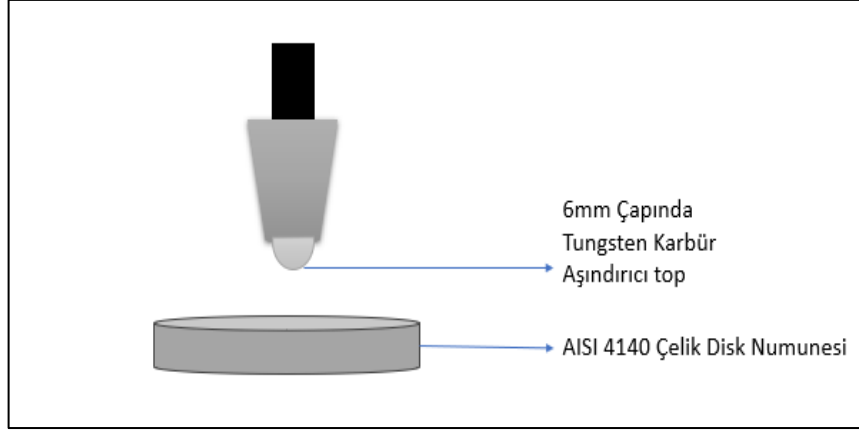
sürtünme kuvvetide belirlenerek yüzeyler arası sürtünme katsayısına ulaşılmaktadır [76].

Şekil 4.1’de aşınma deney düzeneğinin şematik yapısı verilmiştir.



Şekil 4.1. Aşınma deney düzeneği şematik gösterimi [76].

Şekilde gösterilen düzenekte kontrol panelini kullanılarak numunenin bağlandığı kısımda hareket hızı ayarlanabilmektedir. Aşındırıcı topun olduğu kısımda ise yük yüklenerek numune ile aşındırıcı topun teması sağlanmaktadır. Aşındırıcı topun numuneye ilk teması noktasaldır, daha sonra aşınma arttıkça yüzey alanı genişleyecektir. Deneyimizde 6mm çapında tungsten karbür (WC) aşındırıcı top kullanılmıştır. Şekil 4.2’de numune ve aşındırıcı topa ait şema verilmiştir.



Şekil 4.2. Çelik numunesi ve aşındırıcı top.

4.2.1. Deney Parametreleri

4.2.1.1. Numuneleri Hazırlama, Kesme, Zımparalanması ve Parlatma İşlemleri

Numuneler AISI 4140 çeliğinden olmak kaydıyla 6 adet 30mm çapında 5mm kalınlığında Metkon marka Metacut 300 model hassas kesme cihazı ile kesme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 4.3).

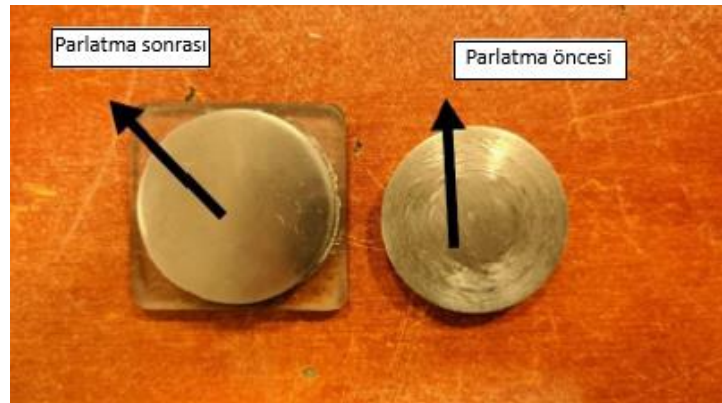


Şekil 4.3. Numuneleri kesme cihazı.



Şekil 4.4. Numunelerin kesilmesi.

Kesme işlemleri tamamlandıktan sonra numunelerin alt ve üst kenarlarına oluşan çapaklar alınıp kenarlarına pah işlemi uygulanmıştır (Şekil 4.4). Bu işlemden sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile daha hassas görüntüler elde etmek amacıyla parlatma işlemi uygulanmıştır. Metkon marka Forcipol 2V model zımparalama ve parlatma cihazına numune bağlanarak kabadan inceye doğru 120-240-320-400-600-1200 mesh numaralı SiC (Silisyum karbür) parçacıklarla kaplanmış zımparalar kullanılarak zımparalanır (Şekil 4.6). Her bir aşamada bir önceki kademedeki kalan izlerin kaybolması sağlanır. En son 1200 numaralı zımpara kâğıdı ile zımparalama işlemi sonlanmıştır. Zımparalama işleminden sonra ince tane boyutlu AL_2O_3 tozları kullanılarak numuneler parlatılmıştır. Parlatılan numuneler alkolle yıkanıp kurutulmuştur. Şekil 4.5.'te numunelerin parlatma, temizleme öncesi ve sonrası verilmiştir.



Şekil 4. 5. Numunenin parlatma, temizleme ilk ve son hali.

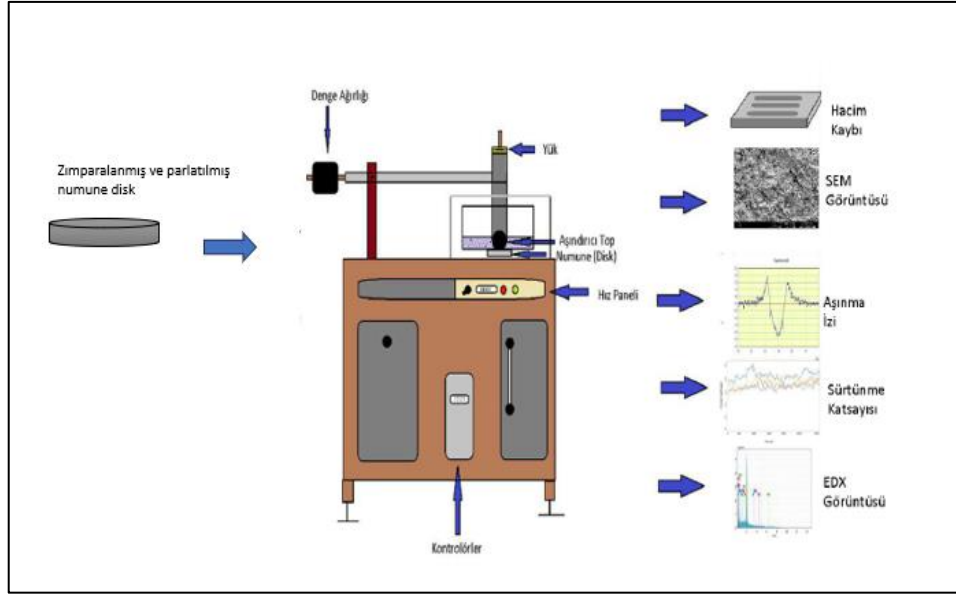


Şekil 4. 6. Zımparalama ve parlatma cihazı.

Numuneler 20N, 30 N ve 40N kuvvet uygulanarak 40mm/s hızımız ile strok uzunluğu 100m olacak şekilde, 6mm çapında tungsten karbür (WC) aşındırıcı top ile aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8). Şekil 4.7’de aşındırıcı top numuneleri gösterilmiştir.

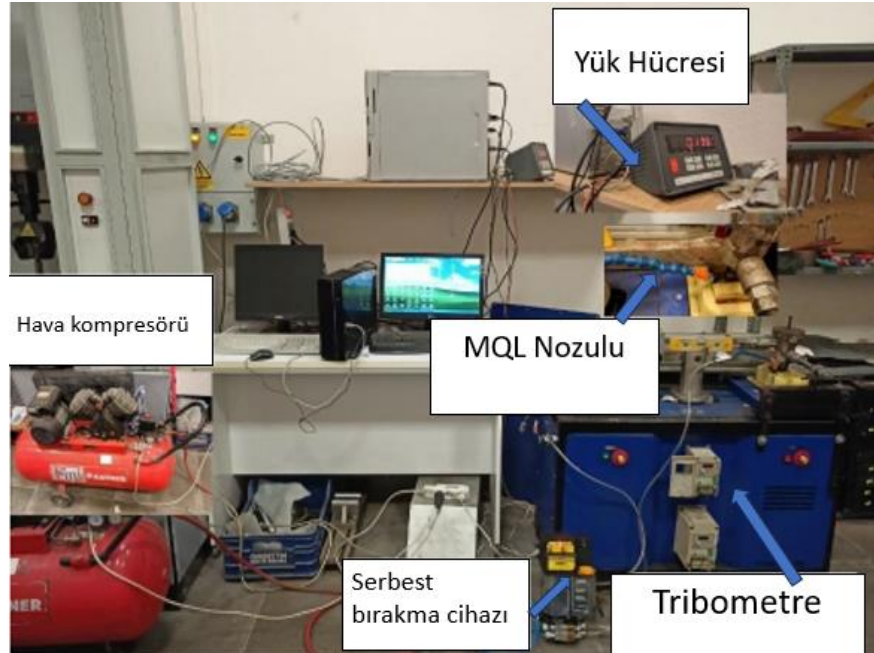


Şekil 4.7. Tungsten karbür aşındırıcı top numuneleri.



Şekil 4.8. Deneysel düzeneğin uygulama süreci işlemleri [76].

Şekilde görüldüğü üzere deneye başlamadan önce hazırlanan numunelerle birlikte istenilen yük ve yağlayıcı ortam koşulları oluşturulmuştur (Şekil 4.8).

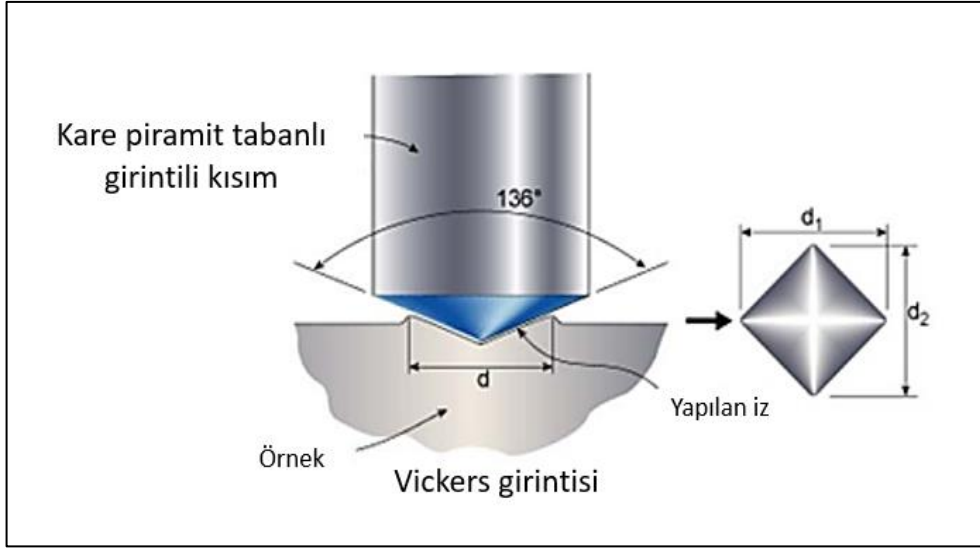


Şekil 4.9. Deneysel ortamı

Yapılan deneylerden sonra numuneler temizlenip neminden arındırılmıştır. Numuneler SEM ve EDX aşınma izi bilgileri vasıtasıyla numuneye ait hacim kaybı aşınma oranı, sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, aşınma derinliği ve aşınma genişliği hesaplanmıştır. Ayrıca numuneye ait SEM görüntüleme cihazı yardımıyla aşınma sırasında gerçekleşen aşınma mekanizmaları ve yapıları incelenmiştir.

Isıl işlem görmemiş numune, havada sertleştirilmiş numune ve yağda sertleştirilmiş numuneye ait sertlik ölçümü vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik bir rakamsal ifadelerle bir ölçüsü olup malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir. Malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasındaki ilişki çıkartılabilmektedir. Örnek verecek olursak çelik malzemelerde çekme mukavemeti sertlik ile doğrudan orantılıdır. Bir başka örnek verecek olursak malzemenin sertliği ile işlenebilirlik özelliği ters orantılıdır. Yani sert malzemeleri işlemek her zaman zordur. Sertlik ölçme yöntemleri genellikle piramit, konik ve küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına karşı gösterdiği direnç ile ölçülmektedir. Sert uca dikeysel bir kuvvet uygulanarak malzeme üzerinde bir iz oluşmaktadır. Malzemenin sertliği bu iz ile ters orantılıdır.

Bizim sertlik deneyimizde kullanılan yöntemimiz Vickers sertlik yöntemidir. Sert ucu tepe açısı 136° olan elmas kare piramit kullanılır. F yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucun bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülde yerine koyarak sertlik değerleri bulunmaktadır. Ölçüm süresi 20 sn.'dir.



Şekil 4.10.Vickers sertlik deneyi şematik gösterimi [49].

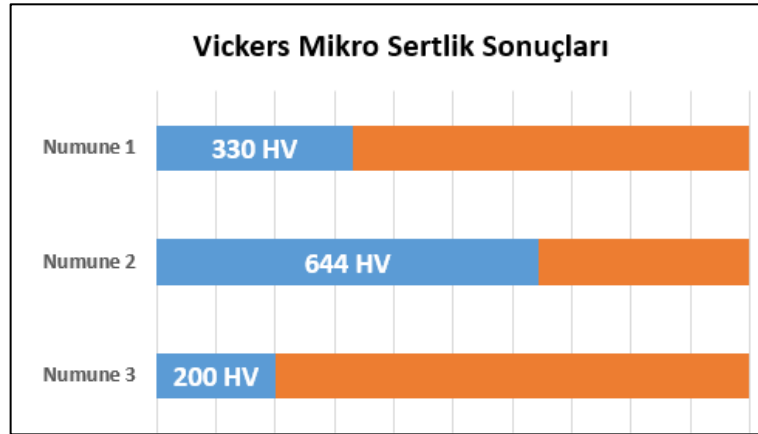
Vickers sertlik deney formülü: $1,8544 \cdot F/d^2$ 'dir. Burada F yüklenilen kuvvet değeridir. Formüldeki d ise $d=(d_1+d_2)/2$ ile hesaplanır (Şekil 4.10). Burada d1 ve d2 oluşan izin köşegen uzunluklarıdır [77].

BÖLÜM 5

BULGULAR VE SONUÇLAR

5.1. SERTLİK DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapmış olduğumuz sertlik deneyinde Vickers sertlik yöntemi kullanılmıştır. Üç numunelerden oluşan Vickers-HV1'de (1kgf) sertlik ölçüm testleri Şekil 5.1'de bar grafiğinde verilmiştir.



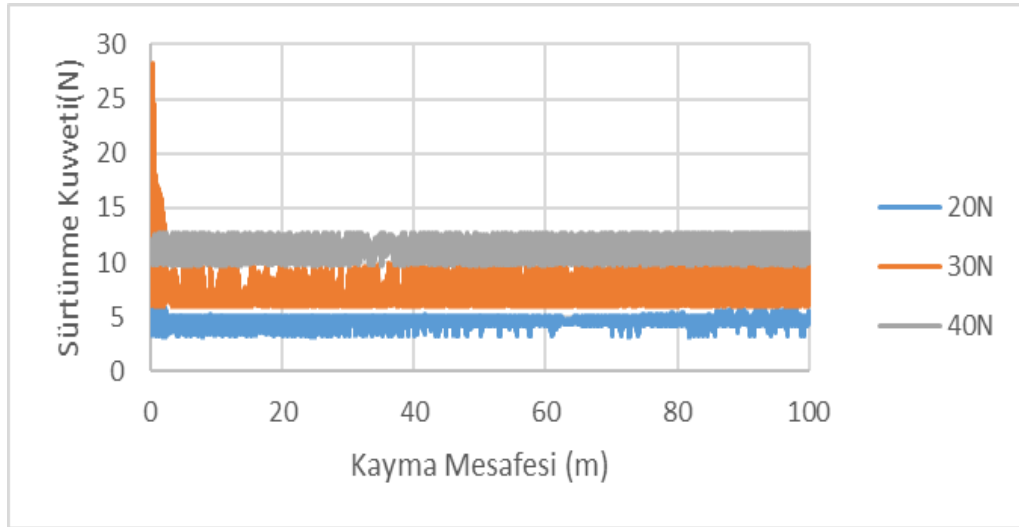
Şekil 5.1. Numunelerin vickers mikro sertlik sonuçları.

Vickers mikro sertlik test cihazı ile numunelerin sertliği sırasıyla 1 numaralı numune (havada sertleştirilmiş) 330HV, 2 numaralı numune (yağda sertleştirilmiş) 644HV, 3 numaralı numune (ısıl işlem görmemiş) 200HV olarak ölçülmüştür. Yapılan sertlik test sonuçlarına göre sertlik değerlerinin, numunelerin ısıl işlemle sertleştirme yöntemlerine bağlı olarak arttığı görülmüştür. Numuneler arasında en sert numune 644 HV sertlik değerine ulaşmasıyla 2 numaralı numune seçilmiştir. Bunun sebebi 2 numaralı numuneye ısıl işlem sonrası yağda sertleştirilme yöntemi yapılmasından kaynaklıdır. 2 numaralı numune; 1 numaralı numuneye göre %95,15; 3 numaralı numuneye ise %222 daha sert olduğu gözlemlenmiştir.

Yağda soğutulmuş numunenin diğer havada soğutulmuş ve ısıtılmış işlem görmemiş numuneye göre daha ince taneli yapıya ulaştığından dolayı tane yapısı incelidikçe malzemenin kırılma tokluğunda ve sertlik değerinde artış gözlemlenmiştir. Uzun ve arkadaşları demir çalışmalarında demir esaslı T/M parçalarının kırılma tokluğu, sertliği ve mikroyapısal incelemeleri sonucunda tane yapısının inceliği ile tokluk ve sertliğin ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir [78].

5.2. NUMUNELERİN SÜRTÜNME KUVVETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

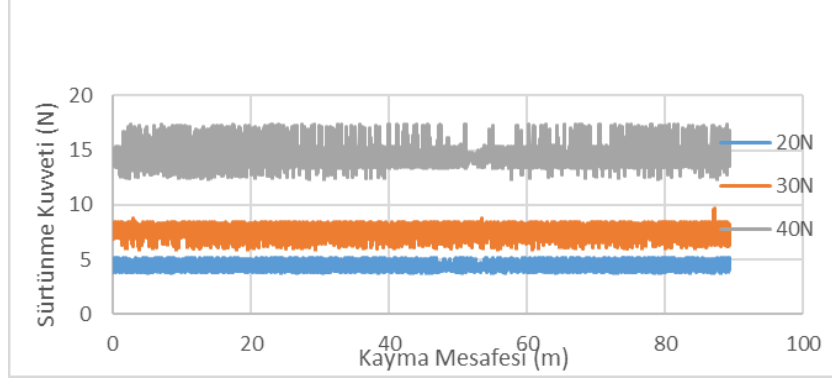
Kuru ortam şartlarında ısıtılmış işlem görmemiş numunenin kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında sürtünme kuvveti %58,69 artış ve kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise sürtünme kuvveti %144,78 artış tespit edilmiştir. Ortalama sürtünme kuvveti 7,72N'dur. Elde edilen sürtünme kuvveti değerleri 20N-30N-40N kuvvetleri sırasıyla 4,6N-7,3N-11,26N'dur.



Şekil 5.2. Kuru ortam şartlarında ısıtılmış işlem görmemiş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.

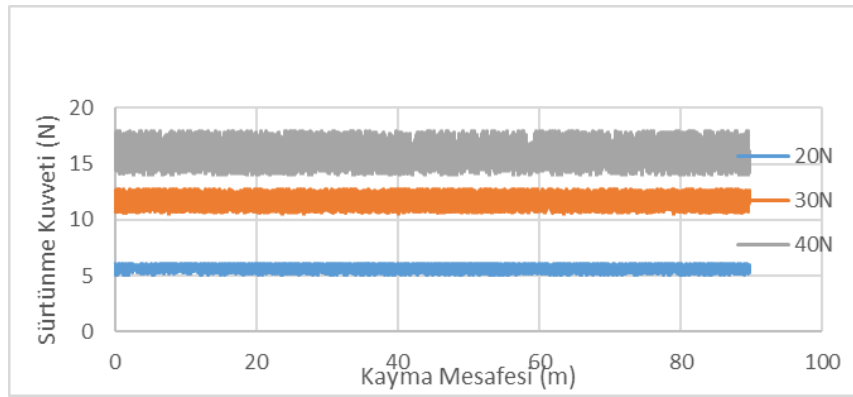
Bu verilerden yola çıkarak kuru ortamda çeliğin herhangi bir işleme maruz bırakılmadan direk aşındırıcı top ile temasından kaynaklı normal kuvvet arttıkça sürtünme kuvvetide artmıştır (Şekil 5.2).

Hava ile soğutulmuş ısıtılmış numunenin kuru ortam şartlarında kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında sürtünme kuvveti %68,31 artış ve kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise sürtünme kuvveti %224,71 artış tespit edilmiştir (Şekil 5.3). Ortalama sürtünme kuvveti 8,79N'dur.



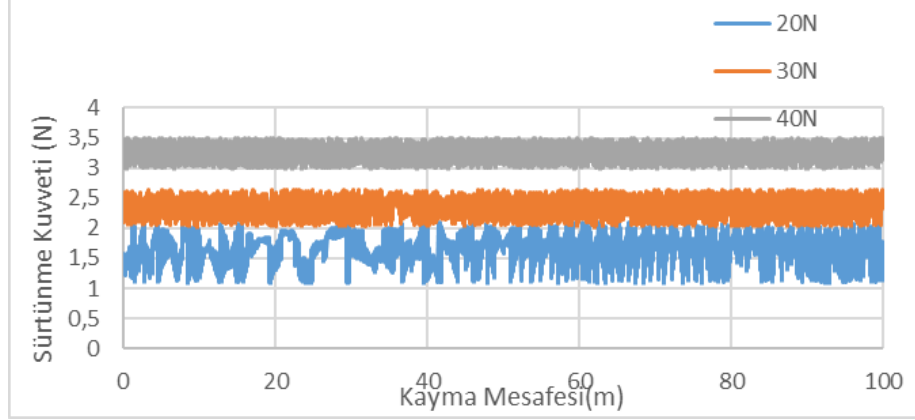
Şekil 5.3. Kuru ortam şartlarında ısıtılmış ve hava ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.

Kuru ortam şartlarında ısıtılmış ve yağ ile soğutulmuş numunede kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında sürtünme kuvveti %107,08 artış ve kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise sürtünme kuvveti %182,30 artış tespit edilmiştir (Şekil 5.4). Ortalama sürtünme kuvveti ise 11,1N'dur.



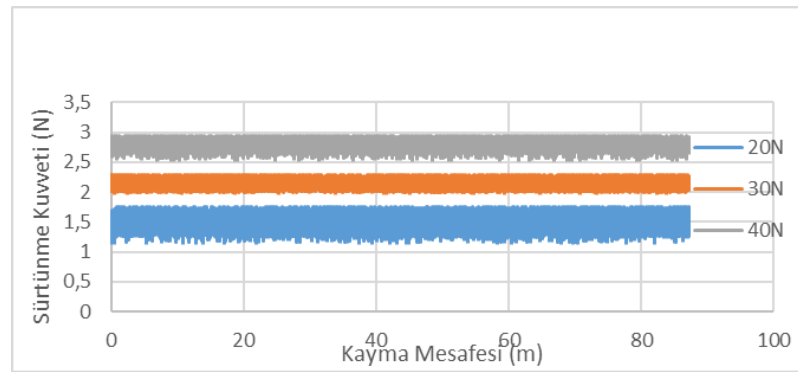
Şekil 5.4. Kuru ortam şartlarında ısıtılmış ve yağ ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.

MMY ortamda ısıtılmamış numunede kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında sürtünme kuvveti %42,16 artış ve kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise sürtünme kuvveti %95,78 artış tespit edilmiştir (Şekil5.5). Ortalama sürtünme kuvveti ise 2,42N'dur.



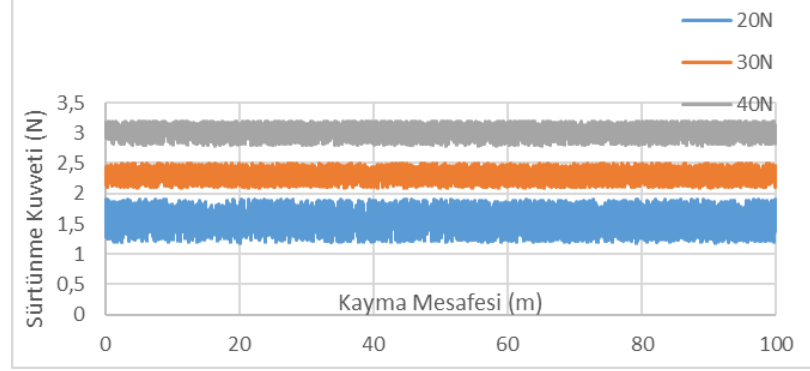
Şekil 5.5. MMY ortamında ısıtılmamış numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.

MMY ortamda ısıtılmış ve hava ile soğutulmuş numunede kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında sürtünme kuvveti %43,33 artış ve kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise sürtünme kuvveti %86,66 artış tespit edilmiştir (Şekil 5.6). Ortalama sürtünme kuvveti ise 2,15N'dur.



Şekil 5.6. MMY ortamında ısıtılmış ve hava ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.

MMY ortamında ısıl işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş numunede kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında sürtünme kuvveti %50,32 artış ve kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise sürtünme kuvveti %96,73 artış tespit edilmiştir (Şekil 5.7). Ortalama sürtünme kuvveti ise 2,28N'dur.



Şekil 5.7. MMY ortamında ısıl işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş numunenin sürtünme kuvveti ve kayma mesafesi grafiği.

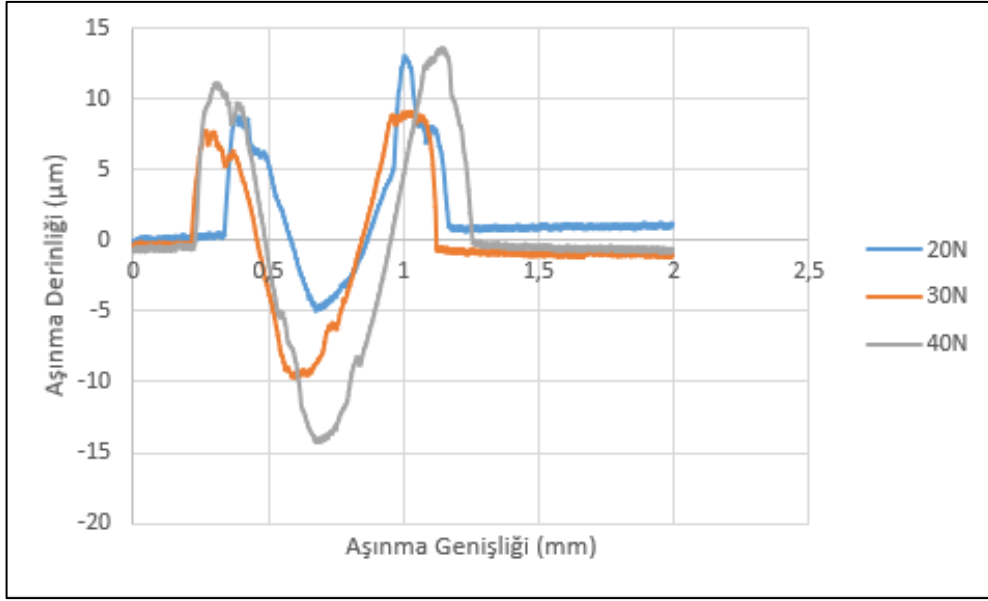
Sonuç olarak kuru ortamda ve MMY ortamında sürtünme kuvveti ve katsayı değerlendirmelere bakacak olursak örneğin 40N kuvvet değeri altında kuru ortamda ısıl işlem görmemiş çelik numunesinde sürtünme kuvveti değeri, MMY ortamında ısıl işlem görmemiş çelik numunesine göre %246.46 oranında artış gösterdiği gözlemlenmektedir.

100m kayma mesafesi, 40mm/s aşınma hızı, etki eden kuvvetler 20N-30N-40N olacak şekilde aşınma deneyleri tamamlanıp sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı, aşınma oranı, hacim kaybı, aşınma derinliği ve genişliği tespitleri edilmiştir. Sonuç olarak sürtünme kuvveti çelik numunesine uygulanan kuvvet arttıkça artmıştır. 2 farklı ortamda sürtünme kuvvetleri kıyaslandığında kuru ortamda gerçekleştirilen numuneler MMY ortamında gerçekleştirilen numunelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise numunelerdeki yağlayıcı ortamlarıdır. Yağlama sistemi metalik malzemelerde malzeme ömrüne çok büyük katkıları vardır. Bu yüzden kuru ortamda gerçekleşen numune çok daha fazla kayıplara yol açarak daha çok sürtünme kuvvetini beraberinde getirmektedir.

Lutuf ve Burhan çalışmalarında AISI 1020 çeliğinde kuru ortam şartlarında farklı kuvvet yükleri ile lineer ileri-geri aşınma test cihazında aşınma deneyi yapmıştır. Aşınma deneylerinde farklı numuneler arasından en çok aşınma direncine sahip olan numune kuru ortamda borla sertleştirilmiş numune olarak tespit etmiştir [79]. Çelik numunelerin ısıtma işlem ve soğutma yöntemlerini inceleyecek olursak aynı ortam ve aynı kuvvet altında sürtünme kuvveti sonuçları büyüklüğüne göre sırasıyla kuru ortamda ısıtma işlem görmüş yağda sertleştirilmiş çelik numunesi, kuru ortamda ısıtma işlem görmüş havada sertleştirilmiş çelik numunesi, kuru ortamda ısıtma işlem görmemiş çelik numunesi olarak sıralayabiliriz. Bunun sebebi ise 4140 çelik malzemesi 880 °C’de ısıtma işlemine tabii tutulur. Bu işlemden sonra yağda, suda ve havada sertleştirme işlemlerine maruz bırakılır. Bu işlemlerde malzemenin mikrokimyasal özelliklerine göre en iyi sertleştirme yöntemi yağda sertleştirilmiş numunedir. Çünkü yağda sertleştirilmiş çeliklerde en yüksek korozyon direnci oluşmaktadır. Yağda sertleştirilmiş numune daha mukavemetli ve dayanıklı numune olduğundan dolayı sürtünme kuvveti aynı kuvvetler altında daha düşük sonuçlar elde edilmektedir.

5.3. AŞINMA GENİŞLİĞİ VE DERİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.

Isıtma işlem görmemiş numunenin kuru ortam şartlarında aşınma genişliğine bakacak olursak kuvvet değeri 20N’den 30N’a çıktığında %27,11 artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.8). Kuvvet değeri 20N’den 40N’a çıktığında ise %38,98 artışı ve aşınma genişliği ortalamasının 0,72mm olduğu tespit edilmiştir. Aşınma derinliğinde ise kuvvet değeri 20N’den 30N’a çıktığında %108,23 artış gösterdiği, kuvvet değeri 20N’den 40’a çıktığında ise %188,8 artışı ve aşınma derinliği ortalamasının 9,67µm olduğu tespit edilmiştir.

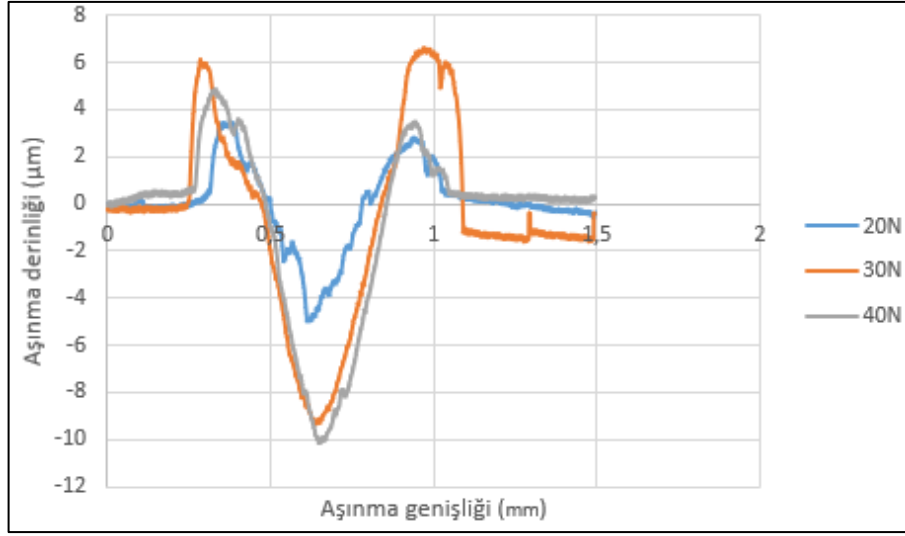


Şekil 5.8. Kuru ortam şartlarında ısıl işlem görmemiş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.

Aşınan numuneler göz önüne aldığımızda en fazla aşınma genişliği ortalaması olan numune kuru ortam şartlarında ısıl işlem görmemiş numune olmaktadır. Bunun sebebi ise çelik numunesini sertleştirmeden ve kuru ortama tabii tutulmasından kaynaklı olmaktadır. Çünkü ortamdaki yağlayıcı unsur ve malzemenin sertliği aşınmayı doğrudan etkilemektedir.

Hava ile soğutulmuş ısıl işlem görmüş numunenin kuru ortam şartlarında aşınma genişliğine bakacak olursak kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %20,34 artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.9). Kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise %3,38 arttığı ve aşınma genişliği ortalamasının 0,63mm olduğu tespit edilmiştir.

Aşınma derinliğinde ise kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %90,90 artış gösterdiği, kuvvet değeri 20N'dan 40'a çıktığında ise %100 arttığı ve aşınma derinliği ortalamasının 8,1µm olduğu tespit edilmiştir.

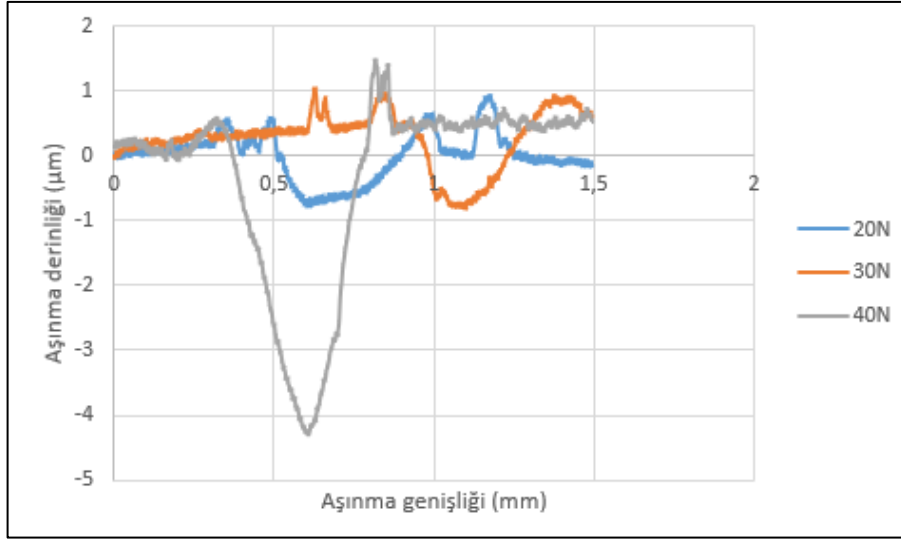


Şekil 5.9. Kuru ortam şartlarında ısıl işlem görmüş ve hava ile soğutulmuş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.

Kuru ortamda ısıl işlem görmüş hava ile soğutulmuş numuneye göre MMY ortamında ısıl işlem görmüş hava ile soğutulmuş numune ortalama %16,75 aşınma genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin aynı olup ortamların farklı olmasıyla birlikte MMY ortamında yağlama etkisiyle aşınma kuru ortama göre daha düşük sonucuna varılmıştır.

Yağ ile soğutularak ısıl işlem görmüş numunenin kuru ortam şartlarında aşınma genişliğine bakacak olursak kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %68,63 azalma gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.10). Kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise %94,8 azalma ve aşınma genişliği ortalamasının 0,35mm olduğu tespit edilmiştir.

Aşınma derinliğinde ise kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %45,33 artış gösterdiği, kuvvet değeri 20N'dan 40'a çıktığında ise %470,66 arttığı ve aşınma derinliği ortalamasının 2,04 µm olduğu tespit edilmiştir.

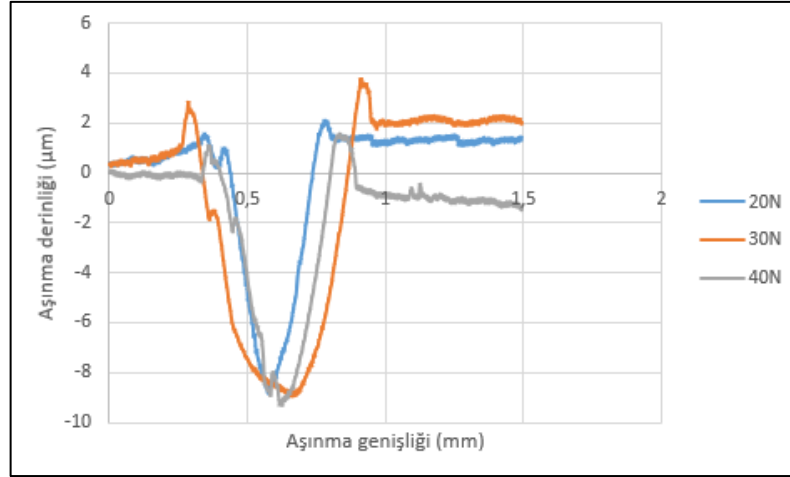


Şekil 5.10. Kuru ortam şartlarında ısıl işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.

Yağda sertleştirilmiş numuneler hacim kaybı olarak ve aşınma olarak en düşük sonuçlar ortaya çıkan numunelerdir. Çünkü ısıl işlemden sonra sertleştirme olarak yağ kullanılması çelik numunesine dayanım, tokluk ve mukavemet kazandırdığı için bu yöntem tercih edilebilmektedir. Bu numunenin yağda sertleştirilmiş hali MMY ortamında gerçekleştiği zaman sonuçlar dahada düşük çıktığı tespit edilmiştir. Çünkü hem çelik numunesi tok ve mukavemetli, hem de yağlı ortamda gerçekleştiği için aşındırıcı top ile numunenin teması sonucu arasında oluşan yağ tabakası aşınmayı minimize etmektedir.

Hava ile soğutulmuş ısıl işlem görmüş numunenin MMY ortam şartlarında aşınma genişliğine bakacak olursak kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %36,17 artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.11). Kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise %2,12 artış ve aşınma genişliği ortalamasının 0,53 mm olduğu tespit edilmiştir.

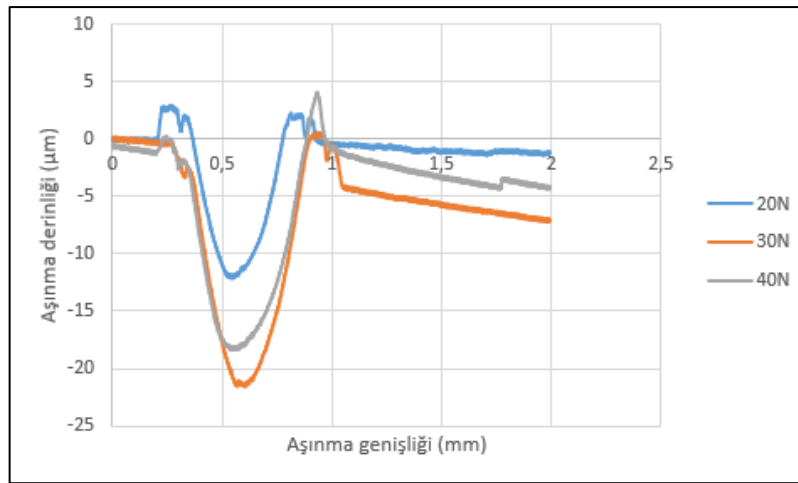
Aşınma derinliğinde ise kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %3,04 artış gösterdiği, kuvvet değeri 20N'dan 40'a çıktığında ise %8,42 arttığı ve aşınma derinliği ortalamasının 8,87 µm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.11. MMY ortamda ısıl işlem görmüş ve hava ile soğutulmuş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.

Isıl işlem görmemiş numunenin MMY ortam şartlarında aşınma genişliğine bakacak olursak kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %30,35 artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.12). Kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise %23,21 artış ve aşınma genişliği ortalamasının 0,66mm olduğu tespit edilmiştir.

Aşınma derinliğinde ise kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %80,08 artış gösterdiği, kuvvet değeri 20N'dan 40'a çıktığında ise %53,44 arttığı ve aşınma derinliği ortalamasının 17,19 µm olduğu tespit edilmiştir.

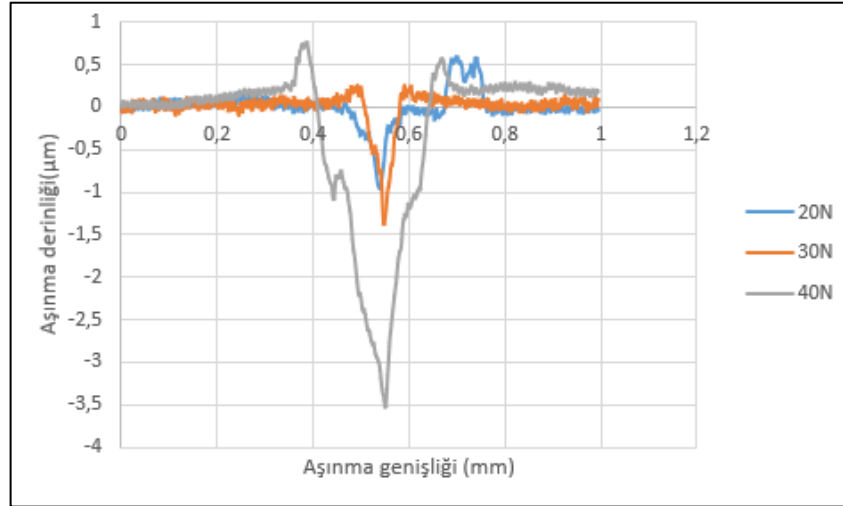


Şekil 5.12. MMY ortamında ısıl işlem görmemiş numunenin aşınma derinliği ve genişliği grafiği.

MMY ortamda ısıtılmış işlem görmemiş çelik numunesi kuru ortamda işlem görmemiş çelik numunesinden aşınma genişliği ortalama 0,6mm daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi ortamda kullanılan yağlayıcıdır. Aşındırıcı top ile numune arasındaki temasta oluşan yağ tabakası aşınmayı azaltmaktadır.

Yağ ile soğutulmuş ısıtılmış işlem görmüş numunenin MMY ortam şartlarında aşınma genişliğine bakacak olursak kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %125 artış gösterdiği görülmüştür. Kuvvet değeri 20N'dan 40N'a çıktığında ise %600 artış ve aşınma genişliği ortalamasının 0,13mm olduğu tespit edilmiştir.

Aşınma derinliğinde ise kuvvet değeri 20N'dan 30N'a çıktığında %52,22 artış gösterdiği, kuvvet değeri 20N'dan 40'a çıktığında ise %286,66 arttığı ve aşınma derinliği ortalamasının 1,91 μm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.13. MMY ortamında ısıtılmış işlem görmüş ve yağ ile soğutulmuş aşınma derinliği ve genişliği grafiği.

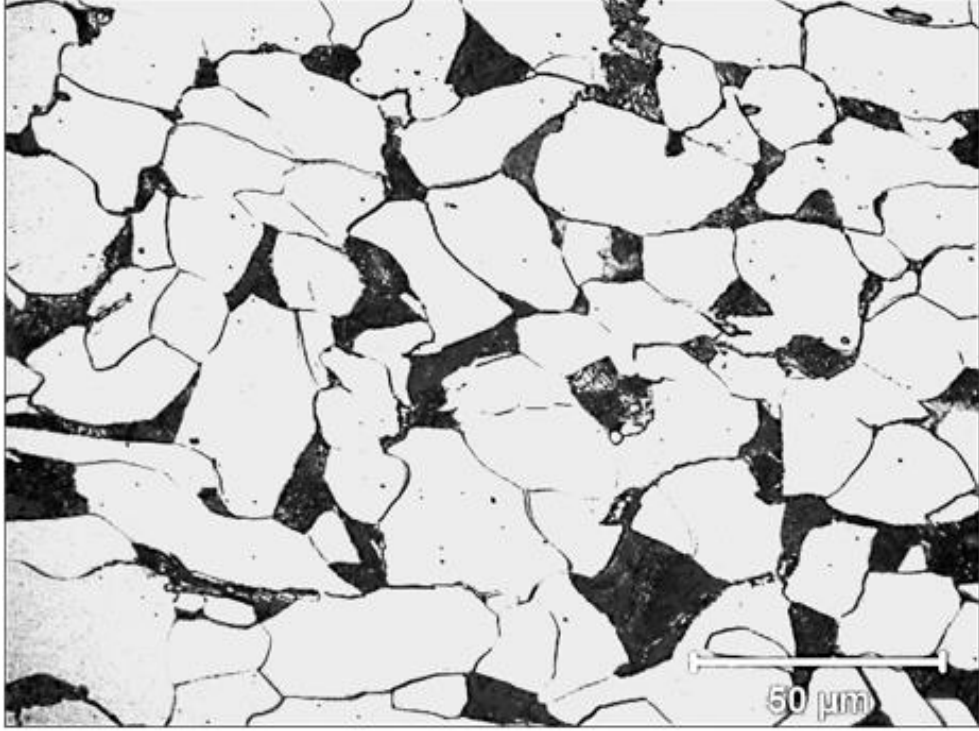
Aşınma deneylerine göre sertlik ve aşınma dayanımı arasındaki ilişki doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Yağda sertleştirilmiş numunenin diğer numunelere göre daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.13). Aynı şekilde artan yük dağılımına göre aşınma oranında artış göstermiştir. Çelik numuneler arasındaki aşınma oranı en az MMY ortamda gerçekleştirilmiş ısıtılmış işlem görmüş ve yağda soğutulmuş numunesinde gerçekleşmiştir.

5.4. NUMUNELERİN HACİM KAYBI VE AŞINMA ORANLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.

Deneyde kullanılan iki farklı sertleştirme uygulanan ve iki farklı ortamda gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonuçlarından yola çıkarak en az aşınma oranı ortalaması 40N kuvvet yükü ile ısıtılmış yağda sertleştirilmiş kuru ortamda gerçekleşmiş numunede 0,0000365 çıkmıştır. 20N'dan 30N'a yağ ile sertleştirilmiş numunede kuru ortamda yapılan deneyde %54.70 oranla düştüğü tespit edilmiştir. Aynı yük değerinde, aynı numune için hacim kaybıda %54.70 düşmüştür. Bu tespitten aşınma oranı hacim kaybına bağlı olduğu söylenilebilir. Ayrıca numunede hacim kaybının artan yüke göre düşmesi malzemenin yüke karşı dayanıklı mukavemetli olduğunu göstermektedir. Havada sertleştirilmiş çelik numunelerine bakacak olursak MMY ortamda yapılan numuneler kuru ortamda yapılan numunelere göre yük değeri 20N'dan 30N'a geçişte MMY ortamdaki numune %40,31 artış gösterirken kuru ortamdaki numune %129.73 oranında hacim kaybına uğramıştır. Bunun nedeni ise yine MMY ortamında numune ve aşındırıcı top arasındaki yağ filmi malzeme ömrüne katkı sağlayarak aşınma ve hacim kaybını minimize etmektedir [80]. İslah çelikleri, takım çelikleri ve tüm birbiri ile temas eden makine parçalarında dikkat edilmesi gereken iki husus vardır. Birincisi malzemenin cinsi, hangi alanda kullanılacağı, sertlik yönteminin nasıl yapılacağıdır. Yani genel olarak malzeme seçimi de diyebiliriz. İkinci olarak ise çalışma ortamıdır. Yağlı ortamda gerçekleşen numuneler malzeme ömrüne ciddi oranda katkı sağlamaktadır. Bu sayede sürtünme kuvvetinde de azalmalar meydana gelmektedir [81,82].

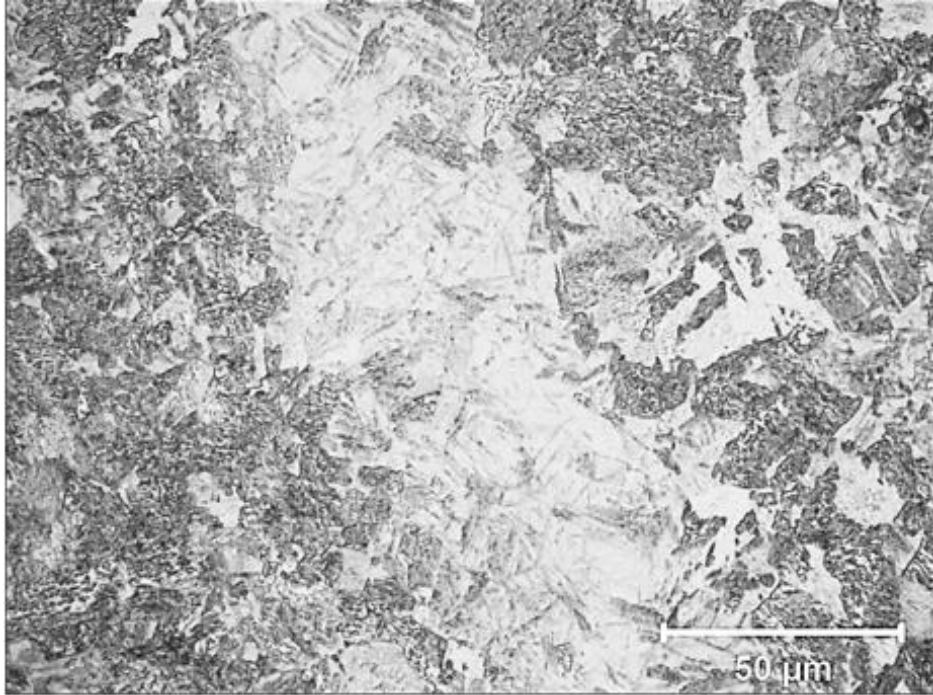
5.5 SERTLEŞTİRİLMİŞ NUMUNELERİN MİKROYAPI İNCELENMELERİ

İŞlem görmemiş elik genellikle ısıl işleme göre daha düşük mukavemete, düşük dayanıma ve düşük sertliğe sahiptir. SEM görüntüsünde görüldüğü ısıl işlem görmemiş elik numunesinde mikroyapısı ve kimyasal bağları bozulmamıŐtır ve görünüm homojen yapıdadır. Tane boyutları ve yapıları haddeleme yönüne göre deĐiŐmemektedir. Ayrıca yapıda martenzit ve östenit yapılar mevcuttur (Şekil 5.14). Gr ve arkadaşları Ramor 50 eliğinin 5 farklı ısıl işlem sonuçlarında (ısıl işlem görmemiş, suda sertleştirilmiş, yağda sertleştirilmiş, havada sertleştirilmiş ve fırında sertleştirilmiş) mikro yapı incelemelerinde ısıl işlem görmemiş numunede SEM görüntüleri sonucunda martenzit ve östenit yapılar görüldüğü ve homojen yapılar elde edildiğini tespit etmişlerdir [81,83].



Şekil 5.14. Isıl işlem görmemiş elik numunesi SEM görüntüsü.

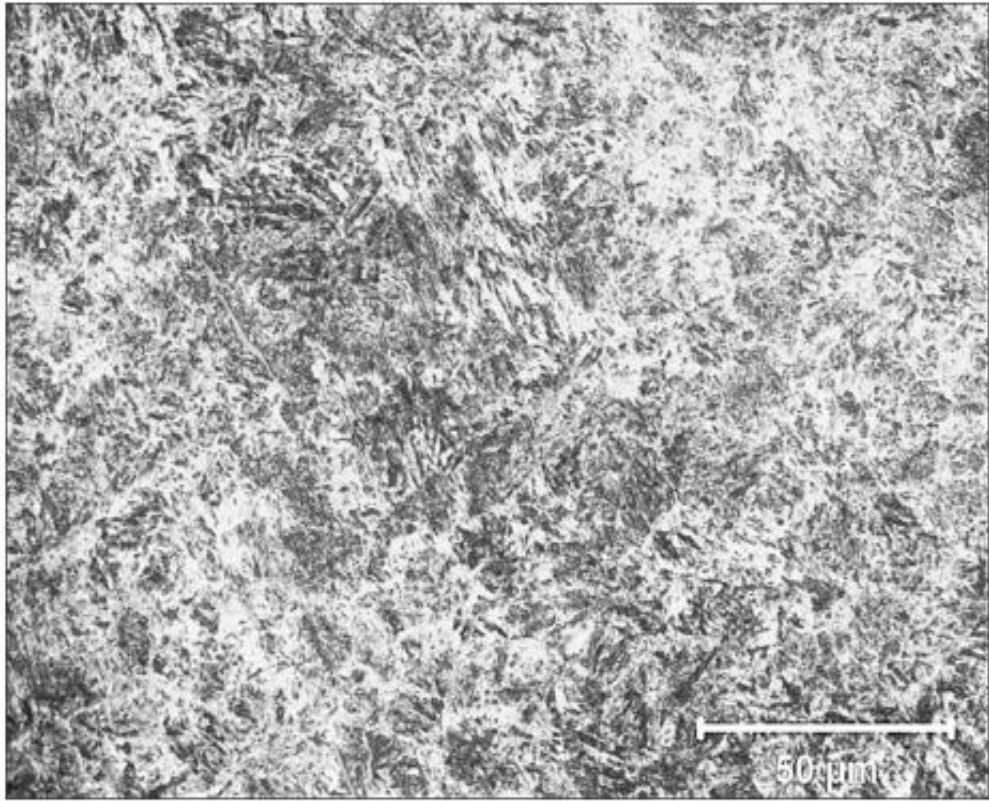
Isıl işlem görmüş havada soğutulmuş numunede dayanım olarak yağda sertleştirilmiş numuneye göre zayıf kalmıştır (Şekil 5.15). Bu sertleştirilme yöntemi durgun havada, soğutucu hava fanı ile ve basınçlı hava fanı ile olmak üzere üç yöntemle yapılmaktadır. Genellikle takım çelikleri hava ile sertleştirilme sağlanır. Bunun sebebi ise çeliğin merkez çekirdeğine kadar aynı derecede sertleşmesinden dolayıdır. Bu işlem çeliğin iç yapısını değiştirerek daha sert ve dayanıklı hale getirir. Avantajları ise hızlı soğutma, azaltılmış deformasyon riski, daha iyi işlenebilirlik ve ekstra mukavemettir [84–86].



Şekil 5.15. Havada soğutulmuş çelik numunesinin SEM görüntüsü.

Isıl işlem görmüş yağda soğutulmuş çelik numunesi mikroyapısal incelemelerde diğer iki numunelere göre bağları daha kuvvetli ve aşınmaya dirençli bir yapıya ulaştığı gözlemlenmektedir (Şekil 5.16). Soğutmada kullanılan yağ alevlenme sıcaklığı çok yüksek olan madeni yağ kullanılmaktadır. Yağda sertleştirme işlemi suda sertleştirme işlemine benzer. Fakat soğuma süreleri suda sertleştirmede çok daha kısadır. Suda sertleştirilen çeliğin sertlik tabakası ince olur ve özüne kadar çelik sertleştirilemez. Fakat yağda sertleştirilen bu çeliğin hem sertlik tabakası kalın olur hem de sertlik daha derinlere inmesi sağlanır.

Ayrıca yağda sertleştirilen bu numunenin korozyon direnci en yüksek seviyededir. Demir ve arkadaşları 30MnV5-6 mikro alaşımlı çeliği yağda ve havada sertleştirildiğinde ham malzemenin roswell sertlik ölçüm değeri 44 HRC, havada sertleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm değeri 47 HRC ve yağda sertleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm değeri 52 HRC çıkmıştır. Burda sonuç olarak yağda sertleştirilmiş çelikler havada sertleştirilmiş ve ısıtılmamış çeliklere göre daha tok ve daha mukavemetli oldukları anlaşılmıştır [87–89].

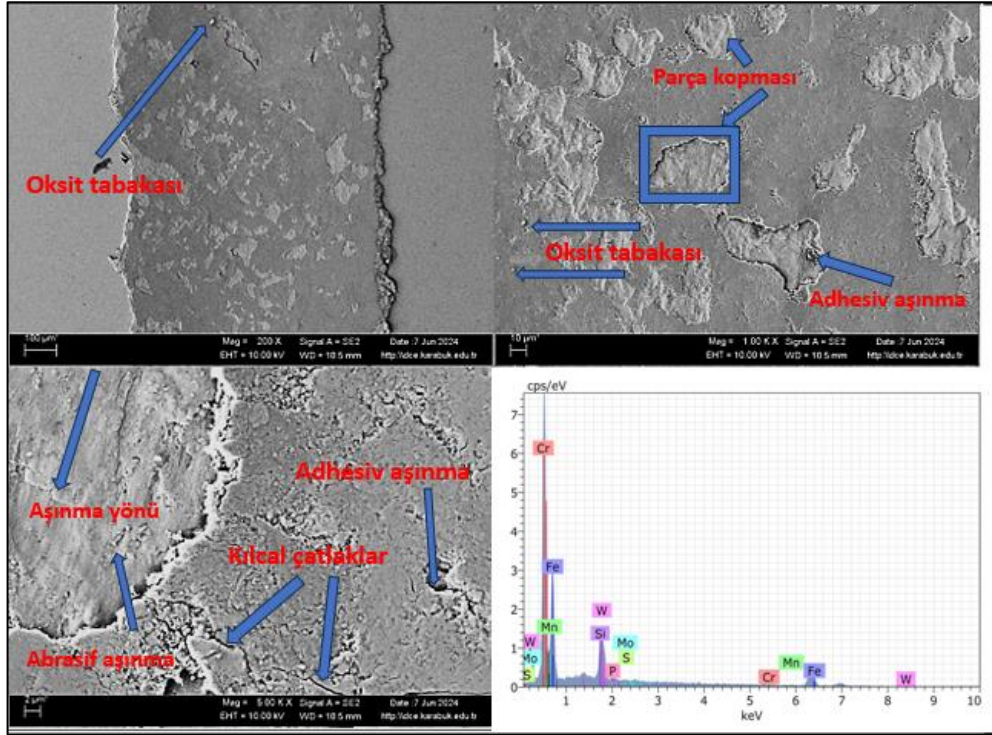


Şekil 5.16. Yağda soğutulmuş çelik numunesi SEM görüntüsü.

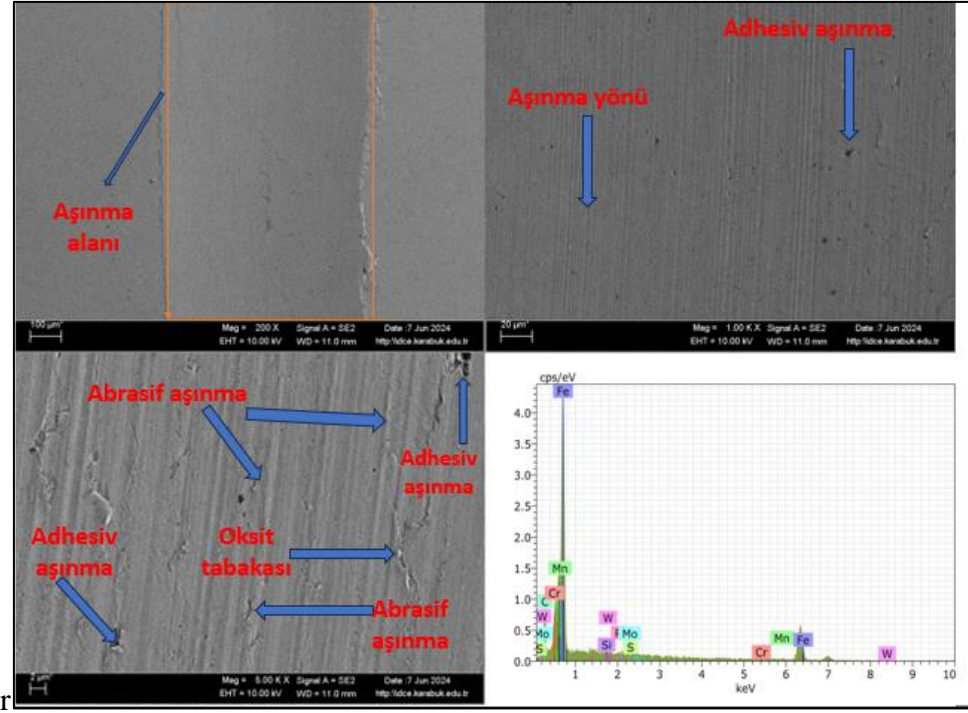
5.6 SEM VE EDX ANALİZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.

5.6.1 Sem Görüntülerin Analizi

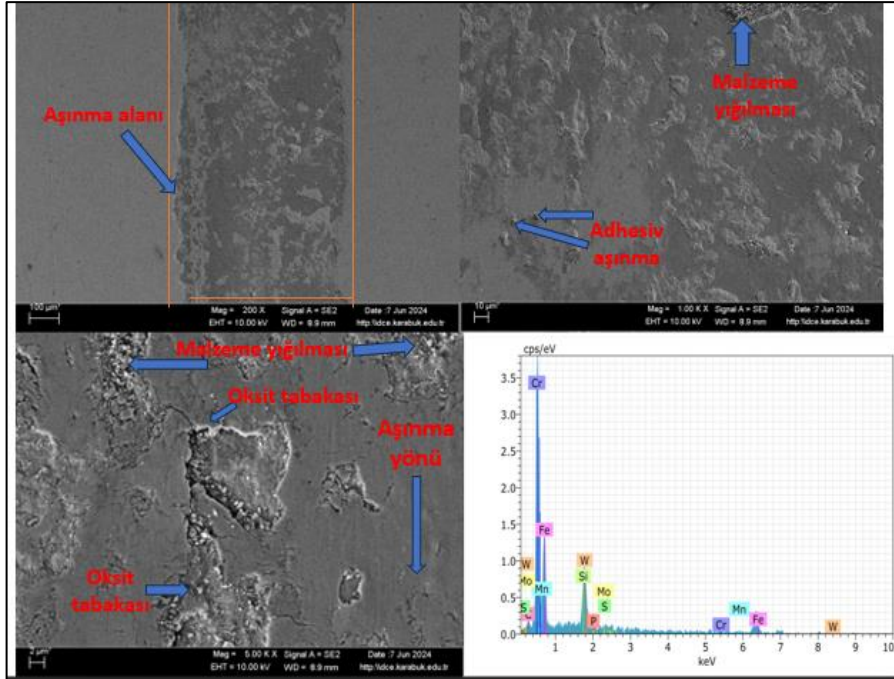
Numuneler Ø30mm, 5mm kalınlığında olup, lineer ileri-geri aşınma cihazında Ø6mm tungsten karbür aşındıcı top ile çelik numuneleri kuru ortam ve yağlama ortamlarında 20N, 30N ve 40N yüklemeler sonucunda oluşan aşınma izlerini ZEISS SMART görüntüleme cihazında SEM görüntüleri 200x, 1kx ve 5kx zoom görüntüleri alınmıştır. Aşınma deneyleri sonucu çelik numunelerin yüzeylerinde meydana gelen aşınma izi SEM görüntüsü ve Edx grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



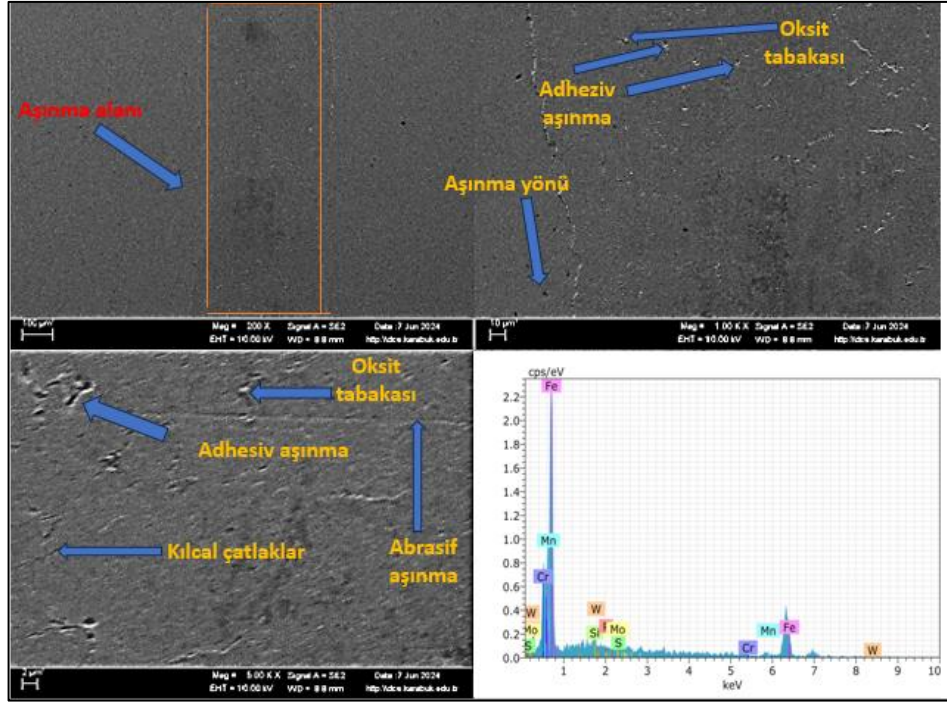
Şekil 5.17. Kuru ortamda ısıtılmış işlem görmemiş çelik numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.



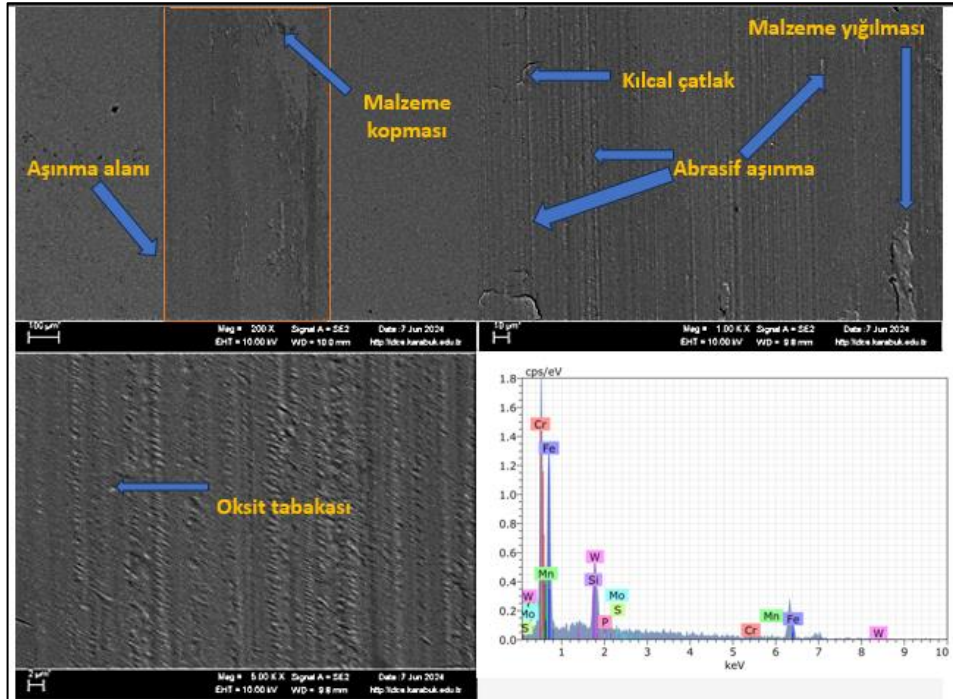
Şekil 5.18. MMY ortamında ısıl işlem görmemiş numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.



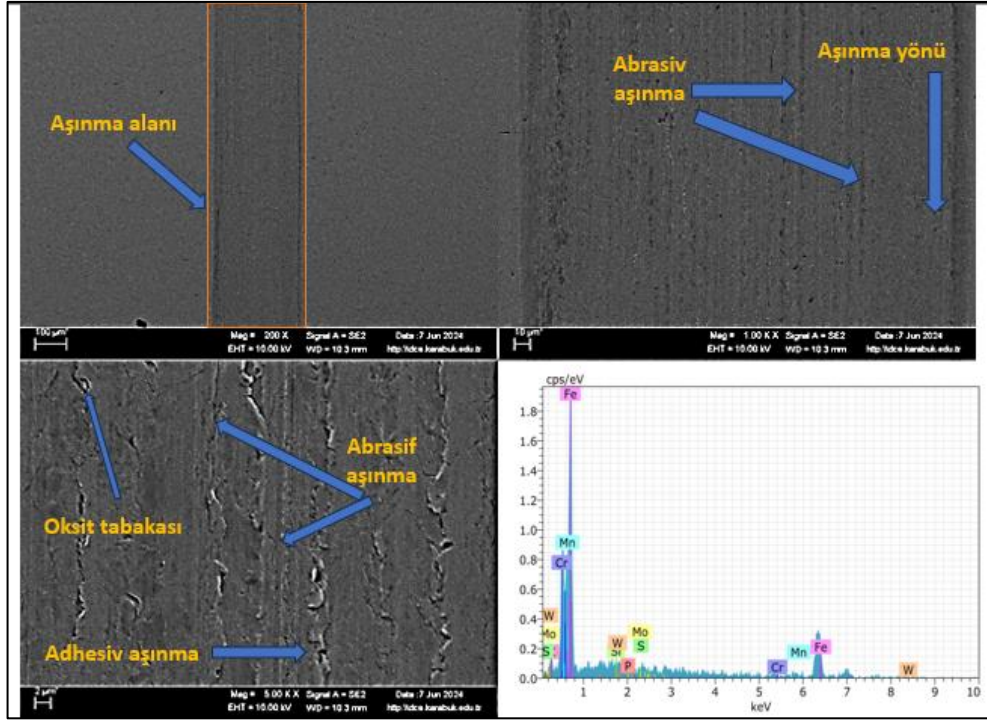
Şekil 5.19. Kuru ortamda ısıl işlem görmüş hava ile soğutulmuş numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.



Şekil 5.20. MMY ortamda ısıl işlem görmüş hava ile soğutulmuş numunenin 200x, 1kx, 5kx zoom SEM analizi ve edx grafiği.



Şekil 5.21. Kuru ortamda ısıl işlem görmüş yağ ile soğutulmuş çelik numunesinin SEM analizi ve edx grafiği.



Şekil 5.22. MMY ortamında ısıl işlem görmüş yağ ile sertleştirilmiş çelik numunesinin SEM analizi ve edx grafiği.

SEM görüntüleri incelendiğinde MMY ortamında ısıl işlem görmüş yağda soğutulmuş çelik numunesi en çok aşınmaya karşı direnç gösteren numune olmuştur (Şekil 5.22). Duran ve arkadaşlarının çalışmasında da borlama işlemi ile sertleştirilmiş numunede en yüksek yükte dahi iyi bir aşınma dayanımını ve aşınma direnci gösterdiği grafikler ve deneysel sonuçlarda görülmüştür [90]. Dolayısıyla aşınma oranı, aşınma derinliği, aşınma genişliği grafikleri ile SEM görüntüleri birbirleri ile tutarlılık göstermiştir. Ayrıca yağda sertleştirilmiş numunede oluşan mikro krater boyutları, ısıl işlem görmemiş numunede oluşan çukurcuklardan küçüktür (Şekil 5.17). Bu durum Kosa'nın çalışmasında 880HV sertliğinde olan St37 çelik numunesi ile 185HV sertliğinde olan St37 çelik numunesinin aşınma deneylerinde de bizim çalışmamıza benzer şekilde sertliği yüksek St37 çelik numunesinde daha küçük yapıda mikro kraterler gözlemlenmiştir [91]. Bu numunede abrasiv aşınma mekanizması ve adhesiv aşınma mekanizması bir arada görülmüştür. SEM görüntülerine göre kuru ortamda ısıl işlem görmemiş numunede ve kuru ortamda ısıl işlem görmüş havada soğutulmuş çelik numunelerinde aşınma sırasında malzeme yığılması, parça kopması gibi deformasyonlar meydana gelmiştir (Şekil 5.19).

Bu durum malzeme ömrünü kısaltmasına ve hacim kaybına yol açmaktadır [92]. Hacim kaybını düşürmek malzemeyi bulunduğu ortamı MMY ile desteklenmelidir (Şekil 5.18). Gök ve arkadaşları nitrürlenmiş AISI 4140 çelik numunesinde aşınma deneyleri gerçekleştirdiğinde ısıtılmış işlem görmemiş çelik numunesinin nitrürlenmiş çelik numunesine göre daha az hacim kaybı ve daha fazla aşınma performansı gösterdiği kanısına varmışlardır [93]. MMY ortamda aşınan numunelerde ise daha çok abrasiv aşınma mekanizması meydana gelmiştir ve bunun sebebi ise aşınma ortamına bağlıdır (Şekil 5.20). Dhar ve arkadaşları çalışmalarında AISI 4340 çeliğinin tungstern karbür uç ile aşınma çalışmalarında deneysel sonuçlar elde etmişlerdir. Sonuç olarak MMY ortamında aşınan ve aşındırıcı numunenin sıcaklığın azalması ile temas noktalarında abrasiv aşınma meydana gelmiş ve aşınma hacim kaybında diğer numunelere ve ortamlara göre düşük göstermiştir [16]. Ayrıca kuru ortamda yapılan numunelerde özellikle işlem görmemiş çelik numunesinde kılcal çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 5.21). Aynı numunenin MMY ortamında aşınma durumuna baktığımızda ise kılcal çatlak ve malzeme yığılmasından ziyade abrazif aşınma mekanizması meydana geldiği tespit edilmiştir [83].

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında AISI 4140 çelik numunesinden 3 adet (ısıl işlem görmemiş, havada sertleştirilmiş ve yağda sertleştirilmiş) 5mm kalınlığında 30mm çapında numuneler 20N-30N ve 40N yük değerleri ile tungsten karbür (WC) aşındırıcı topun 40mm/s hızı ile 100m strok uzunluğunda lineer ileri-geri aşınma cihazında kuru ortam ve MMY ortamında aşınma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kullanılan üç numuneye vickers sertlik yöntemi ile her biri 20sn. süren sertlik deneyleri yapılmıştır. Numunelerin aşınma yüzeylerinin incelenmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı ile edx, map ve 200x, 1kx ve 5kx zoom ile görüntülerde meydana gelen yüzey deformasyonları analiz edilmiştir.

- 1) Numunelerin vickers sertlik deney sonuçlarında ısıl işlem görmemiş numune 200HV sertlik değeri, havada sertleştirilip ısıl işlem görmüş numune 330HV sertlik değeri ve yağda sertleştirilip ısıl işlem görmüş numune ise 644HV sertlik değeri test edilmiştir. Yağda sertleştirilmiş numune diğer sertleştirilme yöntemlerine göre mikroyapının ve çekirdek yapısının içine nüfuz ederek daha ince taneli yapı haline getirerek malzemeye mukavemet, sertlik ve tokluk elde edilmiştir.
- 2) Numuneler arasında en yumuşak yapıya sahip numune ise ısıl işlem görmemiş ham numune olmaktadır. Çünkü tane yapıları diğer ısıl işlem görmüş numunelere göre daha kalındır.
- 3) Aşınma deneylerinde ise MMY ortamında gerçekleşen numuneler kuru ortamda gerçekleşen numunelere göre aşınma oranı ve hacim kaybı, sürtünme kuvveti daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.
- 4) Numuneler arasında en çok aşınma dayanımı gerçekleşen deney MMY ortamında yağda sertleştirilip ısıl işlem görmüş numune olmuştur.

- 5) Kuru ortamda gerekleŒen numunelerde MMY ortamında gerekleŒen numunelere göre daha fazla adhezif aŒınma, kılcal çatlaklar ve aŒınma yüzeyinde parça kopmaları meydana gelmiŒtir. Bu yüzden maliyet, sağlık, kullanılabilirlik, takım ömrü ve iŒlenilebilirlik açısından yerine göre diğer yağlama yöntemlerinden ziyade MMY ortamının kullanılabilirliği nerilmiŒtir.
- 6) AISI 4140 eliği takım ve ıslah çeliği olduğu için kesici takımlar, diŒli kutuları içerisinde kullanılan diŒli çarklar, miller, Œarflar gibi kullanım alanlarında yağda sertleŒtirme yapılarak MMY ortamda aŒınmayı azaltarak malzeme ömrüne katkı sağladığına ulaŒılmıŒtır.
- 7) İŒlem grmemiŒ elik numunelerinde MMY ortamda ve kuru ortamda gerekleŒen aŒınma deneyinde aŒınma geniŒliėi MMY ortamında daha az çıkmasının sebebi aŒındırıcı ile aŒınan numune arasında oluŒan yağ tabakası aŒınmayı azaltmıŒtır.
- 8) Bu tezdede amaçlar arasında MMY sisteminin avantajları deney sonuçlarında açıklanarak kullanılabilirliği ön plana ıkmıŒtır.

KAYNAKÇA

1. Kus, A., Isik, Y., Cemal Cakir, M., Coşkun, S., and Özdemir, K., "Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting", *Sensors (Switzerland)*, 15 (1): 1274–1291 (2015).
2. Asiltürk, İ., Kuntoğlu, M., Binali, R., Akkuş, H., and Salur, E., "A Comprehensive Analysis of Surface Roughness, Vibration, and Acoustic Emissions Based on Machine Learning during Hard Turning of AISI 4140 Steel", *Metals*, 13 (2): 437 (2023).
3. Demirpolat, H., Binali, R., Patange, A. D., Pardeshi, S. S., and Gnanasekaran, S., "Comparison of Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Forces, Tool Tip Temperature, and Chip Shape during Sustainable Turning of Bearing Steel", *Materials*, 16 (12): 4408 (2023).
4. Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M., and 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*, 11 (3): 101 (2023).
5. Kocabaş, M., Yılmaz, H., and Cansever, N., "Heat Treatment Effect Of Hexagonal Boron Nitride Reinforced Electroless Nickel Coatings", *Journal Of Boron*, (2019).
6. Baygut, A., Başdemir, V., ve Culha, O., "Soğuk Dövme Prosesi ile 20MnB4 Hammadde Kullanılarak Üretilen Cıvatanın Isıl İşlem Şartlarının Metalografik ve Mekanik Özelliklere Olan Etkisinin İncelenmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (4): 837–845 (2018).
7. Altan, Özbek, N. and Saraç, E., "Temperleme Isıl İşlem Sıcaklıklarının AISI 4140 Çeliği Üzerine Etkilerinin Araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (3): 1574–1586 (2019).
8. Ulutan, M., "Ç-4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışların İncelenmesi", Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (235): 245 (2007).
9. Erdoğan, A., Ünal, O., Gök, M., Özdemir, S., and Alkan, S., "Bilyalı Dövme ve Plazma Nitrürleme İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımına Etkisi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12 (2): 1126–1135 (2024).

10. Çağan, S. Ç., Buldum, B. B., and Özkul, İ., "Hafif Metallerde Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Sisteminin Kullanımı", *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5 (2): 582–590 (2018).
11. Tong, Y., Zhang, T., and Zhang, S., "Influence of Oxides on the Formation of Self-Lubricating Layer and Anti-Wear Performance During Sliding", *Tribology International*, 179: 108188 (2023).
12. Okada, M., Hosokawa, A., Asakawa, N., and Ueda, T., "End Milling of Stainless Steel and Titanium Alloy in an Oil Mist Environment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74 (9–12): 1255–1266 (2014).
13. Tian, J., Qi, X., Li, C., and Xian, G., "Friction Behaviors and Wear Mechanisms of Multi-Filler Reinforced Epoxy Composites under Dry and Wet Conditions: Effects of Loads, Sliding Speeds, Temperatures, Water Lubrication", *Tribology International*, 179: 108148 (2023).
14. Mitevski, B., Kurtulan, D., and Hanke, S., "The Influence of Submechanisms of Abrasion on the Wear of Steels Under Lubricated Sliding", *Wear*, 477: 203836 (2021).
15. Bollig, P., Faltin, C., Schiebl, R., Schneider, J., Maas, U., and Schulze, V., "Considering the Influence of Minimum Quantity Lubrication for Modelling Changes in Temperature, Forces and Phase Transformations during Machining", *Procedia CIRP*, 31: 142–147 (2015).
16. Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., and Ahmed, M., "Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 172 (2): 299–304 (2006).
17. Gönülçalar, Y., E., "AISI 4140 Malzemesinin Tornalanmasında Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Kullanımının İşlenebilirlik Üzerine Etkisi", (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi), *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman, 1–26 ,(2018).
18. Etri H., E., "Tribological and Surface Morphological Characteristics Of Titanium Alloy Against Coated Carbide" M. Sc. Thesis, *Karabuk University, Institute of Science*, Karabuk, 32–41, (2022).
19. Akben, U., "Minimum Miktarda Yağlama ile Kesmenin Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 1: 12–42 (2009).
20. Gencer, S. K., "Sertleştirme Isıl İşlem Yöntemlerinin AISI 4140 Kalite Çeliğin Mekanik ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 34-40, (2020).

21. Ulutan, M., Yıldırım, M., M., Buytoz, S., and Çelik, O. N., "Microstructure and Wear Behavior of TIG Surface-Alloyed AISI 4140 Steel", *Tribology Transactions*, 54 (1): 67–79 (2010).
22. Kılıç, M., Gök, S., ve Adıyaman, O., "TiC-C İle Kaplanan AISI 1040 Çelik Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi", *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29 (1): 275–291 (2024).
23. Akin, B., Dani, D., and Do, M. A. N., "Bor Kaplama Yapılan St 50-2, AISI 1045 ve C-22 Çeliklerinin Sertlik, Mikroyapı ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çorum,38-42 (2017).
24. Uzun, G. and Çiftçi, "Investigation on The Effects of Mechanical Features of AISI 5140 Steel on Tool Wear and Cutting Forces", 15 (6): 29–34 (2012).
25. Güner, E., "4140 Çeliğinin Mekanik Aşınma Özelliklerine Lazerle Yüzey Sertleştirme İşleminin Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın, 9–15 (2019).
26. Duran, M. C., "100Cr6 Çeliğinden Burç İmalatında İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Uygulaması ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 15-21 (2016).
27. Binali, R., Ulaş, H. B., and Demir, H., "Toolox 44 Malzemesinde Talaş Kaldırma Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", *NWSA Academic Journals*, 13 (1): 19–28 (2018).
28. Kaplan, Y., Yıldırım, A., and AKSÖZ, S., "Nitrokürizasyon Sonrası Oksidasyon İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 23 (4): 1357–1362 (2020).
29. Gül, F., Dilipak, H., ve Yamanoglu, O., "Kriyojenik İşlem Yapılmış Soğuk İş Takım Çeliklerinin Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi ve İstatistiksel Analizi", *Politeknik Dergisi*, 24 (3): 1129–1135 (2021).
30. Keskin, İ. and SAVAŞ, Ö., "Kam Profillerinin Değme Analizi ve Elastohidrodinamik Yağ Filmi Kalınlığı", *Journal Of Marine and Engineering Technology*, 3 (2): 57–66 (2023).
31. Bhushan, B. and Ko, P. L., "Introduction to Tribology", *Applied Mechanics Reviews*, 56 (1): B6–B7 (2003).
32. Kılıçarslan Y., S., "Dolgu Malzemesi Türü ve Oranlarının Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışına Etkisi", *Electoral Governance Jurnal Tata Kelola Pemilu Indonesia*, 12 (2): 6 (2020).
33. Çelikyurek, İ., Baksan, B., Torun, O., and Gürler, R., "Boronizing of iron aluminide Fe72Al28", *Intermetallics*, 14 (2): 136–141 (2006).

34. Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Shibi, C. S., Ross, N. S., Singh, G., Demirsöz, R., Jamil, M., and Królczyk, G. M., "Tribological characteristics of additively manufactured 316 stainless steel against 100 cr6 alloy using deep learning", *Tribology International*, 188: 108893 (2023).
35. Küçük Kurt, M., "Borlanmış AISI M35 ve AISI M42 Çeliklerinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 98-102, (2015).
36. Kayalı, Y., "Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 4 (3): 410–419 (2011).
37. Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M., and Salur, E., "Different Aspects of Machinability in Turning of AISI 304 Stainless Steel: A Sustainable Approach with MQL Technology", *Metals*, 13 (6): 1088 (2023).
38. Sarıkaya, Ö., "Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri", *Korozyon Derneği Yayını Ankara*, 1–60 (2007).
39. Dağlar, A., "Borlanmış Dişli Çeliklerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Bautechnik*, 34 (5): 1–6 (2013).
40. Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Collado, A. G., and Krolczyk, G. M., "Erosion characteristics on surface texture of additively manufactured AISi10Mg alloy in SiO₂ quartz added slurry environment", *Rapid Prototyping Journal*, 28 (5): 916–932 (2022).
41. Gupta, M. K., Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., and Ross, N. S., "Wear and Friction Mechanism of Stainless Steel 420 Under Various Lubrication Conditions: A Tribological Assessment With Ball on Flat Test", *Journal Of Tribology*, 145 (4): (2023).
42. Ersöz, E. and Ovalı, İ., "AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğine Uygulanan Endüstriyel Kriyojenik İşlemin Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkisi", *Journal Of Polytechnic*, (2018).
43. Dikmen, S., "AISI 4140, AISI 1050 ve AISI 8620 Çelikleri İçin Soğutma Ortamının Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 12-18, (2010).
44. Kılıç, E. F., "Alüminyum Alaşımılı SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 21-32, (2007).

45. Tunç, L. T., "AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin frezelemede MQL şartlarının takım ömrüne etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (4): 1665–1678 (2019).
46. Sert, A., "AISI M2 Takım Çeliğinin Mikroyapısı ve Mekanik Davranışları Üzerine Derin Kriyojenik Isıl İşlemin ve Temperlemenin Etkisi", *Deu Muhendislik Fakültesi Fen Ve Muhendislik*, 22 (66): 801–811 (2020).
47. Ünal, H. ve Yetgin, S. H., "Yüksek Hız ve Basınç Şartlarında Çalışan Yüksek Performanslı Polietereeterketon Termoplastik Polimerinin Aşınma ve Sürtünme Davranışlarının Belirlenmesi", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10 (2): 392–401 (2022).
48. Gökçeli, G., Bozoğlu, S., and Karatepe, N., "Cobalt-molybdenum bimetallic catalyst effect on biomass-derived graphitic carbon", *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, 174: 106152 (2023).
49. Çelik, Ç., "Nano Boyutta Hegzagonal Bor Nitrür Titanyum Diborür İlave Edilmiş Sıcak Preslenmiş Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi", 9 (1): 76–99 (2010).
50. Abachi, S., Akkök, M., and İlhan Gökler, M., "Wear analysis of hot forging dies", *Tribology International*, 43 (1–2): 467–473 (2010).
51. Gold, P. W., Schmidt, A., Dicke, H., Loos, J., and Assmann, C., "Viscosity–pressure–temperature behaviour of mineral and synthetic oils", *Journal Of Synthetic Lubrication*, 18 (1): 51–79 (2001).
52. Herdan, J. M., "Trends in gear oil additives", *Lubrication Science*, 9 (2): 195–206 (1997).
53. Pradhan, D. and Mishra, A. K., "Analysis of ISO VG 68 bearing oil for condition monitoring collected from an externally pressurized ball bearing system", *Materials Today: Proceedings*, 44: 4602–4606 (2021).
54. Marques, P. M. T., Martins, R. C., and Seabra, J. H. O., "Experimental measurement of rolling bearing torque loss in a modified Four-Ball machine: An improved setup", *Lubrication Science*, 32 (5): 245–259 (2020).
55. Khamnounsak, C. and Likit, S., "The study effects of the characteristics of hydraulic oil on calibration of hydraulic pressure balance", *Journal Of Physics: Conference Series*, 1380 (1): 012018 (2019).
56. Sheng feng, X. and Xiu xiang, C., "Research on the Characteristics of Greases of Nano - Modified MoS2 Additive on the Basis of CTAB", *Journal Of Physics: Conference Series*, 1676 (1): 012125 (2020).

57. Danish, M., Gupta, M. K., Rubaiee, S., Ahmed, A., and Korkmaz, M. E., "Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718", *Tribology International*, 163: 107178 (2021).
58. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Yilmaz, H., Ross, N. S., Boy, M., Sivalingam, V. K., Chan, C. K., and Raman, J., "Towards specific cutting energy analysis in the machining of Inconel 601 alloy under sustainable cooling conditions", *Journal Of Materials Research And Technology*, 27 (September): 4074–4087 (2023).
59. Çamlı, K. Y., Demirsöz, R., Boy, M., Korkmaz, M. E., Yaşar, N., Giasin, K., and Pimenov, D. Y., "Performance of MQL and Nano-MQL Lubrication in Machining ER7 Steel for Train Wheel Applications", *Lubricants*, 10 (4): 48 (2022).
60. Ross, N. S., Ganesh, M., Ananth, M. B. J., Kumar, M., Rai, R., Gupta, M. K., and Korkmaz, M. E., "Development and potential use of MWCNT suspended in vegetable oil as a cutting fluid in machining of Monel 400", *Journal Of Molecular Liquids*, 382: 121853 (2023).
61. Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., and Gupta, M. K., "A novel use of hybrid Cryo-MQL system in improving the tribological characteristics of additively manufactured 316 stainless steel against 100 Cr6 alloy", *Tribology International*, 173: 107613 (2022).
62. Ross, N. S., Ganesh, M., Srinivasan, D., Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., and Krolczyk, J. B., "Role of sustainable cooling/lubrication conditions in improving the tribological and machining characteristics of Monel-400 alloy", *Tribology International*, 176: 107880 (2022).
63. Kuzu, A. T., Wu, W., Stephenson, D. A., Bakkal, M., Hong, J., and Shih, A. J., "High-throughput Dry and Minimum Quantity Lubrication Drilling of Compacted Graphite Iron", *Procedia CIRP*, 46: 87–90 (2016).
64. Gupta, M. K. and Korkmaz, M. E., "A conceptual framework for sustainability impact assessment in machining bohrer tool steel under hBN-enriched nano cutting fluids environment", *Sustainable Materials And Technologies*, 37: e00669 (2023).
65. Binali, R., Patange, A. D., Kuntoğlu, M., Mikolajczyk, T., and Salur, E., "Energy Saving by Parametric Optimization and Advanced Lubri-Cooling Techniques in the Machining of Composites and Superalloys: A Systematic Review", *Energies*, 15 (21): 8313 (2022).
66. Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Yılmaz, H., Şirin, Ş., Ross, N. S., Jamil, M., Królczyk, G. M., and Sharma, V. S., "Real-time monitoring and measurement of energy characteristics in sustainable machining of titanium alloys", *Measurement*, 224: 113937 (2024).

67. Kuntoğlu, M., Kaya, K., and Binali, R., "Investigation of Surface Roughness Changes in The Machining of Carbon Steel Under Sustainable Conditions", *International Conference On Pioneer And Innovative Studies*, 1: 163–167 (2023).
68. Nimel Sworna Ross, K., G, M., Anwar, S., Rahman, M. A., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Alfaify, A., and Mia, M., "Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication", *Tribology International*, 155: 106762 (2021).
69. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Demirsöz, R., Boy, M., Yaşar, N., Günay, M., and Ross, N. S., "On tribological characteristics of TiC rollers machined under hybrid lubrication/cooling conditions", *Tribology International*, 174: 107745 (2022).
70. Ross, N. S., Rai, R., Ananth, M. B. J., Srinivasan, D., Ganesh, M., Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., and Królczyk, G. M., "Carbon emissions and overall sustainability assessment in eco-friendly machining of Monel-400 alloy", *Sustainable Materials And Technologies*, 37: e00675 (2023).
71. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Çelik, E., Ross, N. S., and Günay, M., "A sustainable cooling/lubrication method focusing on energy consumption and other machining characteristics in high-speed turning of aluminum alloy", *Sustainable Materials And Technologies*, e00919 (2024).
72. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., Yaşar, N., Krolczyk, G. M., and Günay, M., "Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A", *Journal Of Manufacturing Processes*, 69: 112–124 (2021).
73. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Ross, N. S., and Sivalingam, V., "Implementation of green cooling/lubrication strategies in metal cutting industries: A state of the art towards sustainable future and challenges", *Sustainable Materials And Technologies*, e00641 (2023).
74. Basmacı G., "Tornalamada Minimum Miktarda Yağlama Tekniğinin Takım ve İş Parçası Üzerine Etkilerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-4 (2012).
75. Gupta, M. K., Nieslony, P., Sarikaya, M., Korkmaz, M. E., Kuntoğlu, M., and Królczyk, G. M., "Studies on Geometrical Features of Tool Wear and Other Important Machining Characteristics in Sustainable Turning of Aluminium Alloys", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing - Green Technology*, 10 (4): 943–957 (2023).
76. Özdemir, M., T., Uğur, A., Demirsöz, R., "Ball on Flat Abrasif Aşınma Deney Düzenegi Tasarımı ve İşlem Basamakları." *Ases International Health Engineering And Sciences Congress Book*, 100-107, 2022, Ankara.

77. Güney, F. and Kam, M., "AISI 8620 (20NiCrMo2) Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Kriyojenik İşlemin Etkisinin İncelenmesi", *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 3 (2): 22–31 (2022).
78. Tim, F. and Tim, D., "Demir Esaslı Tım Parçaların Kırılma Tokluğu, Sertliği ve Mikro Yapısal Karakterizasyonu", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (1): 76–83 (2002).
79. Ertürk, L. and Selçuk, B., "Aşınma Test Cihazından Alınan Veriyi İşleyen Bir Program Geliştirilmesi", *Uluslararası Muhendislik Arastırma Ve Gelistirme Dergisi*, (2023).
80. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., and Demirsöz, R., "Understanding the lubrication regime phenomenon and its influence on tribological characteristics of additively manufactured 316 Steel under novel lubrication environment", *Tribology International*, 173: 107686 (2022).
81. Etri, H. E. L., Singla, A. K., Özdemir, M. T., Korkmaz, M. E., Demirsöz, R., Gupta, M. K., Krolczyk, J. B., and Ross, N. S., "Wear performance of Ti-6Al-4 V titanium alloy through nano-doped lubricants", *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 23 (3): 147 (2023).
82. Günay, M. and Korkmaz, M. E., "Understanding the Relationship between Surface Quality and Chip Morphology under Sustainable Cutting Environments", *Materials*, 17 (8): 1826 (2024).
83. Gupta, M. K., Niesłony, P., Korkmaz, M. E., Kuntoğlu, M., Królczyk, G. M., Günay, M., and Sarikaya, M., "Comparison of Tool Wear, Surface Morphology, Specific Cutting Energy and Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloys Under Hybrid and Green Cooling Strategies", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology*, (2023).
84. Gür, A. K., Taşkaya, S., and Özay, Ç., "Araştırma Makalesi / Research Article Ramor 500 Çeliğinde Isıl İşlemin Mikroyapı , Mikrosertlik ve Abrasiv Aşınma Direncine Etkisinin Taguchi Metoduyla Değerlendirilmesi The Evaluation of the Effect of Heat Treatment on Microstructure , Microhardness and ", 8 (3): 1045–1056 (2019).
85. Ulutan, M., Yildirim, M. M., Çelik, O. N., and Buytoz, S., "Tribological properties of borided aisi 4140 steel with the powder pack-boriding method", *Tribology Letters*, 38 (3): 231–239 (2010).
86. Rao, G. A., Srinivas, M., and Sarma, D. S., "Influence of modified processing on structure and properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel 718", *Materials Science And Engineering A*, (2006).
87. Demir H, Özlü B. "Sertleştirilmiş 30MnVS6 Mikroalaşımli Çeliğın Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Açısından İşlenebilirliğinin Araştırılması.", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 2009;25(1):262-271.

88. Carvalho, M. M., Lopes, N. F., dos Santos, C. A., Schroeder, R. M., and da Costa, E. M., "Hydrogen embrittlement susceptibility of AISI 4140 alloy-steel under cathodic protection and in H₂S and CO₂ environment", *Engineering Failure Analysis*, 161: 108327 (2024).
89. Yalçın, E. D., Güler, O., Karabacak, A. H., Çanakçı, A., Varol, T., Kocaman, M., Çelebi, M., and Akçay, S. B., "Pre-hardening water quenching effect on the wear resistance of TiCN coated 4140 steels", *Surface And Coatings Technology*, 480: 130591 (2024).
90. Duran H, Özkan D, Karaoğlanlı C., "Borlama İşlemi Uygulanmış Inconel 718 Süperalaşımın Mikroyapı, Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.", *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*;11(1):61-72, 2021.
91. Kosa, E., "Çeliklerin Eroziyon-Abrazif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi", Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 30-45 (2016).
92. Devaraju, A., Elaya Perumal, A., Alphonsa, J., Kailas, S. V., and Venugopal, S., "Sliding wear behavior of plasma nitrided Austenitic Stainless Steel Type AISI 316LN in the temperature range from 25 to 400°C at 10⁻⁴bar", *Wear*, 288: 17–26 (2012).
93. Çay, V., V., Yıldız, F., Erdoğan A., "The Effect Of Temperature and Nitration On Dry-Sliding Wear Mechanisms in AISI 4140 Steel", *International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019)*, (November): (2019).

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet YALNIZ; ilk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü, Raylı Sistemler Mühendisliği programında öğrenime başlayıp 2021 yılında 3,07 GANO ile mezun oldu. 2020 yılında Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. kurumuna bağlı Ankara Şeker Fabrikası’nda üretim ve bakım onarım departmanında göreve başladı. 2022 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı.