



**AISI 2205 DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK  
MALZEMELERİN FARKLI ORTAMLARDA  
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**2023  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Murat CANBAZ**

**Tez Danışmanları  
Prof. Dr. Mustafa YAŞAR  
Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ**

**AISI 2205 DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN FARKLI  
ORTAMLARDA TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Murat CANBAZ**

**Tez Danışmanları**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ**

**T.C.**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Temmuz 2023**

Murat CANBAZ tarafından hazırlanan “AISI 2205 DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN FARKLI ORTAMLARDA TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YAŞAR .....

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ .....

2.Danışman, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Mektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 03/07/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. Yusuf Aytaç ONUR (BEUN) .....

Üye : Prof. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Nafiz YAŞAR (DPÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ (KBÜ) .....

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

Prof. Dr. Müslüm KUZU .....

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.”*

Murat CANBAZ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **AISI 2205 DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN FARKLI ORTAMLARDA TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Murat CANBAZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanları:**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ**

**Temmuz 2023, 66 sayfa**

Bu çalışmada, Paslanmaz çelikler oldukça yüksek korozyon direnci özellikleri nedeniyle başta hijyenin söz konusu olduğu birçok sanayi uygulamasında tercih edilmektedir. Sadece sanayi uygulamaları değil hayatın tüm alanında kullanılmaya devam edilen paslanmaz çeliklerin aşınma dirençlerinin yüksek olması parça veya sistem ömrü açısından oldukça büyük öneme sahiptir. Bu araştırmada çeşitli ortam koşullarında AISI52100 paslanmaz çelik bilyalara karşı AISI2205 ferritik-östenitik paslanmaz çelik malzemenin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tribolojik testler, Minimum Miktarda Yağlama (MQL - Minimum Quantity Lubrication) ve nanografen içeren MQL yağlama koşulları ve buna ek olarak kuru ortamlarda ball-on-flat aşınma test cihazı kullanılarak AISI2205 numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri arasında 100 m kayma mesafesi, 80 mm/s kayma hızı bulunurken, yükler 30, 40 ve 50 N olarak seçilmiştir. Sürtünme kuvveti

değerleri grafiksel olarak elde edilmiş, ortaya çıkan aşınma izleri üzerinde yapılan ölçümler kullanılarak hacim kaybı değerleri elde edilmiştir. Aşınma izlerinin Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM - Scanning Electron Microscope) görüntülemeleri ve Enerji Dağılım Xışını Spektrometresi (EDX - Energy Distribution X-ray Spectrometer) analizleri yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlar, en düşük hacim kaybı değerinin nanografen içeren MQL yağlama koşulunda gerçekleştiğini göstermiştir. Ayrıca kuru ortam ve 50 N yükte en yüksek aşınma derinliği değeri 85,84  $\mu m$  olarak ölçülmüştür. Ayrıca 3,5 N olan en düşük sürtünme kuvveti değeri nanografen içeren MQL yağlama koşulunda ve 30 N yük altında yapılan deneylerde elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Ball-on-flat, abrasif aşınma, AISI2205, sürtünme kuvveti, hacim kaybı, minimum quantity lubrication (MQL), nanographen.

**Bilim Kodu** : 91421

## **ABSTRACT**

**M. Sc Thesis**

### **INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AISI2205 DUPLEX STAINLESS-STEEL MATERIALS IN DIFFERENT ENVIRONMENTS**

**Murat CANBAZ**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**The Department of Mechatronics Engineering**

**Thesis Advisors:**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**Assoc. Prof. Dr. Recep DEMİRSÖZ**

**July 2023, 66 pages**

Stainless steels are preferred in many industrial applications where hygiene is concerned, due to their very high corrosion resistance properties. The high wear resistance of stainless steels, which continue to be used not only in industrial applications but also in all areas of life, is of great importance in terms of part or system life. In this study, the tribological properties of AISI2205 ferritic-austenitic stainless steel material against AISI52100 stainless steel balls in various ambient conditions were investigated. Tribological tests were performed on AISI2205 specimens using MQL and MQL lubrication conditions containing nanographene, plus a ball-on-flat wear tester in dry environments. While the experimental parameters were 100 m sliding distance, 80 mm/s sliding speed, the loads were chosen as 30, 40 and 50 N. The friction force values were obtained graphically, and

the volume loss values were obtained by using the measurements made on the wear marks. SEM imaging and EDX analyzes of the wear marks were made and the results were examined. The results showed that the lowest volume loss value occurred in the MQL lubrication condition containing nanographene. In addition, the highest wear depth value was measured as 85.84  $\mu m$  in dry environment and 50 N load. In addition, the lowest friction force value of 3.5 N was obtained in the experiments carried out under MQL lubrication condition containing nanographene and under 30 N load.

**Key Word** : Ball-on-flat, abrasive wear, AISI2205, friction force, volume loss, minimum quantity lubrication (MQL), nanographene.

**Science Code** : 91421



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, tez danışmanlarım Prof. Dr. Mustafa YAŞAR ve Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ hocalarım başta olmak üzere Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ, Araştırma Görevlisi Mehmet Tayyip ÖZDEMİR, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU ve Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR'a çok teşekkür ederim.

Deney düzeneği ve teknik ekipmanlar konusunda destek veren Prof. Dr. Hayrettin AHLATI hocama ayrıyeten teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca her zaman fedakarlık gösteren ve desteęi hiç bir zaman esirgemeyen EŐim Ayšnur CANBAZ ve oęlum Mehmet Talha CANBAZ'a sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	5
AŞINMA .....	5
2.1. TRİBOLOJİ.....	6
2.2. SÜRTÜNME .....	6
2.3. YAĞLAMA.....	7
2.3.1. Kuru Film Yağlama .....	7
2.3.2. İnce Filmler Yağlama .....	7
2.3.3. Sıvı Yağlama .....	8
2.4. AŞINMA MEKANİZMASI TÜRLERİ.....	8
2.4.1. Abrasif Aşınma.....	8
2.4.2. Adhezif Aşınma .....	11
2.4.3. Eroziv Aşınma .....	11
2.4.4. Korozif Aşınma .....	13
2.4.5. Yorulma Aşınması .....	15
2.5. AŞINMA ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	16
2.5.1. Ağırlık Farkı Yöntemi .....	16
2.5.2. Kalınlık Farkı Yöntemi.....	16

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.5.3. İz Değişimi Yöntemi .....	17
2.5.4. Radyoizotoplar ile Ölçüm Yöntemi.....	17
2.5.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Yöntemi .....	17
2.6. AŞINMANIN ÖNLENMESİ .....	18
BÖLÜM 3 .....	19
3.1. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER .....	24
3.2. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER .....	26
3.4. MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER.....	29
3.5. ÇÖKELME SERTLEŞMELİ PASLANMAZ ÇELİKLER .....	30
BÖLÜM 4 .....	32
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	32
BÖLÜM 5 .....	38
MATERYAL METOT .....	38
5.1. MALZEMELER.....	38
5.2. AŞINMA TESTLERİ VE ORTAMLAR .....	39
5.3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	41
5.4. AŞINMANIN TESPİTİ.....	42
5.5. ORTAM KOŞULLARI.....	43
5.5.1. MQL .....	43
5.5.2. Nano-MQL .....	43
BÖLÜM 6 .....	45
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	45
6.1. SÜRTÜNME KUVVETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	45
6.2. AŞINMA DERİNLİĞİNİN İNCELENMESİ .....	47
6.3. HACİM KAYBININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	50
6.4. AŞINMA İZİ ANALİZİ .....	51
6.4.1. SEM ve EDX Analizleri (Numune).....	51
6.4.2. SEM ve EDX Analizleri (Aşındırıcı) .....	54

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 7 .....	57
SONUÇLAR.....	57
KAYNAKÇA.....	58
ÖZGEÇMİŞ .....	66

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Sıvı yağlama durumlarına ait şematik görsel.....	8
Şekil 2.2. Abrazif aşınma mekanizmaları .....	9
Şekil 2.3. (a) Pürüzlü, sert bir yüzey veya daha yumuşak bir yüzey üzerinde kayan aşındırıcı partikül gömülmüş bir yüzey ve (b) Yüzeylerden en az biri aşındırıcı taneciklerden daha yumuşak olan yüzeyler arasına sıkışmış serbest aşındırıcı taneciklerin şematik görüntüsü.....	10
Şekil 2.4. İki gövdeli aşınma şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.5. Üç gövdeli aşınma şematik gösterimi .....	10
Şekil 5.6. Adhezif aşınmaya ait şematik gösterim .....	11
Şekil 2.7. Eroziv aşınma mekanizmalarına ait şematik görseller .....	13
Şekil 2.8. Koroziv aşınma şematik gösterimi .....	14
Şekil 2.9. Yorulma kaynaklı yüzey çatlak başlangıcı ve ilerleme sürecinin şematik gösterimi .....	15
Şekil 3.1. Schaeffler Diyagramı [51]. .....	20
Şekil 3.2. Farklı tür paslanmaz çelikler için Krom ve Nikel miktarları (ÇS: Çökelme sertleşmesi uygulanabilen). .....	22
Şekil 3.3. Paslanmaz çelik türlerine ait iç yapı görseli .....	24
Şekil 3.4. Östenitik paslanmaz çelik kaliteleri.....	26
Şekil 3.5. Ferritik paslanmaz çelik kaliteleri.....	27
Şekil 3.6. Duplex paslanmaz çelik kaliteleri.....	29
Şekil 3.7. Martenzitik paslanmaz çelik kaliteleri.....	30
Şekil 3.8. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelik kaliteleri.....	31
Şekil 5.1. AISI 2205 kalite numuneler ve AISI 52100 kalite aşındırıcı toplara ait görsel. ....	38
Şekil 5.2. AISI 2205 kalite parlatılmamış ve parlatılmış numunelere ait görsel. ....	39
Şekil 5.3. a) AISI 2205 ve b) AISI 52100 kalite malzemelere ait SEM ve EDX görüntüleri. ....	39
Şekil 5.4. G133 ASTM aşınma cihazı.....	40
Şekil 5.5. Yağlayıcılar, a) nano-MQL, b) MQL. ....	40
Şekil 5.6. Deneyleerde kullanılan yükler ve hız ayar sürücüsü. ....	41
Şekil 5.7. Deney düzeneği.....	42
Şekil 5.8. Deneyleerde kullanılan ortam koşulları.....	44

## Sayfa

Şekil 6.1. Farklı koşullarda mesafeye karşı sürtünme kuvveti, a) 30 N yük, b) 40 N yük, c) 50 N yük.....	46
Şekil 6.2. Çeşitli koşullarda ve yüklerde ortalama sürtünme kuvveti. ....	47
Şekil 6.3. 30N yük değeri için aşınma izi formları.....	48
Şekil 6.4. 40N yük değeri için aşınma izi formları.....	48
Şekil 6.5. 50N yük değeri için aşınma izi formları.....	48
Şekil 6.6. Farklı soğutma durumlarında a) aşınma genişliği ve b) aşınma derinliği. ....	50
Şekil 6.7. Çeşitli soğutma durumlarında, yüklerde hacim kaybı değerleri. ....	51
Şekil 6.8. Çeşitli yüklerde ve soğutma koşullarında numune yüzeyi (SEM).....	52
Şekil 6.9. Farklı koşullarda AISI 2205 duplex paslanmaz çeliğin EDX araştırması ve SEM'i. ....	54
Şekil 6.10. Nano MQL ve a) 30 N yük, b) 40 N yük ve c) 50 N yük koşullarında bilyenin EDX analizi ve SEM'i. ....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Tablo 3.1. Bazı paslanmaz çelik kaliteleri ve kimyasal kompozisyonları .....	23
--	----

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $F_f$  : Sürtünme kuvveti (N)  
 $F_n$  : Normal kuvvet (N)  
 $\mu$  : Sürtünme katsayısı  
 $\Delta V$  : Hacim kaybı ( $\text{mm}^3$ )  
 $W_w$  : İz genişliği (mm)  
 $W_d$  : İz derinliği (mm)  
 $s$  : Aşınma izi boyu (mm)  
 $N$  : Newton  
 $mm$  : Millimetre  
 $\mu m$  : Micrometre

### KISALTMALAR

- ASTM : Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu  
ATF : Otomatik Şanzıman Sıvısı  
COF : Sürtünme Katsayısı  
DC : Doğru Akım  
DLC : Elmas Benzeri Karbon  
EDX : Enerji Dağılım Xışını Spektrometresi  
FEM : Sonlu Elemanlar Yöntemi  
HSLA : Yüksek Dayanım Ve Düşük Alaşım Çelikler  
MFREC : Çok Dolgulu Takviyeli Epoksi Kompozitler  
MQL : Minimum Miktarda Yağlama  
SEM : Taramalı Elektron Mikroskopu  
 $\text{MoS}_2$  : Molibden Disülfid  
PI : Poliimid



PTFE : Politetrafloroetilen  
WT : Aşınma Dirençli Çelik

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Yüksek korozyon direnci nedeniyle kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan birçok paslanmaz çelik türü, farklı çalışma ortamlarına uyum sağlayacak şekilde geliştirilmiştir [1]. Paslanmaz çelikler, korozif etkilere karşı yüksek direnç göstermeleri nedeniyle özellikle kimya endüstrisinde vazgeçilmez mühendislik malzemeleri arasındadır [2]. Farklı mekanik özelliklere sahip, kolay işlenebilir, sağlıklı ve kolay temizlenebilir, çok düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen paslanmaz çelikler, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Gıda, kimya, otomotiv, ilaç, petro-kimya, türbin, denizcilik, dayanıklı tüketim malları alanlarında kullanılan birden fazla çeşidi vardır. Bileşimlerinde farklı alaşım elementleri kullanılarak paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri kontrol edilebilmekte ve bu sayede uygulamaya yönelik farklı mekanik özelliklerde paslanmaz çelikler üretilebilmektedir. Öte yandan çeşitli yüzey işleme ve geliştirme uygulamaları ile endüstriyel kullanım alanlarının artırılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir [4].

Aşınma, sürtünme halindeki yüzeylerde mekanik etkenlere bağlı olarak meydana gelen malzeme kaybıdır [5]. Aşınma, birbiriyle temas halinde olan iki cisim arasındaki göreceli hareket ve cisimlerin yüzeylerinin birbiri üzerindeki etkisi sonucunda meydana gelir [6]. Bu nedenle yüzeylerin başlangıçtaki şekli bozulmakta, parçalar arasındaki boşluklar genişlemekte ve amaçlanan fonksiyon yerine getirilememektedir. Makinelerdeki arızaların ve yapı elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli nedenlerinden biri aşınmadır. Mühendislik malzemelerinde görülen aşınmanın aşınma sayılabilmesi için bazı şartların sağlanması gerekmektedir [7]. Bu koşullar, mekanik bir faktörün olması, sürtünmenin (bağıl hareketin) yavaş ve sürekli olması, malzeme yüzeyindeki değişikliklerin istem dışı gerçekleşmesidir [8,9]. Sürtünme bir enerji kaybına sebep olmakla beraber, sebep olduğu aşınma

sebebi ile de telafisi mümkün olmayan malzeme kayıplarına neden olur. Bu nedenle dünyada her yıl önemli ekonomik kayıplar meydana gelmekte ve buna paralel olarak kayıpların önlenmesi için çeşitli önlemler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Yağlama, sürtünme ve aşınmayı azaltmak, enerji verimini artırmak, kayma hareketi sırasında oluşan ısı ve aşınma partiküllerini uzaklaştırmak için iki kayan yüzey arasına sıvı veya katı yağlayıcılar eklenmesiyle gerçekleştirilen işlemdir [10]. Bir sistemde kullanılan yağın fiziksel durumuna göre katı ve sıvı olmak üzere iki çeşit yağlayıcı vardır. Katı yağlayıcılar, hareket sırasında sürtünmeyi azaltmak ve yüzeyleri aşınmaya karşı korumak için bir yüzey üzerinde toz veya ince bir katı film halinde kullanılan yağlayıcılardır [11]. Toz halindeki katı yağlayıcılar, özellikle metal işlemede gres veya su gibi bir sıvı içinde süspansiyon olarak kullanılır. Grafit (C), Molibden Disülfid ( $\text{MoS}_2$ ), titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ), tungsten disülfid ( $\text{WS}_2$ ) yaygın olarak kullanılan toz katı yağlayıcılardır [12–14]. Bu katı yağlayıcılar,  $350^\circ\text{C}$ 'ye kadar sıcaklıklarda sıvı yağlayıcılara göre çok daha iyi yağlama sağlar. Sıvı yağlayıcılar ise bir sıvı yağlayıcı vasıtasıyla arayüzeylerin etkileşimini engelleyen yağlardır [15]. Bu bakımdan sıvı yağların birincil görevi, kullanıldığı sistemdeki aşınma, sürtünme ve yüzey hasarlarını kontrol altına alarak sistemin ömrünü uzatmaktır. İkincil görevleri ise korozyonu önlemek, ısı ve aşınma partiküllerini sistemden uzaklaştırmaktır [16].

Günümüzde gelişen teknoloji ile formüle edilmemiş yağlama yağları (mineral veya sentetik baz yağlar) sistem gereksinimlerini karşılamaya yeterli olmamaktadır. Bu nedenle baz yağların mevcut özelliklerini iyileştirmek veya yeni özellikler katmak için bazı yağ katkıları eklenir. Bu katkı maddelerinin en önemli özelliklerinden biri, özellikle sınır yağlama koşullarında, yağlama yağlarının koruyucu bir film tabakası oluşturma kabiliyetini artırmalarıdır. Yağ katkılarının sağladığı özellikler aşağıda sıralanmıştır;

- Aşınma ve sürtünmeyi azaltmak [17],
- Oksidasyon direncini arttırmak [18],
- Korozyonu azaltmak [19],

- Aşınma partikülleri ve yanma ürünlerinden kaynaklanan kirliliğin azaltılması [20],
- Yüksek sıcaklıklarda yağın viskozitesinin fazla düşmesinin önlenmesi [21],
- Akma noktasının düşürülmesi [22],
- Köpük oluşumunu önleme.

Jayashree ve ark. standart bir martensitik paslanmaz çeliğin aksine bir SiC-grafit kombinasyonu üzerinde kuru kayma testleri gerçekleştirmiştir. Deneyler boyunca sıcaklıklar değiştirilmiştir. Disk ve pim düzlemlerindeki sürtünme levhası, SEM analizi kullanılarak incelenmiştir. Oda sıcaklığından 200C'ye kadar sıcaklıklarda 1,57 m/s hızda gerçekleştirilen deneyler için sürtünme katsayısının 0,4-0,45 aralığında olduğunu ortaya koymuşlardır. Çeliğin tribo-oksidatif aşınmasının sıcaklık artışına neden olduğu ortaya çıkmıştır. Öte yandan, 7 m/s'de test edildiğinde, sürtünme katsayısı sıcaklıkla birlikte düşmüştür. Daha kompakt bir sürtünme tabakasının gelişmesinin bir sonucu olarak, adhezyon azalmış ve bu durum sürtünme katsayısında bir azalmaya neden olmuştur [23]. Sıcaklık, ısıl işlem ve yağlama, maddelerin aşınma hızı üzerinde bir etkiye sahiptir. Babakhani ve ark. Astaloy CrM alaşımını kuru kayma aşınma deneyleri yaparak, XRD analizleri ve metalografik olarak incelemişlerdir. 450 °C'de su verme ve temperleme ile şeklinde yapılan ısıl işlem, ılık sıklama yapılmış Astaloy CrM malzemenin aşınma seviyesini düşürür, ancak daha düşük sıcaklıklarda, örneğin 200 °C'de yapılan temperleme tam tersi sonuç verir. Araştırma bulgularına göre stearamid, minimum sıcaklıklarda sinterlenmiş numuneler açısından lityum stearattan daha etkili bir yağlayıcıdır, ancak lityum stearat ile sinterlenmiş modeller daha düşük aşınma oranları ortaya koyar [24]. Si, Mn, Ni, Cr ve Mo alaşımlarıyla alaşımlanmış bir orta karbonlu (300M) çeliğe ilişkin kayma aşınması direnci, çeliğin martenzit başlangıç sıcaklığındaki 285°C'de kısa sürelerle östemperlenmesiyle arttırılmıştır. Bir WC/Co bilye eşdeğerine karşı karşılıklı kayma aşınması deneyleri, sabit bir 49 N yük ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar otenitleşme sıcaklığı arttıkça aşınma direncinin de arttığını göstermiştir. İyileştirilmiş aşınma direncinin, aşınmayla uyarılan mikro yapı ilerlemesinin, özellikle artık ostenitin karbon bölünmesiyle üretilen kararlılığının bir sonucu olduğu varsayılmaktadır. Artan gerilimli kayma aşınması, önemli kayma distorsiyonunun gölgesinde kalarak sac üstünde bir nano-katmanlı yapıya neden

olmuştur. Gevrek nano-katmanlarda aşınmadan dolayı katmanlaşma belirtileri görülebilir [25]. Mondal ve ark. Hardox 400'ün yanı sıra yeni ortaya çıkartılmış bir aşınma dirençli çeliğin (WT) kayma aşınması özelliklerini araştırmıştır. Yüksek kayma koşulları altında, 400 HV sertlik derecesine sahip su verilmiş ve temperlenmiş çelikler önemli farklılıklar sergilemiştir. Hardox 400'ün 740,5 MPa'lık akma dayanımına kıyasla, WT çeliklerinin akma dayanımı 1010,27 ila 1082,42 MPa'dır. Hardox 400'e kıyasla yükseltilmiş WT çelikleri akma dayanımı nedeniyle, her ikisi de aynı sertliğe sahip olsa bile aşınmaya karşı daha dirençlidir. Yüksek Dayanım ve Düşük Alaşım Çelikler (HSLA) ile ilgili aşınma oranı, daha pahalı olan Hardox 400 çeliğinin üçte biri kadardır. Hem WT hem de Hardox 400 çelikleri, kesme, pullukla sürme ve oksitleme ile birlikte aşınma prosesi boyunca temel aşınma modları olduğunu göstermektedir. Yüksek ortalama yüklere maruz kaldığında, Hardox 400 önemli ölçüde oksidatif aşınma sergiler [26].

Paslanmaz çelik malzemeler üzerine literatürde pek çok çalışma mevcut olup çalışma ortamı yağlama koşullarının değiştirilmesi ile aşınma değerlerinde bariz düşüşler görülmektedir. Bu çalışmada hem östenitik hem de ferritik özellikler taşıyan dublex paslanmaz çelik grubundan AISI 2205 çeliğinin ball-on-flat deney sisteminde farklı yağlama koşullarında aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Deneyler esnasında ölçülen sürtünme kuvveti değerleri grafiksel olarak elde edilmiştir. Ortaya çıkan aşınma izleri incelenerek hacimsel malzeme kayıpları hesaplanmış, izler üzerinde SEM-EDX analizi yapılarak aşınma formları tespit edilmiştir.

## BÖLÜM 2

### AŞINMA

Temas halinde bulunan ve biri diğerine göre göreceli hareket eden sürtünme halindeki cisimlerin yüzeylerinde sürtünme etkisiyle oluşan ve istenilmeyen malzeme kaybı olarak tarif edilebilir. Birbiriyle temas eden yüzeylerde sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının kötüleşmesine neden olduğundan aşınma çok önemli bir değişkendir. Birbirine temas eden mühendislik malzemelerinin, birbirlerine sürtünmesi neticesinde meydana gelen aşınma, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Mühendislik malzemelerindeki yıpranmanın aşınma sayılması için belirli şartların oluşması gerekmektedir [27].

Korozyon ve yorulmanın yanı sıra sürtünme ile çalışan tüm makine elemanlarında kaçınılmaz ve karmaşık bir sistem özelliği olan aşınma, üçüncü büyük sorundur. Yapılan araştırmalar sürtünme ve aşınmayı azaltmayı ve kontrol etmeyi hedeflemektedir. Sürtünme ve aşınmayı azaltarak malzeme kaybının önüne geçilmesi başarılırsa enerji ve malzeme israfının da önüne geçilmiş olur [28].

Mühendislik malzemeleri üzerinde meydana gelen olumsuz değişimin aşınma olarak değerlendirilebilmesi için belirli şartların oluşması gerekir. Bunlar; mekanik bir etki olması, sürtünme oluşması, yavaş ancak sürekli olması, istek dışında gelişmesi ve malzeme yüzeyinde değişiklik ortaya çıkmasıdır. Bu şartlar yerine gelmiyorsa meydana gelen bu olumsuz değişimi aşınma olarak değerlendirmek mümkün değildir.

## 2.1. TRİBOLOJİ

Triboloji kelimesi Yunanca “Tribo” sürtünme ve aşınma anlamına gelen sözcükten gelen bir terimdir [29]. “Triboloji” de sürtünme ve aşınma bilimidir. Triboloji kelimesi ilk olarak 1966'da bir rapor hazırlayan ve başkanlığını Dr Peter Jost'un yaptığı ve dolayısıyla 'Jost Komitesi' olarak bilinen bir İngiliz Hükümeti komitesi tarafından kullanılmıştır [30]. Triboloji, “birbirlerine göre hareket ederek etki eden yüzeylerin ve olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanmaktadır. Sürtünme, aşınma ve yağlama çalışması olan triboloji, fizikçi, kimyager ve makine mühendisinin yanı sıra malzeme bilimcisi veya metalürji uzmanının uzmanlığından yararlanan disiplinler arası bir konudur [31]. Tribolojik bir sistem, ana malzeme (aşınan malzeme), karşı malzeme (aşındıran malzeme), uygulanan yük, ara malzeme, hareket ve çevre olmak üzere altı farklı parametreden meydana gelir. Aşınma, belirli bir yük altında birbirine göre göreceli hareket eden aşınma çiftinin temas etmesi ile meydana gelmeye başlar. Ana malzeme, metal, kauçuk, ağaç, plastik ve deri vb. cisimlerden meydana gelebilir [32].

Tribolojik sistemi oluşturan faktörler:

- Elemanlara bağlı faktörler; malzemenin cinsi, mikro yapısı, yüzey sertliği, elastisite modülü, yüzey pürüzlülüğü, şekli ve boyutu, soğuk şekil vermenin etkisi ve ısı işlem olarak sayılabilir.
- Karşı malzemeye bağlı faktörler; tane büyüklüğü, tane yapısı ve tane dağılımıdır.
- Ortam ile ilgili faktörler; sıcaklık, nem ve atmosferdir. Çalışma şartlarına (işletmeye) bağlı faktörler; yük, hareket (yol veya zaman cinsinden) ve kaymanın türüdür.

## 2.2. SÜRTÜNME

Sürtünme, yaygın olarak kullanıldığı şekliyle, kaymaya direnen bir kuvvete ifade eder [33]. Azaltılabilir ama asla tamamen yok edilemez. Her mekanik cihazda, bir katının başka bir katı üzerinde kaydığı her yerde kendini gösterir [34].

## 2.3. YAĞLAMA

### 2.3.1. Kuru Film Yağlama

Kuru film ve katı film yağlama, birbiri ile temas eden katı malzemeler arasındaki sürtünmeyi düşürerek aşınmayı azaltmak için bir yüzeye uygulanan katı kaplamalar anlamına gelmektedir. Katı film yağlama daha fazla tercih edilen ifade şeklidir. Bu kaplamalar herhangi bir kalınlıkta olabilir fakat genel uygulanma aralığı yaklaşık 2 µm ile 75 µm aralığındadır [34]. Bu yağlayıcılar, florokarbonlar gibi polimerler, molibden disülfür gibi inorganik malzemeler veya grafit olabilir. Ayrıca kimyasal veya elektrokimyasal olarak oluşturulmuş yüzey reaksiyon ürünleri de olabilir. Örneğin en yaygın florokarbon katı film yağlayıcı Teflo S malzemesidir. Bahçe aletlerinde ve ıslanmaya veya kirlenmeye meyilli ve kullanıcılar tarafından yağlanamayacak her türlü alet/cihaz/mekanizmada kullanılır. Aşınana kadar yağlama bölgesinde kalır. En çok kullanılan inorganik katı film yağlayıcı ise molibden disülfittir. Yağlamak için bir yüzeye parlatılabilen ince bir katı tozdur. Molibden disülfit ve grafit katkılı yağlayıcılardır. Kristal trombositler, karıştırıldığında oyun kartlarının birbiri üzerinde kayması gibi birbiri üzerinde kayar. Altıgen bir kristal yapıya sahiptirler ve bu kristalitler düzlemler arası kayma ile birbirleri üzerinde kayarlar. Florokarbonlar, yüksek yükler altında bir sıvı gibi davranarak kayganlaşır. Zayıftırlar ve düşük kayma mukavemetleri kayganlıklarını sağlarlar [34].

### 2.3.2. İnce Filmlerle Yağlama

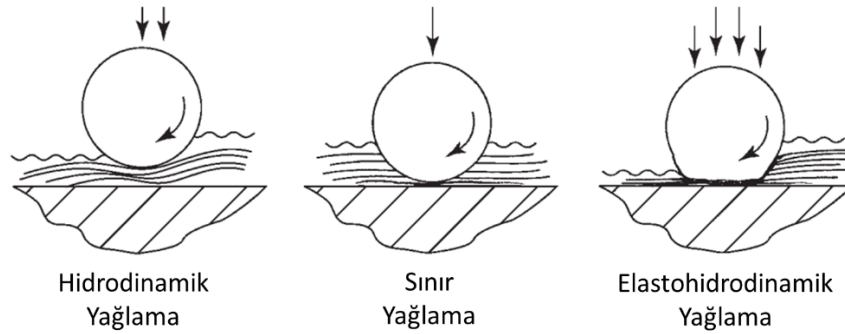
Bu yağlama türünde amaç, teması önlemek ve diğer yüzeylere karşı sürtünmeyi azaltmak için tek bir molekül tabakasının bir yüzeye yapıştırılmasıdır. Yağlayıcı türlerinin tek tabaka halinde emilimi ile meydana gelen yağlayıcı ince filmlerdir. Yüzeyler işlenecek yüzeye bağlanmak isteyen moleküller içeren bir yağlayıcı ile daldırma, vakumlu kaplama, döndürme vb. işlemlerle uygulanır. Bu moleküller, reaktif uçları yüzeye gelecek şekilde birleşirler ve temas girişiminde bulunulduğunda molekülün geri kalanı, ayrı yüzeyde durur. Yapışma için yüzeylerle reaksiyona giren özel moleküller, genellikle bileşik yağlarda bulunur. Bu tür yağlar, yüzey



ayrımalarının nanometre aralığında olması gereken sabit sürücüler ve benzeri elektronik cihazlarda kullanılır [34].

### 2.3.3. Sıvı Yağlama

En yaygın kullanılan yağlayıcılar sıvı yağlayıcılardır. Her yerde kullanılırlar. Otomobiller, araçlar, elektrik türbinleri vb. sistemlerde karşımıza çıkar. Katı yüzeyleri birbirine sürtmeyecek şekilde sıvı yağlama ile birbirlerinden ayrılırlar. Katı yüzeyler birbirlerinden tam olarak ayrılırsa hidrodinamik yağlama durumu ortaya çıkar. Temas yüzeyleri birbirlerinden tamamen ayrılmamışsa sınır yağlama durumu ortaya çıkar. Sıvı ayrımı elde etmek için yüzeyler deforme olursa elastohidrodinamik yağlama durumu ortaya çıkar. Şekil 5.1’de sıvı yağlama durumları şematik olarak verilmiştir [34].



Şekil 2.1. Sıvı yağlama durumlarına ait şematik görsel [34]

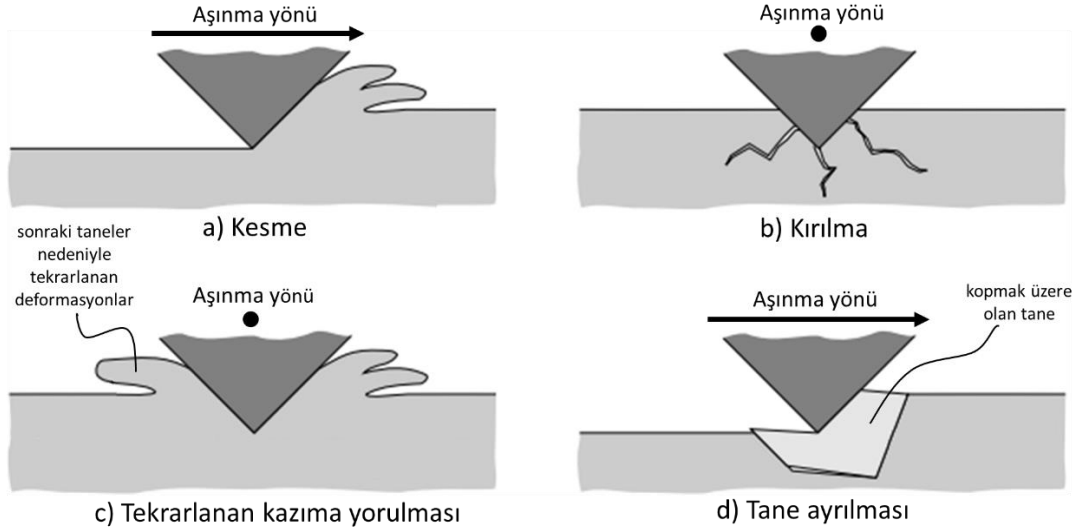
## 2.4. AŞINMA MEKANİZMASI TÜRLERİ

Malzemelerin aşınması üzerine yaptıkları araştırmalar neticesinde aşınma çok çeşitli olarak sınıflandırılmıştır [35, 36]. Bunlar en temel olarak; Abrazif aşınma, adhezif aşınma, erozif aşınma, korozif aşınma ve yorulma aşınmasıdır.

### 2.4.1. Abrazif Aşınma

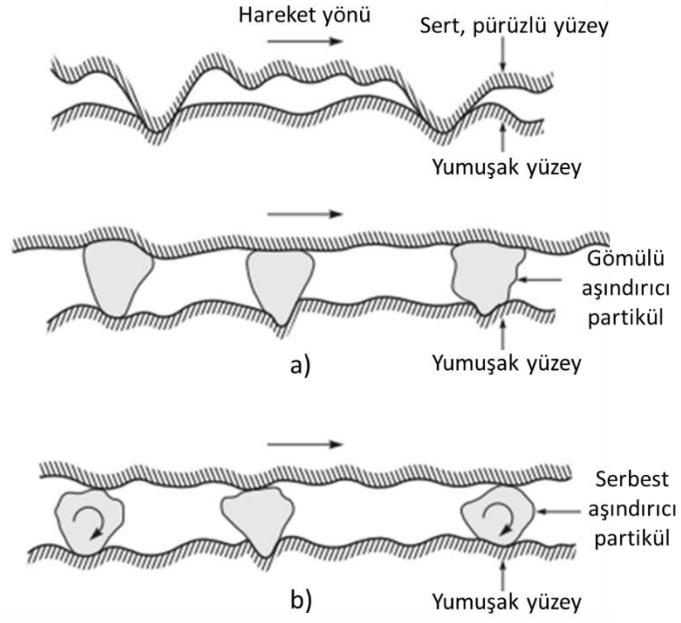
Belirli bir hızda ve birbirlerine göre zıt yönde hareket eden iki malzemedен daha sert olanının üzerinde bulunan çıkıntılar sebebiyle diğer malzeme üzerinden parça

kopardığı aşınma türüdür. Zaman zaman yüzeyler arasında bulunan sert parçacıklar da abrazif aşınmaya neden olur. Şekil 5.2’de abrazif aşınma mekanizmaları şematik olarak belirtilmiştir [37].

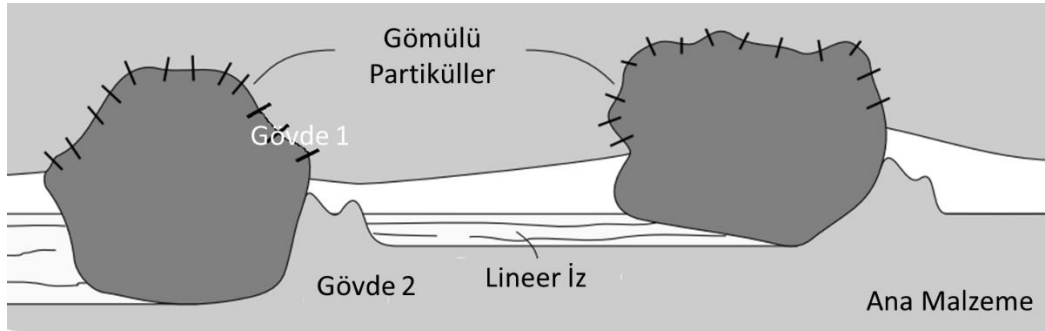


Şekil 2.2. Abrazif aşınma mekanizmaları [37]

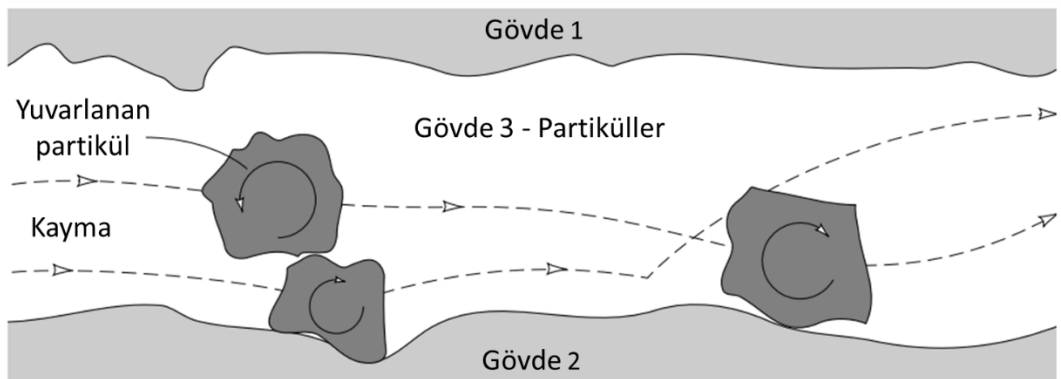
Aşındırıcı partiküller göreceli hareket eden yüzeyler arasında dışarıdan girebileceği gibi adhezif aşınma neticesinde yüzeylerden koparak da ortaya çıkabilir. Bu parçacıklar aşınma sisteminde aktif rol oynar. Abrazif aşınmaya etki eden temel faktörler aşındırıcı türü, sertlik değeri, tane geometrisi ve boyutu, yüzey pürüzlülük boyutu ve şekli, uygulanan yük ve hareket hızı olarak sayılabilir. Sertliği daha yüksek olan yüzey üzerinde yer alan çıkıntıların veya gömülü partiküllerin yüzeyi kazınması gövdeli aşınma olarak isimlendirilir [38]. Abrazif aşınma iki gövdeli ve üç gövdeli olmak üzere iki kısma ayrılır [39]. Üç gövdeli abrazif aşınmada sert parçacıklar yüzeyler arasında kayarak veya yuvarlanarak serbestçe hareket edebilirken iki gövdeli abrazif aşınmada iki yüzey arasında kalmış sert çıkıntılar ya da yüzeylerden birine veya ikisine gömülmüş sert parçacıklar serbest şekilde hareket edemez. Şekil 5.3’de iki ve üç gövdeli abrazif aşınma şematik hali görülmektedir. Şekil 5.4’de iki gövdeli ve Şekil 5.5’de ise üç gövdeli aşınmaya ait şematik gösterimler verilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Pürüzlü, sert bir yüzey veya daha yumuşak bir yüzey üzerinde kayan aşındırıcı partikül gömülmüş bir yüzey ve (b) Yüzeylerden en az biri aşındırıcı taneciklerden daha yumuşak olan yüzeyler arasında sıkışmış serbest aşındırıcı taneciklerin şematik görüntüsü [40].



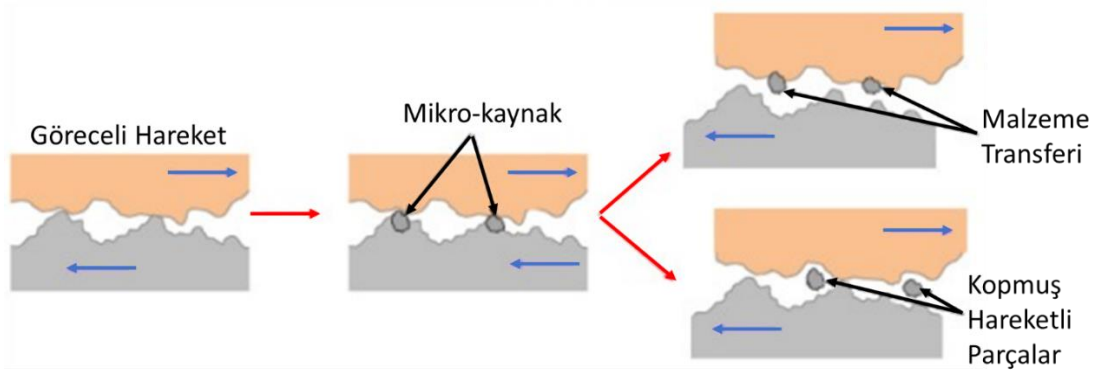
Şekil 2.4. İki gövdeli aşınma şematik gösterimi [37].



Şekil 2.5. Üç gövdeli aşınma şematik gösterimi [37].

### 2.4.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, birbiri üzerinde kayan sürtünmeli metal-metal aşınma çiftinden oluşan bir basınç kaynağının sonucunda ortaya çıkar. Birbirine temas eden iki metal yüzey arasında (benzer kafes yapısına sahip) adezyon adı verilen bir kuvvet vardır. Bu kuvveti oluşturmak için maddelerin moleküllerini birbirine çok yaklaştırmak gerekir. Temas halindeki iki metal, yüzeylerindeki pürüzlülük yoluyla birbirleriyle etkileşime girer. Bu aynı zamanda teknik olarak hassas işlenmiş yüzeyler için de aynı şekilde geçerlidir. Malzemelerin temas eden yüzeyleri ne kadar hassas işlenirse işlensin, yüzeyde girinti ve çıkıntılarının olduğu bir gerçektir. Bu sayede temas halinde olan iki yüzey çıkıntılar vasıtasıyla birbirine temas etmektedir. Bu çıkıntılar arasındaki girintiler temas alanının dışında yer alır. Adhezif aşınmanın görüldüğü parçalar genellikle hadde merdaneleri, yağlanmanın yetersiz olduğu veya yağlanmamış rulmanlar, hadde makas bıçakları, hidrolik/pnömatik silindir iç yüzeyleri ve bunlara benzer parçalardır [36]. Şekil 5.6'da adhezif aşınmaya ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 5.6. Adhezif aşınmaya ait şematik gösterim [41].

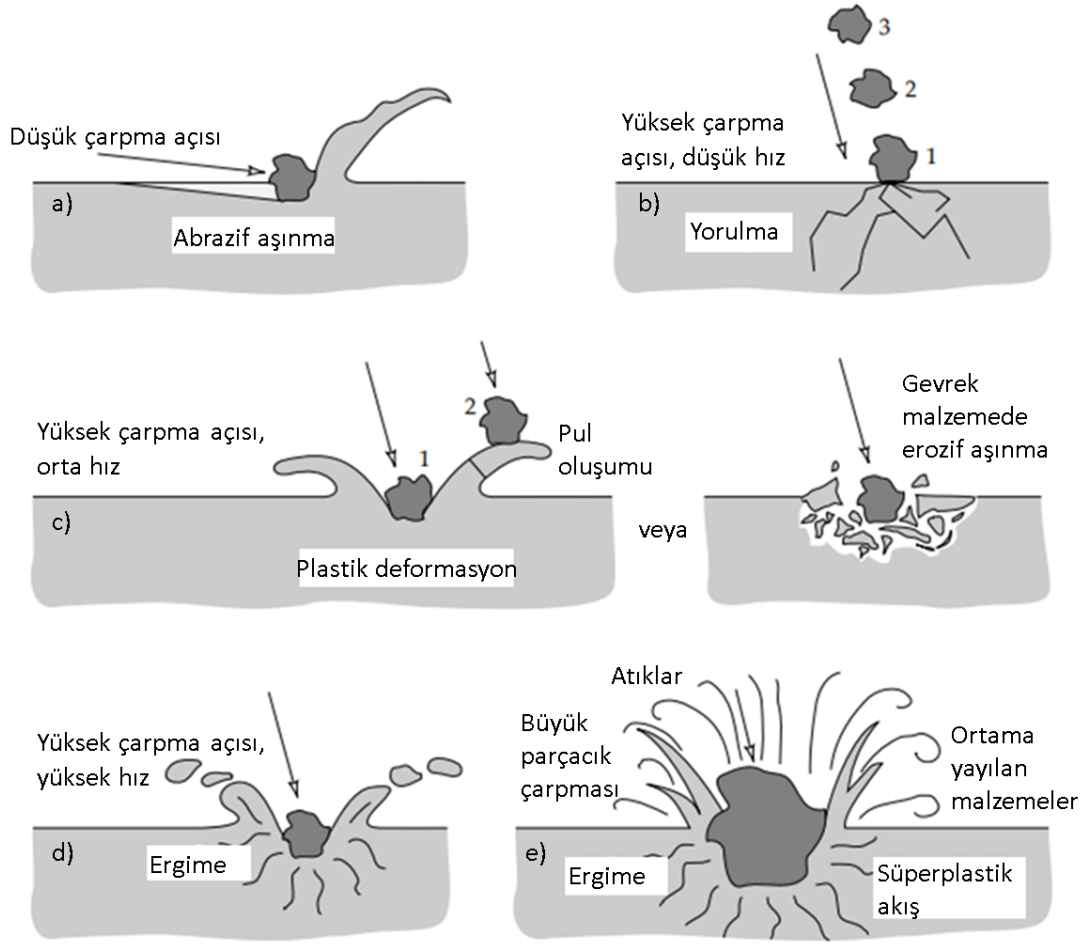
### 2.4.3. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, katı veya sıvı parçacıkların bir cismin yüzeyine çarpmasıyla meydana gelir. Eroziyon aşınma, çok çeşitli ekipmanlarda meydana gelir. Bu aşınma türü için bir uçağın toz bulutları arasından uçarken motor kanatçıklarının hasar görmesi ve cam hammaddesi olan kuvarsın taşınması veya granüle edilmiş yüksek fırın cürufklarının

su ile bulamaç halinde taşınmasında kullanılan sistemlere ait pompa pervanelerinin aşınmasıdır. Diğer aşınma türlerinde olduğu gibi mekanik dayanımın yüksek olması aşınma direncinin de yüksek olacağı anlamına gelmez. Aşınmanın en aza indirilmesi için malzeme özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi yerinde olacaktır. Bu aşınma türünde aşındırıcı partiküllerin özellikleri de önemlidir ve aşınmanın kontrolünde giderek daha fazla ilgili bir parametre olarak kabul edilmektedir [37].

Bu aşınmanın bir türü olan çamurlu (bulamaç) erozif aşınmadaki bulamaç, katı partiküllerin bir sıvı ile herhangi bir oranda karışımıdır. Partiküllerin çapı santimetre kadar büyük ve nanometre kadar küçük olabilir. Sıvı oranı çamurun pompalanabilir olmasını sağlayan herhangi bir oran olabilir. Beton, pompalanmaya hazır olduğunda ağırlıkça sadece yaklaşık %10 su içerir ve buna rağmen yine de bir çamurdur. Çamurlu erozif aşınma, yüzeyde kayan veya akan bulamaç nedeniyle katı bir yüzeyde oluşan ve zamanla ilerleyen malzeme kaybıdır. Çamurun aşındırıcılığı onu oluşturan bileşenlerinin ve sıvının doğasının bir fonksiyonudur. Çamurlu erozif aşınma, petrol kuyusu sıvı taşıma sistemlerinde ve madenden proses sahalarına kömür ve diğer mineralleri taşıyan boru hatlarında oldukça yaygındır [34].

Erozif aşınma, büyük ölçüde partikül malzemesi, çarpma açısı, çarpma hızı ve partikül boyutu tarafından kontrol edilen birkaç aşınma mekanizmasını içerir. Partikül sert ve katı ise, abrazif aşınmaya benzer bir sürecin meydana gelmesi olasıdır. Sıvı partiküllerin aşındırıcı olduğu durumlarda abrazif aşınma meydana gelmez ve aşınma mekanizmaları çarpma ile tekrarlayan baskıların sonucudur [37]. Şekil 5.7'de erozif aşınma mekanizmalarına ait şematik görseller verilmiştir. Birinci görselde (a) düşük çarpma açılarında oluşan abrazif aşınma mekanizması, (b) görselinde düşük hız ve yüksek partikül çarpma açısında yüzeyde meydana gelen yorulma aşınması mekanizması, (c) görselinde orta hız değeri ve büyük çarpma açısı olması durumunda gevrek malzeme kırılması veya çoklu plastik deformasyon, (d) görselinde yüksek çarpma hızlarında yüzey erimesi durumu ve (e) görselinde ise ikincil etkilerle meydana gelen makro boyutlu erozif aşınma mekanizması görülmektedir.

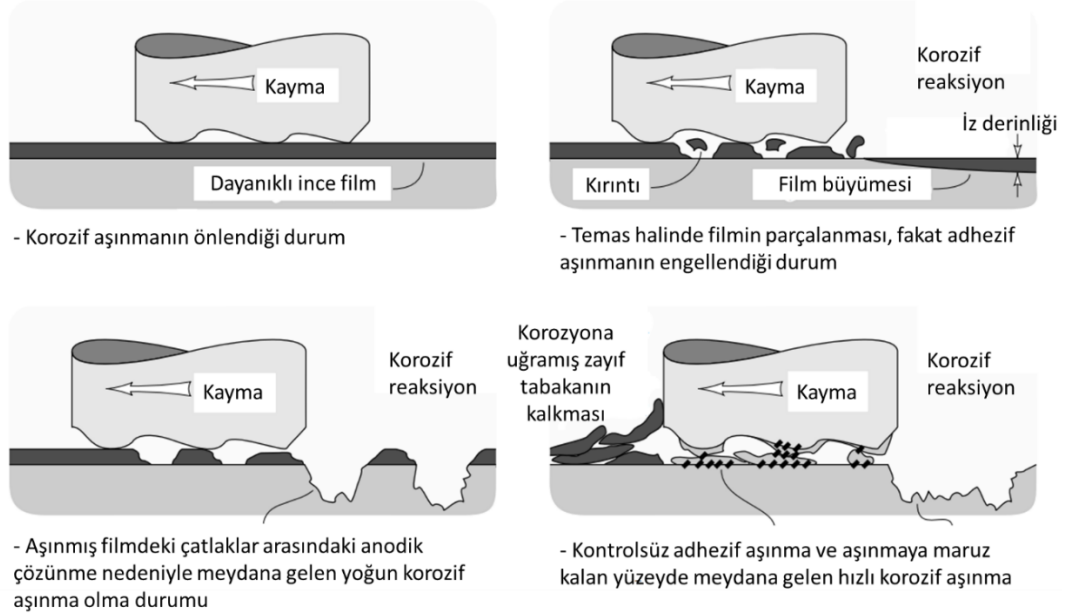


Şekil 2.7. Erozif aşınma mekanizmalarına ait şematik görseller [37].

#### 2.4.4. Korozi Aşınma

Korozi aşınmayı önlemede faydalı olan yüzey kimyasal reaksiyonları kontrol edilmediği takdirde, ana malzemenin üzerinden büyük miktarda malzeme kaybına yol açar. Bir metal malzemenin yüzeyinde dayanımlı bir film oluşturmak üzere kimyasala maruz bırakılırken aynı zamanda bir kayma temasına maruz kalırsa bu durum dört farklı sonuca sebep olabilir [42]. Bunlardan ilki hem korozyonu hem de aşınmayı önleyen dayanıklı bir yağ filmi oluşabilir. İkincisi, kayma teması altında ömrü kısa olan zayıf bir film ortaya çıkabilir ve filmlerin düzenli oluşumu ve tahribi nedeniyle yüksek oranda aşınma meydana gelebilir. Bu durumda sürtünme katsayısı düşük olabilir veya olmayabilir. Üçüncü durumda, koruyucu yüzey filmleri aşınabilir ve kalan filmler ile alttaki alt tabaka arasındaki galvanik bağlantı, yüzeydeki aşınmış alanın hızlı bir şekilde aşınmasına neden olabilir. Dördüncü ve sonuncu durumda ise

aşındırma ve aşınma süreçleri birbirinden bağımsız hareket ederek bu iki işlemin toplamından oluşan bir malzeme kaybına neden olabilir. Korozif aşınmanın bu varsayımsal modelleri, Şekil 5.8'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Korozif aşınma şematik gösterimi [37].

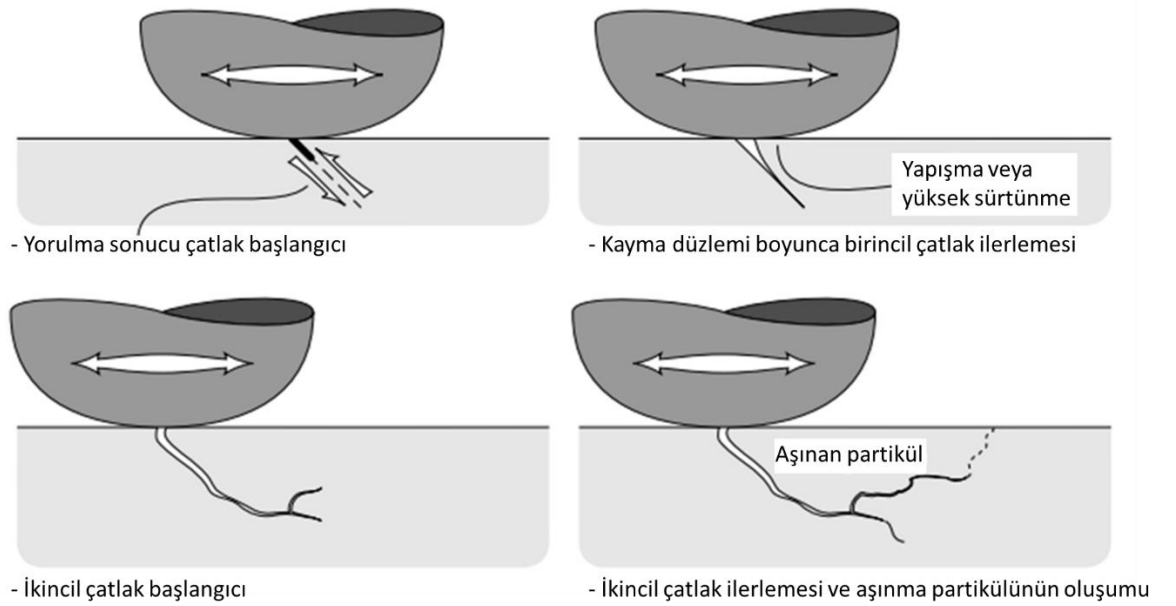
Ortamın türüne bağlı olarak düşük ve yüksek sıcaklık korozif aşınmaları meydana gelebilir. Yüksek sıcaklık ortamında meydana gelen korozif aşınmalara maden, enerji, kimya vb. birçok sektörde rastlanmaktadır [43]. Metalik malzemeler uygulamaların birçoğunda yüksek sıcaklıklarda korozif ortamların etkilerine maruz kalırlar ve malzemenin korozif aşınma direnci bu ortamların etkisi altında kalır. Ortam ve ortam sıcaklığına bağlı olarak meydana gelen aşınma farklı şekillerde meydana gelebilir. Bunlar; karbürleme ve metal tozlaşması, oksitlenme, nitrürleme, halojen korozyonu, sülfürleme, sıvı metal korozyonu, erimiş tuz korozyonu ve kül (tuz) çökeleği korozyonudur [43].

Metalik malzemelerin kimyasal kompozisyonunda yer alan alaşım elementlerinin miktarına göre yüzeylerinde yaklaşık 0,1 mikron kalınlığında doğal bir oksit katmanı bulunur. Metalik malzemeler bu tabaka sayesinde korozif ortamlarda aşınmaya karşı direnç gösterirler. Aşındırıcı ortamda metal yüzeyine uygulanan tekrarlı darbelerin etkisi ile yüzeyden malzeme ile oksit katmanı da kalkar. Tekrarlı darbelerin

sıklığından ya da koruyucu katmanı oluşturan elementin alayım içinde zamanla bitmesinden dolayı oksit tabakası yeniden şekillenemez hale gelir. Korozyonunla beraber gelişen ve korozyonun aşınmaya katkıda bulunduğu bu duruma düşük sıcaklık korozyon aşınması denir.

#### 2.4.5. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, yüzeylerine uygulanan yüksek basınç değerleri altında çalışan parçalarda çok sayıda yük tekrarının peşinden, yüzey altında ortaya çıkan çatlakların yüzeye doğru ilerlemesi veya yüzeyde oluşmuş çatlakların ilerleyerek yüzey altında daha önce oluşmuş olan çatlaklarla birleşmesi ile yüzeyden malzemenin koparak ayrılması ile oluşan bir aşınma şeklidir. Yetersiz yağlama sebebiyle oluşan hasarlanmalardan farklıdır. Çok iyi yağlama durumlarında da rastlanabilir [44]. Yorulma aşınması pitting olarak ta ifade edilmektedir. Çoğunlukla dişli çark sistemleri, içten yanmalı motor kam mekanizmaları, rulmanlı yataklar, demir yolu rayları, sıcak ve soğuk hadde merdaneleri ve sirkülasyon pompaları gibi makine elemanlarında rastlanmaktadır. Şekil 5.9'da Yorulma kaynaklı yüzey çatlak başlangıcı ve ilerleme sürecinin şematik gösterimi verilmiştir [45].



Şekil 2.9. Yorulma kaynaklı yüzey çatlak başlangıcı ve ilerleme sürecinin şematik gösterimi [37].



## 2.5. AŞINMA ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

### 2.5.1. Ağırlık Farkı Yöntemi

Bu yöntemle aşınmaya maruz kalmış olan malzemenin aşınma öncesi ve sonrası yapılan tartımları neticesinde ortaya çıkan fark bulunur. Yöntemde yüksek hassasiyetli teraziler kullanılır. Bu terazilerin hassasiyetleri aşınmanın durumuna göre  $10^{-4}$  gram 'a kadar çıkabilmektedir. Bu ölçülen ağırlık kayıpları birim yola bağlı olarak veya birim yüzeye bağlı olarak ifade edilebilmektedir. Birim yola bağlı olarak ifade edilen ağırlık kayıplarında gram veya miligram değerlerinin ne kadar yol ile meydana geldiği (g/km veya mg/m) belirtilir [38].

Ağırlık farkı yönteminde kullanılan bağıntı ile hesaplanır [38].

$$W_a = \frac{G}{d \cdot M \cdot S} \left[ \frac{mm^3}{Nm} \right]$$

$W_a$  : Aşınma oranı [ $mm^3/Nm$ ],

$G$  : Ağırlık kaybı [mg],

$M$  : Yükleme ağırlığı [N],

$S$  : Aşınma yolu [m],

$d$  : Malzeme yoğunluğu [ $mg/mm^3$ ]

Aşınma oranının tersi aşınma direncini verir.

$$W_r = \frac{1}{W_a}$$

### 2.5.2. Kalınlık Farkı Yöntemi

Aşınma esnasında oluşan ölçü/boyut değişimi ölçülerek bu ölçülen değer başlangıç şartı değeriyle karşılaştırılması ile aşınma miktarı ölçülür. Kalınlık farkı değerinden hareketle hacimsel kayıp ve birim hacimdeki meydana gelen aşınma değeri hesaplanır. Kalınlık hassas bir şekilde uygun ölçü aleti kullanılarak ölçülmelidir (+ 1

µm duyarlılıkta) [38, 46]. Kalınlık farkına dayalı ölçümler, genellikle aşınmanın hangi parçada, hangi oranda, eğik mi yoksa düz mü olduğu konusunda net bir değer veremediğinden dolayı daha çok hacimsel olarak meydana gelen değişiklikler dikkate alınmaktadır [47].

### **2.5.3. İz Değişimi Yöntemi**

İz değişimi yönteminde numunenin temas yüzeyinde bir iz oluşturularak plastik şekil değişimine uğrattılır. Yapılan deneyler süresince oluşturulan bu izin geometrik olarak değişimi izlenir ve mikroskoptan faydalanılarak elde edilen değerlerin analizi gerçekleştirilir. En çok kullanılan iz yapıcı ekipmanlar Brinell ve Vickers sertlik ölçüm aparatlarıdır [36-48]. Küresel uç veya pramitin oluşturduğu iz ölçülerindeki değişme mikroskop kullanılarak ölçülür ve değişim tespit edilir [43].

### **2.5.4. Radyoizotoplar ile Ölçüm Yöntemi**

Radyoizotoplar ile ölçüm yönteminde aşınmaya maruz bırakılan malzeme yüzeyine proton, nötron veya  $\alpha$  parçacık gönderilerek bombardıman yapılır. Malzeme yüzeyi bu işlemten sonra radyoaktif hale gelmiş olur. Hassasiyeti çok fazladır. Çalışma şartlarını değiştirmeye gerek kalmadan kolay bir şekilde ölçüm yapılabilir. Ekonomik bir yöntem değildir, bu sebeple tercih edilmez. Yöntem yalnızca özel amaçlar için kullanılır [48].

### **2.5.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Yöntemi**

Bilgisayar destekli aşınma ölçüm yöntemiyle aşınma ve aşınma parametrelerine ait veriler test mekanizmasına adapte edilen sensörler kullanılarak belirlenebilmektedir. Aşınmadan kaynaklı kayıpları ve ortaya çıkan sürtünme katsayısı verileri bilgisayar ortamına aktarılarak işlenir. Elde edilen bu veriler, uygun program veya programlar yardımı ile grafik formuna dönüştürülür. Sistemin hassasiyeti kullanılan sensörlerin ve okuyucu kartların özelliklerine bağlıdır [43-49].

## 2.6. AŞINMANIN ÖNLENMESİ

Aşınmanın önlenmesi için yapılması gerekenlerin en başında aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi gelmektedir. Parçanın çalıştığı ortamdaki aşınma türü ve şiddeti tespit edilerek malzeme seçimi yapılmalıdır. Günümüzde aşınmanın etkilerinin azaltılması yönünde malzeme geliştirilmesi çalışmaları olanca hızıyla devam etmektedir. Malzeme seçiminin yanında malzemenin kullanıldığı parçanın geometrik tasarımı da önem arz etmekle beraber, bu tasarım aşınmayı en aza indirecek şekilde olmalıdır. Bütün malzemeye uygulanması yerine parçanın sadece aşındırıcı veya aşındırıcı ortamla temas eden yüzeyleri malzemenin özelliklerinden daha iyi özelliklerde ve maruz kalınan aşınma türü için daha dayanıklı malzemeyle kaplanmalıdır. Parçanın üretimi esnasında gözenek oluşumu, cüruf, çatlak, kalıcı gerilmeler, uygun olmayan mikro yapı, gereğinden fazla yüzey pürüzlülüğü vb. gibi herhangi bir üretim hatasının oluşumuna izin verilmemelidir [43]. Parçanın yüksek sıcaklık, yüksek basınç, yüksek hız gibi hesap edilen veya öngörülen dayanım limitlerini aşan yükleme şartlarında kullanılmasına izin verilmemelidir. Yağların vizkozitelerinin çalışma ortamının sıcaklık durumuna göre değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Vizkozite indeksi yüksek olan yağlar, sıcaklık artışı ile özellikleri diğer yağlara göre daha az miktarda değişim gösteren yağlardır. Yağlayıcının kullanıldığı ortamlarda yüksek viskoziteli ve yüksek basınç dayanımına sahip yağlar kullanılarak oluşmuş olan yağ filminin çabuk yırtılması önlenabilir. Bununla birlikte, katkılı yağların korozif aşınmayı tetikleyici ve arttırıcı özelliklerinin olduğu düşünülerek malzeme seçimin konusunda hassas olunmalıdır. Isının ortaya çıktığı sistemlerde bu ortaya çıkan ısının ortamdan uzaklaştırılması gerekliliği oldukça açıktır. Böyle sistemler için soğutucunun tespiti parçanın çalışma şartlarına uygun olmalıdır. Soğutucu ve yağlayıcının filtrelenmesi ortaya çıkan aşındırıcı partiküllerin sisteme yeniden girmesine engel olacağından filtreleme sistemlerinin teşkil edilmesi önemlidir. Yağlayıcı durumunun kontrolü düzenli ve dikkatli bir şekilde yapılarak kullanım limitlerinin dışına çıkılması durumlarında yağlayıcı mutlaka yenilenmelidir. Sürtünme elemanlarının seçimi yapılırken malzeme olarak birbirlerine uygun malzemeler seçilmelidir. Özellikle korozif aşınmaya maruz kalacak parçalar için parçanın üzerinde meydana gelecek tabakaların kaldırılması amacı ile belirli aralıklarla temizlik yapılması parçanın kullanım ömrünü arttıracaktır [44].

## BÖLÜM 3

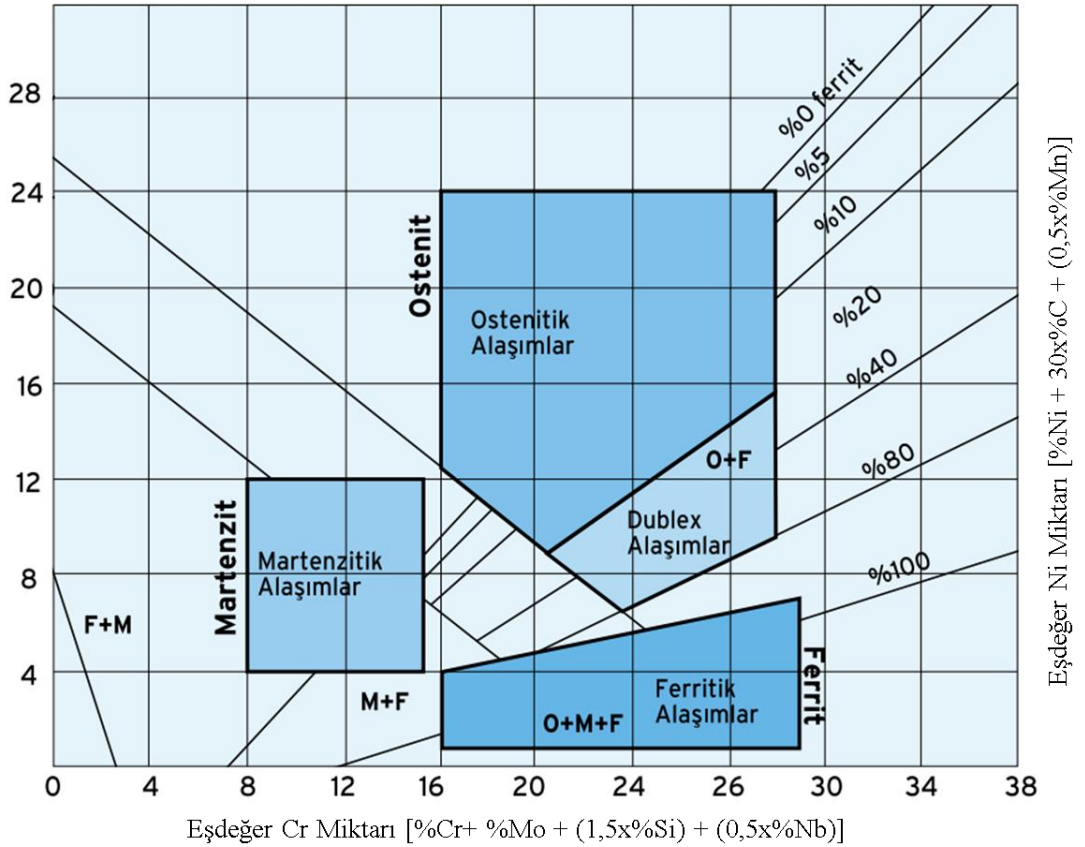
### PASLANMAZ ÇELİKLER

Kromun alaşım elementi olarak kullanıldığı demir alaşımlarında şayet krom oranı %12' yi aşıyorsa çelik paslanmaz bir karaktere sahip olur. Korozyon direncinin ortaya çıkması krom elementinin çeliğin yüzeyinde ince bir oksit tabakası oluşturmasından ileri gelmektedir. Oksit tabakası ince ve birkaç atom tabakası kalınlığındadır. Bu tabaka birçok koroziv ortamda çeliği etkili bir şekilde korur veya pasifleştirir. Bütün paslanmaz çelikler yüksek miktarda krom içerir [50].

Krom miktarı artırılarak veya nikel, molibden gibi alaşım elementleri eklenerek korozyon direnci arttırılabilir. Ayrıca bakır, titanyum, alüminyum, silikon, niyobyum, nitrojen, kükürt ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlanarak ek olumlu etkiler elde edilebilir. Bu sayede makine tasarımcıları ve imalatçıları farklı kullanımlar için en uygun olan paslanmaz çeliği kullanma imkanına sahip olurlar. Örnek olarak, Niyobyum ve Titanyum taneler arasında korozyon oluşumunu önler. Azot, dayanımı ve korozyon direncini artırır. Kükürt ve Selenyum, talaşlı imalatla işlenebilirliği artırır. Paslanmaz çeliklerde karbon %0,02 ile %1 arasında olabilir, düşük karbon oranları daha tipiktir, martenzitik çeliklerde daha yüksek oranlar söz konusudur. Bu paslanmaz çeliklerde krom karbür karbon varlığında oluştuğu ve genellikle tane sınırlarında krom karbür olarak çökeldiği için kafeste çözünen krom miktarı %12 sınırının altına düşebilmekte ve malzemenin korozyon direnci kaybolmaktadır. Dolayısıyla çeliğin kimyasal kompozisyonunda karbon yüzdesi arttıkça, Krom karbür oluşumunu ve kafeste çözünmüş kromun azalmasını (stabilizasyon) önlemek için krom miktarı artırılmalı veya karbür yapmaya eğilimli elementler ilave edilmelidir. Paslanmaz çeliklerin iç yapısını belirleyen öncelikli alaşım elementleri önem sırası ile Krom, Nikel, Molibden ve Mangandır. Öncelikle Krom ve Nikel, mikroyapının ferritik mi yoksa östenitik mi olduğunu belirler. Şekil 4.1'de verilen Schaeffler şeması, çeşitli paslanmaz çelik kalitelerinin bileşimini

gösterir. Ferrit stabilizatörler; Ferrit faz alanını genişleten elementler Silisyum, Krom, Molibden, Vanadyum, Niyobyum ve Titanyum gibi karbür oluşturan metallerdir. Östenit stabilizatörleri, östenit faz alanını genişleten Karbon, Nikel, Manganez, ve Azot gibi elementlerdir [51].

Demir ve en yaygın demir alaşımı olan çelik açık havada paslandıklarından, asitlere maruz kaldıklarında korozif aşınmaya uğradıklarından ve yüksek sıcaklıktaki fırın atmosferlerinde yüzeylerinde oksit tabakası (tufal) oluştuğundan dolayı korozyon açısından nispeten zayıf malzemelerdir. Buna rağmen paslanmaz çelikler olarak bilinen bir grup demir bazlı alaşımlar vardır. Bu tür çelikler nikel (Ni) ilaveli demir-krom (Fe-Cr) alaşımları olup deniz suyunda paslanmayan, konsantre asitlere karşı dayanımlı ve 1100°C'ye kadar sıcaklıklarda kireçlenmeyen malzemelerdir. Paslanmaz çeliklerin ortaya çıkma sebebinin açıklayan ve onları tasarımcı için vazgeçilmez kılan, iyi mekanik özellikler ve üretim özellikleriyle birleşen bu büyük ölçüde benzersiz evrensel kullanışlılıktır [52].



Şekil 3.1. Schaeffler Diyagramı [51].

Paslanmaz çelikler, hijyen açısından problem çıkarmamaları, düşük ve yüksek sıcaklık değerlerindeki dayanımları, imal edilebilirliklerinin kolay olması, iyi mekanik dayanım, uzun ömürlülük, korozyona karşı direnç ve görünüm açısından tercih edilirler [52]. Paslanmaz çelikler çeşitli özellikleri bakımından incelenecek olursa;

**Hijyenik Özellikleri:** Paslanmaz çeliklerin kolay bir şekilde temizlenebilir olması, yüzeyinde kir ve bakterilerin tutunmasının zor olması sebebiyle bu özellikleri mutfaklar, hastaneler, gıda ve ilaç imalat sektörü gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmasını sağlar [53].

**Düşük ve Yüksek Sıcaklıklardaki Durumları:** Bazı paslanmaz çelik türlerinde yüksek sıcaklıklarda bile tufal oluşumu ve mekanik dayanımda düşüşler görülmez. Bazı türlerinde ise düşük sıcaklıklarda dahi tokluklarını korudukları ve gevrekleşmedikleri görülür.

**İmalat Kolaylıkları:** Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğunda talaşlı imalat, kesme, kaynak ve soğuk ve sıcak şekillendirmenin kolay yapılabilmesi durumu söz konusudur.

**Mekanik Dayanımları:** Soğuk şekillendirme ile imal edilen paslanmaz çelik malzemelerde pekleşme sebebiyle mekanik direnç yükselir. Bu özellikleri sayesinde tasarım esnasında malzeme kalınlığı azaltılabilir, bu da fiyat ve ağırlıkta azalma anlamına gelir. Bazı paslanmaz çelik türlerinde ise ısıtma işlemi yapılarak yüksek mekanik dayanım değerleri elde edilebilir.

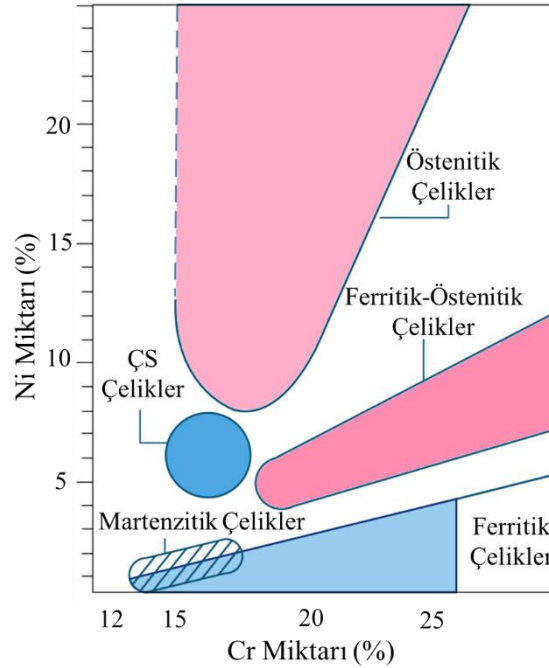
**Uzun Ömürleri:** Üretilen ekipmanların/parçaların kullanım ömrü göz önüne alındığında paslanmaz çelikler, kolay bakım özelliklerine sahip, dayanıklı ve bu sebeplerden ötürü ekonomik malzemelerdir.

**Korozyon Dirençleri:** Paslanmaz çeliklerin hepsinde korozyona karşı dayanım yüksektir. Düşük alaşımlı olanları sabit şartlardaki atmosferik etki altında korozyona dayanabilirken, yüksek alaşımlı olanları alkaliler, asit çözeltileri ve klor içeren

ortamlarda dahi iyi bir korozyon dayanımı sergilemektedirler. Bahsi geçen türdeki paslanmaz çelikler ayrıyeten yüksek sıcaklık ve yüksek basınç şartları altında da kullanılabilirler [54].

Görünümleri: Paslanmaz çeliklerin farklı yüzey kalitelerinde üretilebilmesi imkanı söz konusudur. Yüzey kalitesi ve görünümleri bakımları kolay olduğundan dolayı çalışma koşullarında uzun süre muhafaza edilebilir.

Paslanmaz çelikler, ilk dördü grup içindeki çeliklerin ortak kristal yapısına dayanan beş ana gruba ayrılabilir. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler olarak bilinen beşinci grup, yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilen alaşımlardan meydana gelir. Bazı paslanmaz çelik kaliteleri ve kimyasal kompozisyonları Tablo 4.1’de verilmiştir [51]. Ayrıca Şekil 4.2’de Farklı tür paslanmaz çelikler için Krom ve Nikel miktarları grafiği ve Şekil 4.3’de ise iç yapılarına ait görsel verilmiştir.



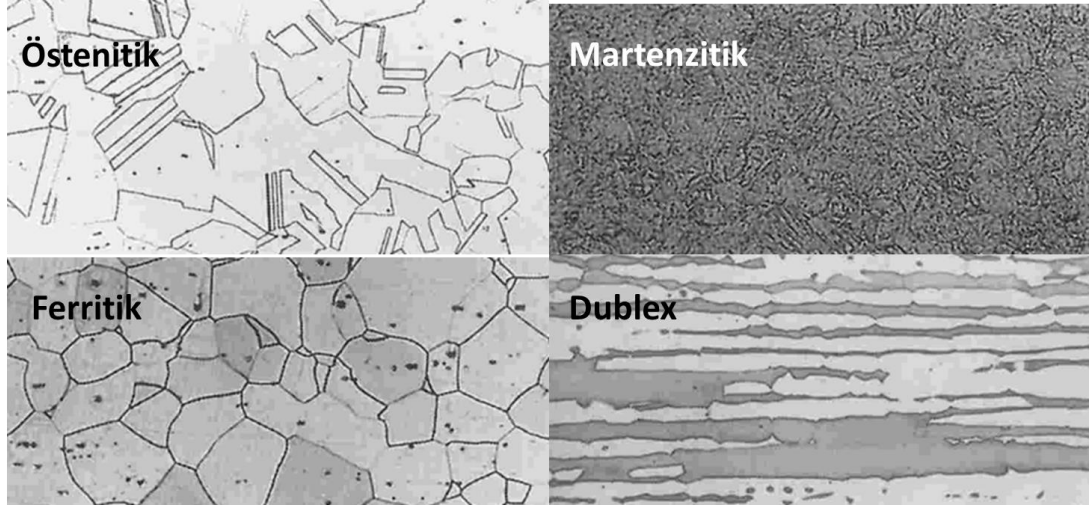
Şekil 3.2. Farklı tür paslanmaz çelikler için Krom ve Nikel miktarları (ÇS: Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen).

Tablo 3.1. Bazı paslanmaz çelik kaliteleri ve kimyasal kompozisyonları [51].

ASTM	EN Malzeme No.	Kimsyal Bileşim, ağırlık % max									
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Diğer
<b>Ferritik Paslanmaz Çelikler</b>											
409	1.4512	0.08	1.0	1.00	0.045	0.03	10.5-11.75	-	-	-	(6x C)Ti
430	1.4016	0.12	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	-	-	-
430Ti	(1.450)	0.10	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	0.75	-	-	(5x C)Ti
439	1.4510	0.07	1.0	1.00	0.04	0.03	17.0-19.0	0.5	-	-	0.2+4(C+N)Ti
<b>Martenzitik Paslanmaz Çelikler</b>											
410	1.4006	0.15	1.0	1.00	0.04	0.03	11.5-13.0	-	-	-	-
420	1.4021	0.15 min	1.0	1.00	0.04	0.03	12.0-14.0	-	-	-	-
440A	-	0.6-0.75	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	-	0.75	-	-
440C	1.4125	0.95-1.2	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	0.75	-	-
<b>Dublex Paslanmaz Çelikler</b>											
2205*)	1.4462	0.03	2.0	1.0	0.03	0.02	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	-
329	1.4460	0.20	1.0	0.75	0.04	0.03	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	-	-
<b>Ostenitik Paslanmaz Çelikler</b>											
201	1.4372	0.15	5.5-7.5	1.00	0.06	0.03	16.0-18.0	3.5-5.5	-	0.25	-
301	1.4310	0.15	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	6.0-8.0	-	-	-
304	1.4301	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-10.5	-	-	-
304L	1.4306	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	-	-
304LN	1.4311	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	0.1-0.16	-
309	1.4828	0.20	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0	-	-	-
309S	1.4833	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0	-	-	-
310	1.4841	0.25	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0	-	-	-
310S	1.4845	0.08	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0	-	-	-
316	1.4401	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316L	1.4404	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316LN	1.4406	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	0.1-0.16	-
316Ti	1.4571	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	5x(C+N)Ti
321	1.4541	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-12.0	-	-	(5x C)Ti
347	1.4550	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-13.0	-	-	(10x C)Nb
<b>Çökeltme Sertleşme Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler</b>											
631	1.4568	0.09	1.0	1.0	0.04	0.04	16.0-18.0	6.5-7.5	-	-	0.75-1.5 Al
632	1.4532	0.09	1.0	1.0	0.04	0.03	14.0-16.0	6.5-7.5	2.0-3.0	-	0.75-1.5 Al

\*) Ticari isim





Şekil 3.3. Paslanmaz çelik türlerine ait iç yapı görseli [51].

### 3.1. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

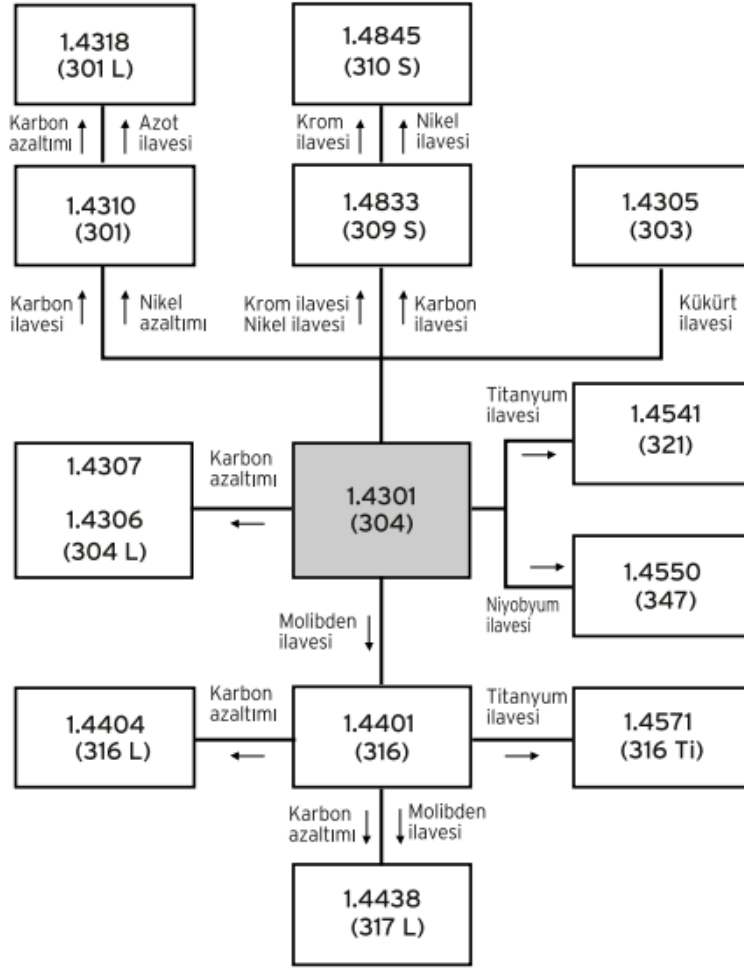
Östenitik paslanmaz çelikler üçlü alaşım olup temel olarak Demir-Krom-Nikel den oluşur. Tüm dünyada üretilen toplam paslanmaz çeliğin %65-70 kadarını östenitik paslanmaz çelik oluşturmaktadır [51]. Krom ve nikel içeren östenitik paslanmaz çeliklere 300 Serisi sınıflandırması ve krom, nikel ve manganez içeren östenitik çeliklere 200 Serisi sınıflandırması yapılır. Bununla birlikte, bazı östenitik paslanmaz çeliklerin bu 200 ve 300 Serisi tanımlarına sahip olmadığına da dikkat edilmelidir. Bu östenitik gruptaki çelikler birçok kimyasal kompozisyona ve özelliğe sahiptir, ancak birçok ortak özellikleri vardır. Bunlar;

- Soğuk işleme sertleştirilebilmelerine rağmen ısı ile sertleştirilemezler.
- Tavlanmış halde hepsi esas olarak manyetik değildir, ancak bazıları soğuk işleme hafifçe manyetik hale gelebilir.
- Tavlanmış durumda mükemmel şekillendirilebilirliğe sahiptirler.

Çeşitli derecelerde östenitik çelikler, birçok ortamda mükemmel korozyon direncine sahip olup atmosferin, birçok endüstriyel gazın ve birçok kimyasalın saldırısına karşı direnç gösterir. 1095°C kadar yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye karşı dirençlidirler. Tek bir östenitik alaşımın belirli bir ortamda korozyona veya oksidasyona karşı direnci, o çeliğin alaşım içeriğine bağlıdır. Bu çeliklerin çoğu yüksek sıcaklıklarda

iyi bir dayanıma sahiptir. Ayrıca diğer çelik türleri gibi kırılma hızı için aşırı düşük sıcaklıklarda kullanılmak üzere seçilen öncelikli malzemeler arasındadır. Tüm östenitik paslanmaz çelikler bir dereceye kadar klorür stresli korozyon çatlama karşı hassastır ve tamamen östenitik tipler, katılma çatlama karşı hassas olabilir. Bazı türler, olumsuz imalat ve kullanım koşulları altında karbür çökmesine veya metallar arası faz çökmesine karşı hassastır. 304 tipi paslanmaz çelik, östenitik grubun en yaygın kullanılan çeliğidir. Nominal bileşimi %18 krom ve %8 nikelidir [55].

Dayanım olarak östenitik paslanmaz çelikler diğer paslanmaz çeliklere göre daha düşük dayanıma sahiptir. Düşük olan bu dayanım değerleri soğuk çekme yöntemi ile artırılmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler yüksek esnekliğe sahip olup şekil verilebilirlikleri yüksektir. Özellikle derin iyi bir derin çekilebilme özelliğine sahiptirler [56]. Östenitik paslanmaz çelikler 1000 °C' ye kadar ısıtma ve ölçülere bağlı olarak havada veya suda hızlı soğutulmuş ısıtma tabii tutulurlar. Katı eriyik içerisinde homojen östenit oluşumu ısıtma ile sağlanmaktadır. Hızlı soğutmadaki amaç, bu homojen yapıyı koruyarak karbür çökmesinin engellenmesidir. İçeriğinde %0,05-0,10 C elementi içeren bir paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri 55-70 kg/mm<sup>2</sup> aralığında çekme dayanımı, 15-20 kg/mm<sup>2</sup> akma dayanımı ve %30-40 aralığında uzama (L=5d) değeri şeklinde olmaktadır [50]. Östenitik paslanmaz çeliklerde içerikte karbon ve azot elementinin varlığı akma dayanımının artmasına sebebiyet verirken titanyum elementinin varlığı ise çekme dayanımının düşmesine sebebiyet vermektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin yapıları soğutma sırasında oldukça düşük sıcaklık değerlerinde dahi martenzit yapıya dönüşmediklerinden dolayı martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin tersine esnekliklerini korurlar. Östenitik paslanmaz çelikler iyi bir kaynak edilebilirlik özelliğine sahiptir. Dayanımı yüksek ve tok kaynak dikişleri elde edilebilmektedir. Kaynak bölgesinde karbür çökmesi olabilmesi sebebiyle kaynak işleminden sonra tam tavlama gerekmektedir. Östenitik yapıdaki paslanmaz çeliklere ait şema ve içerikte yer alan element miktarlarının östenitik paslanmaz çelik kalitesi değişimlerine etkileri Şekil 4.4'de verilmiştir.

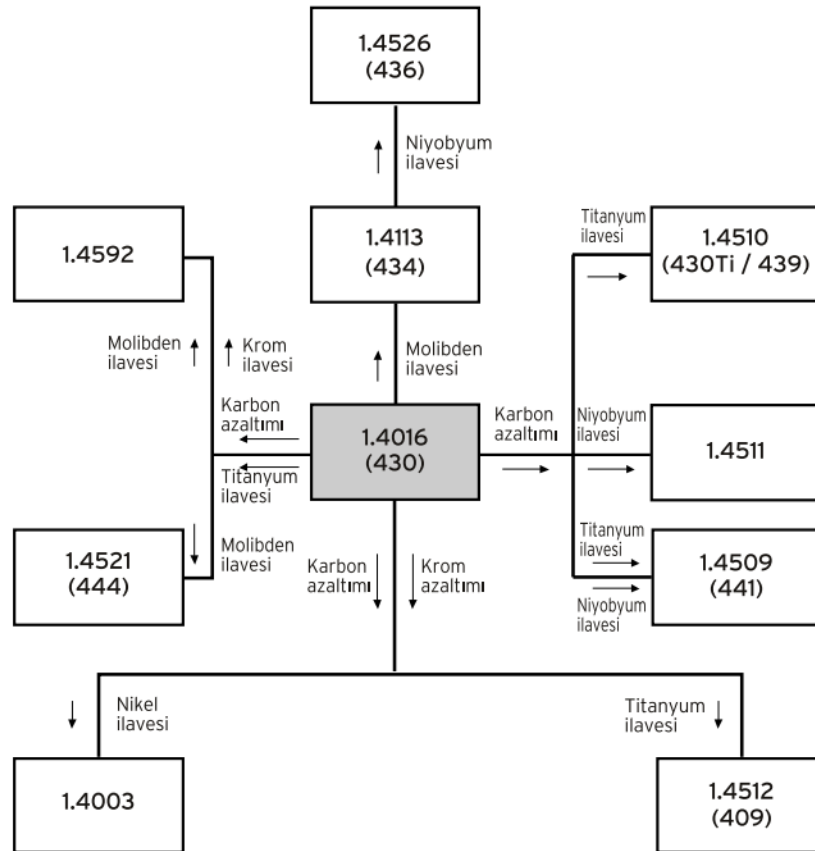


Şekil 3.4. Östenitik paslanmaz çelik kaliteleri [51].

### 3.2. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

Ferritik yapıdaki çelikler oda sıcaklıklar ve daha yüksek sıcaklıklarda hacim merkezli kübik kristal (demir elementinin sahip olduğu) yapısına sahip olup östenit-ferrit dönüşümü özelliği göstermezler. Bu dönüşümün olmaması sebebiyle ısıtılarak mekanik özellikler ve iç yapı değişimi söz konusu olmaz. Tavlı durumda 275 ile 350 MPa değer aralığında akma gerilmesi değerine sahiptirler. Tokluk değerleri oldukça düşük olup gevrekleşme hassasiyetleri söz konusudur. Bu sebeple kalın kesitlerde ve kaynaklı montajlarda makine parçası olarak kullanımları belirli durumlarda söz konusudur. Avantaj olarak korozyon ve oksidasyon dayanımlarının yüksek olduğu söylenebilir. Bu sınıfa giren çelikler manyetiklik özelliğine sahiptirler ve ısıtılarak mekanik özellikleri ile oynanamadığından yüksek dayanım özelliği

için ince tanelere sahip bir iç yapı gerekir. Ferritik çelikler %10,5'den başlayıp %30'lara kadar Krom içerebilirler. Bunun yanında az miktarda Karbon, Nikel ve Azot gibi östenit yapıcı elementler içerirler. Karbon elementi miktarı belirli bir miktara ulaşınca östenit yapıcı özelliğinden dolayı ferrit yapıcı özelliği kalkar. Bu sebepten dolayı martenzitik veya perlitik paslanmaz çelikler ortaya çıkar. Yüksek Karbon oranlarında bile Ferritik yapının ortaya çıkması isteniyorsa Krom içeriğinin de artırılması gerekir. Ferritik çelikler içerdikleri Krom miktarına göre sınıflandırılırlar. 405 ve 409 kaliteler %11-13 arası Krom içerirler. 430 ve 434 kaliteler %17, %19-30 arası yüksek Krom içeren 442 ve 446 kalite paslanmaz çelikler olmak üzere üç gruba ayrılırlar [51]. Ferritik yapıdaki paslanmaz çeliklere ait şema ve element miktarlarının ferritik paslanmaz çelik kalitesi değişimlerine etkileri Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Ferritik paslanmaz çelik kaliteleri [51].

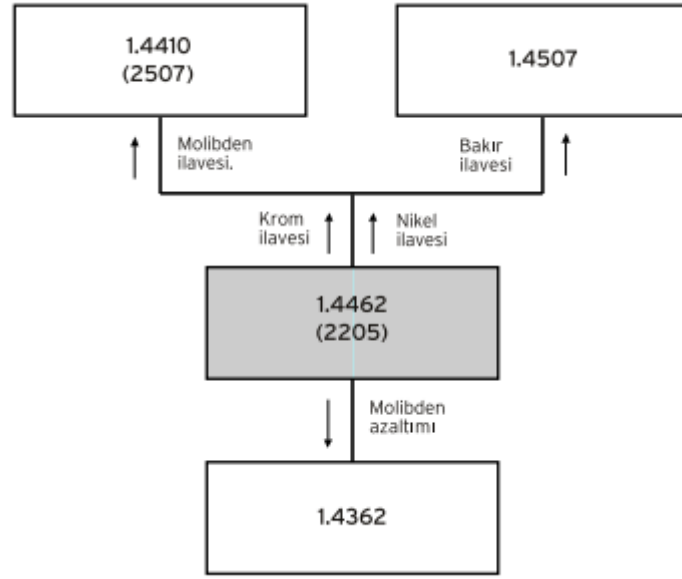
### 3.3. DUBLEX (ÖSTENİTİK-FERRİTİK) PASLANMAZ ÇELİKLER

Dublex paslanmaz çelikler %18 ila %28 arası Krom oranına sahiptirler. Bu değerler oldukça yüksek Krom oranı değerleridir. Ayrıca %4,5 ila %8 arası Nikel elementi de ihtiva ederler. En çok Nikel miktarı %8 olup, içyapının tamamıyla östenitik olması için yeterli değildir. Östenit ve ferrit fazlarından teşekkül olan içyapı sebebiyle bu tür çelikler dubleks paslanmaz çelikler olarak isimlendirilirler. İki fazın bir arada bulunması ile her iki tür paslanmaz çeliğe göre daha iyi özelliklere sahiptirler. Tavlanmış durumda dahi 690 MPa'a kadar akma dayanımı değerine sahiptirler. Bu değer fazların ayrı ayrı sahip oldukları dayanım değerinin iki katına yakın bir değerdir. Bu türe giren çeliklerin çoğunluğunun içeriğinde %2,5-4 Molibden bulunur. Böyle olması iyi mukavemet değerlerine sahip olmalarının yanında iyi süneklik özelliklerine de sahip olmalarını sağlar. Üstelik korozif özellikli ortamlarda bile yeterli seviyelerde yorulma dayanımlarına sahiptirler. Kaynak yapılabilirlikleri tavsiyelere uyulması durumunda rahatlıkla mümkün olmaktadır. Kaynaklı halde 250 °C sıcaklığa kadar kullanılabilirlerken kaynaklı halde 280 °C sıcaklığa kadar güvenli bir şekilde kullanılabilirler. Genellikle arıtma tesisleri, deniz ve off-shore teknolojileri ve kimyasallarla çalışılan aparat imalatında kullanılırlar. Genel kullanım alanları olarak deniz ortamı, tuzlu su ortamları, yüksek olmayan sıcaklık değerlerinde ısı değiştiricileri ve petrokimya tesisleri verilebilir.

Dublex Paslanmaz Çeliklerin Başlıca Özellikleri:

- Stres korozyonuna karşı yüksek direnç gösterirler.
- Klor iyonlarının mevcut olmadığı koşullarda daha fazla korozyon direnci gösterirler.
- Östenitik ve ferritik çeliklere göre daha yüksek mekanik dayanım değerlerine sahiptirler.
- Kaynak edilebilirlik ve şekil alma kabiliyetleri yüksektir.

Dublex yapıdaki paslanmaz çeliklere ait şema ve element miktarlarının dublex paslanmaz çelik kalitesi değişimlerine etkileri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Duplex paslanmaz çelik kaliteleri [51].

### 3.4. MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

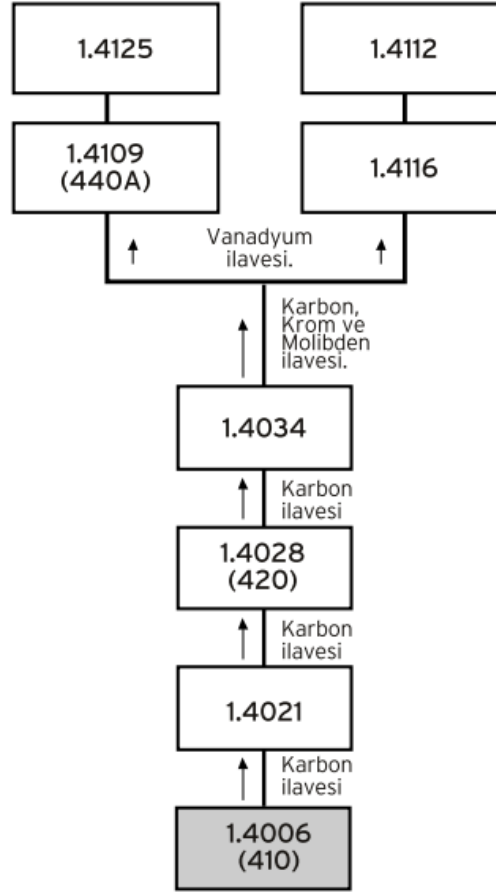
% 0,1 den daha fazla Karbon içeren çeliklerin iç yapıları yüksek sıcaklıklarda östenitiktir. Östenitleme sıcaklığı 950-1050°C arasında olup çeliğin türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bahsi geçen sıcaklıklara gelen çeliğe su verilirse iç yapısı martenzitik yapıya döner. Bu yapı sayesinde yüksek mekanik dayanım ve yüksek sertlik elde edilir ve bu değerler karbon yüzdesi ile artar. Ürün türü ile ilişkili olup genel olarak martenzitik çelikler tavlanmış veya ıslah edilmiş şekilde pazarlanır. Tavlanmış ürünler şekil verildikten sonra sırası ile su verme ve temperleme işlemine tabi tutulurlar. Bu işleme ıslah işlemi adı verilir. Değişik temperleme sıcaklıkları uygulanarak farklı özellikte ürünler elde edilebilir. Korozyon dayanımının yüksek olabilmesi için daha önce belirlenmiş tavsiye edilen sıcaklıklara uyulması gerekmektedir. Ameliyat aletleri, bıçaklar ve miller kullanım alanlarından birkaçıdır.

#### Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Başlıca Özellikleri

- Korozyon dayanımı olarak orta derecede bir dayanıma sahiptirler.
- Yüksek dayanım ve sertlik değerleri elde edilebilmesi için ısıl işlem uygulanabilir.
- Düşük bir kaynak edilebilme kabiliyetine sahiptirler.

- Manyetiklik özelliğine sahiptirler.

Martenzitik yapıdaki paslanmaz çeliklere ait şema ve element miktarlarının martenzitik paslanmaz çelik kalitesi değişimlerine etkileri Şekil 4.7’de verilmiştir.

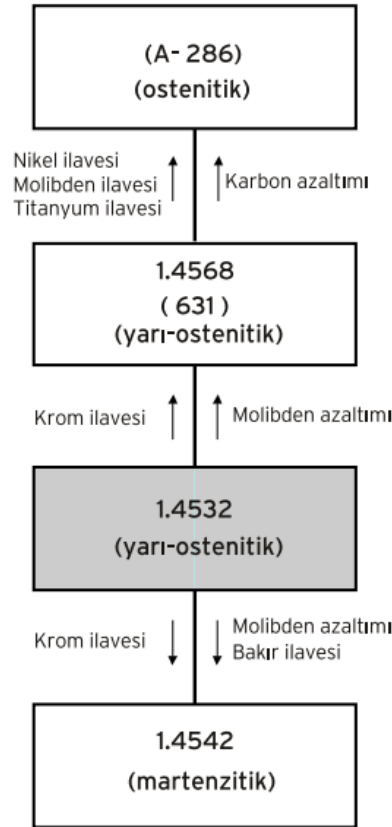


Şekil 3.7. Martenzitik paslanmaz çelik kaliteleri [51].

### 3.5. ÇÖKELME SERTLEŞMELİ PASLANMAZ ÇELİKLER

Teknikte yaşlandırma olarak tabir edilen çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelik türüdür. İç yapıları esasen martenzitik veya östenitik olabilir. İçeriklerindeki karbon miktarlarının azlığı sebebiyle martenzitik yapıda olanlarında dahi sertleşme ancak çökelmeye bağlı gerçekleşir. Alüminyum, Titanyum, Bakır ve Niyobyum elementleri yapılan alaşımlama neticesinde çökelti oluşturulabilir. İyi süneklik ve tokluk değerlerine sahip olmakla beraber korozyon dirençleri de oldukça

yüksektir. Martenzitik paslanmaz çeliklerle mukayese edilecek olursa korozyon dayanımı ve mukavemet olarak iyi bir durumdadırlar. Bunun başlıca sebebi ise alaşım elementi miktarının yüksek ve Karbon miktarının ise düşük olmasıdır (maks.%0,04). Bundan dolayı aşınma dayanımı düşüktür. 1700 MPa değerine kadar akma dayanımına sahiptirler [51]. Soğuk şekillendirme yapılmasından sonra yaşlandırma işlemine tabi tutulmaları durumunda bahsi geçen değer daha da yükseltilebilmektedir. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, yaşlandırma işlemi sonrasında martenzitik paslanmaz çeliklerin sahip oldukları mekanik özelliklerle ve östenitik paslanmaz çeliklerin sahip oldukları korozyon direncine ulaşabilirler [57]. Bu tür paslanmaz çeliklerin uçak ve uzay teknolojileri alanında yaygın kullanımı söz konusudur. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklere ait şema ve element miktarlarının çelik kalitesi değişimlerine etkileri Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelik kaliteleri [51].



## BÖLÜM 4

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Farfan-Cabrera ve ark. elektrikli kuru ve sınır yağlamalı temas koşulları altında yeni bir iki elektrotlu hücre tabanlı mikro aşınma test cihazı kullanarak AISI 52100 rulman çeliğinin temas arayüzleri aracılığıyla Doğru Akım (DC) deşarjlarının etkilerini araştırmışlardır. Numuneler farklı dielektrik dayanımlara sahip bir mineral baz yağ (referans olarak), bir dişli yağı ve bir otomatik şanzıman sıvısı (ATF), elektriksiz ve DC elektrikli (1,5 A) koşullar altında test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre genel olarak, geçen DC akımının Sürtünme Katsayısını (CoF) ve kuru temas aşınmasını artırdığını göstermiştir [58].

Çok Dolgulu Takviyeli Epoksi Kompozitler (MFREC), Tian ve diğerleri tarafından hazırlanmış ve analiz edilmiştir. MFREC'in mekanik, termal özellikleri, sürtünme davranışları ve aşınma mekanizmaları sistematik olarak incelenmiştir. Araştırma sonuçları, MFREC çekme tokluğundaki artışın (%98,46) esas olarak çoklu dolgu maddesi takviyesi nedeniyle çekme mukavemetindeki (%9,56), gerilme modülündeki (%22,07) ve kopmadaki uzamadaki (%39,09) iyileşmeye atfedildiğini göstermiştir. Yüklerdeki ve sıcaklıklardaki artışlar, temas durumundaki değişiklik nedeniyle MFREC'in aşınma oranı ve hat pürüzlülüğü pahasına sürtünme katsayılarını azalttığı görülmüştür. Ek olarak, transfer tabakasının oluşumu ve su filminin yağlanması nedeniyle, kayma hızlarının ve su ile yağlamanın MFREC üzerindeki etkileri, yüklere ve sıcaklıklara kıyasla daha belirgin olmamıştır [59].

Rodiouchkina ve diğerleri tarafından, strok uzunluğunun, hidroelektrik türbinlerdeki yataklar için yaygın olarak kullanılan iki kendinden yağlamalı polimer kompozitin, paslanmaz çeliğe karşı kuru kayma sırasında tribolojik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Pistonlu testler, belirlenen koşullar altında, yani bir hidroelektrik türbininin yıllarca çalışmasına karşılık gelen yüksek basınçlar ve uzun kayma

mesafesi altında gerçekleştirilmiştir. Aşınmış polimer ve paslanmaz çelik yüzeyler, aşınma ve sürtünme mekanizmalarını incelemek için 3D optik yüzey profilometresi ve SEM/EDX kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, özellikle strok uzunluğunun polimer pimin uzunluğundan daha uzun olduğunda, her iki yatak malzemesi için artan strok uzunluğu ile artan bir aşınma oranı olduğunu ortaya çıkartmıştır. Termoset, sürtünme davranışı için aynı eğilimi gösterir ve kayma arayüzünde transfer katmanları ve katı yağlayıcılar tarafından kaplamanın azalmasının yanı sıra paslanmaz çeliğin abrazyon aşınmasındaki artışa atfedilir. Bu arada, termoplastik için en yüksek sürtünme en kısa strokta ve en düşük ara strokta gözlenmiştir. Yüzey analizi, daha düşük aşınma partikülü tutulması nedeniyle her iki yatak malzemesi için en uzun strok uzunluğunda paslanmaz çelik karşı yüzeyin daha yüksek aşınma aşınmasını ortaya koymaktadır. Kayma genliğindeki değişikliklerin, paslanmaz çeliğe karşı kayan iki polimer kompozitin tribolojik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir [60].

Holmberg ve ark. kuru ve yağla yağlanmış çelik ile çelik ve Elmas Benzeri Karbon (DLC) kaplı çelik ile DLC kaplı çelik kayar kontaklarda yüzey pürüzlülüğünün ve topografik yönelimin sürtünme ve aşınma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüzeyler, 0,004 ve 0,11 µm arasında bir merkez çizgisi ortalama pürüzlülüğüne (Ra) ve kayma yönüne göre 0°, 45° ve 90° topografik oluk yönelimine sahipti. Yapılan testler, topografik yönlerin oryantasyonunun en güçlü etkisinin, kuru kayan DLC'ye karşı DLC temaslarında meydana geldiğini göstermiştir. Pürüzsüz yüzeyler için 0,04'lük düşük sürtünme katsayıları ve kayma yönü boyunca yönlendirilmiş kanallara sahip pürüzlü yüzeyler sergileyen, süper kaygan bir DLC yüzey tabakası verimli bir şekilde oluşturulmuştur. Yüzey tabakası oluşumu süreci, kayma yönüne 45°de yönlendirilmiş yivler ile ortalama yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir. Bu yüzeyler için sürtünme katsayısı, pürüzsüz numunelere (0,04) kıyasla yaklaşık beş kat daha yüksek (0,21) olmuştur. Kuru kayan çelik temaslarında, artan yüzey pürüzlülüğü ile sürtünme katsayısı azalmıştır. Öte yandan, yağlamalı çelik temaslarda yüzey pürüzlülüğü ile sürtünme katsayısı artmıştır. DLC'ye karşı DLC kayar kontakına sentetik bir yağ eklenmesi, süper kaygan yüzey tabakasının oluşumunu engellemiştir. Döner çelik ve çelik teması ile yapılan deneylerde sürtünme katsayısı, lineer karşılıklı kayma ile yapılan deneye göre yaklaşık %10

daha düşük olmuştur ancak DLC'ye karşı DLC temaslarında bu değer daha yüksek olmuştur [61].

Zhang ve ark. oda sıcaklığında bir ball-on-disc tribometre kullanarak kuru ve suyla yağlamalı kayma koşulları altında plazma püskürtmeli Ni60 ve ağırlıkça %5 SiO<sub>2</sub>-Ni60 kompozit kaplamaların aşınma davranışlarını karşılaştırmalı olarak araştırmıştır. Ayrıca, püskürtülen iki kaplamanın sürtünme testinden önce ve sonra faz bileşimleri ve aşınmış izleri, her iki kaplamanın ana aşınma mekanizmalarını göstermek için X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskopu yoluyla incelenmiştir. Ve sonuçlar, SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının Ni60 alaşımına dahil edilmesinin, özellikle suyla yağlama kayma koşulu altında, ağırlıkça %5 SiO<sub>2</sub>-Ni60 kompozit kaplamanın aşınma direnci performansını iyileştirmede kritik bir etki oynadığını ortaya koymuştur. Bunun nedeni, sürtünme testi sırasında deiyonize suyun soğutma ve su ile yağlama etkisi ile nanopartiküllerin dolgu ve parlatıcı etkisi olarak bulunmuştur. Ayrıca, sürtünme sırasında nanoparçacıkların stresini kapsamlı bir şekilde analiz etmek için ağırlıkça %5 SiO<sub>2</sub>-Ni60 kompozit kaplamanın aşınma davranışlarının model diyagramı da oluşturulmuştur [62].

Zhou ve ark. kompozitin aşınma arızası mekanizmasını daha iyi anlamak için grafit/sermet kendi kendini yağlayan malzemenin farklı hızlarda ve yüklerde kuru kayma aşınması deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Değişken koşullar altında aşınmış morfolojiler ve aşınmış yüzeyler üzerindeki kimyasal bileşimler, sırasıyla taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDX) ile analiz edilmiştir. Ek olarak, kayma sırasında kendiliğinden çiftleşen sermet kompozit çiftlerinin geçici sıcaklık alanı, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile simüle edilmiştir. Sonuçlar, grafit/sermet kompozitin hacimsel aşınma oranının kayma hızı veya yükün artmasıyla artacağını, ancak yükte aşınma oranındaki artışın dalgalanmasının düşük hızda önemli olmadığını göstermiştir. Grafit/sermet kompozitin ana aşınma mekanizması, oksidasyon ve yapışmanın bir karışımıdır ve oksit filmin delaminasyonu, artan yük ile artar. Ayrıca, sonlu elemanlar simülasyonu, sürtünmeden kaynaklanan maksimum sıcaklığın, iki sürtünen çift arasındaki temas yüzeyinin çıkış bölgesine yakın olduğunu göstermiştir [63].

Chauhan ve ark. saf vinilester (V), cam elyaf takviyeli (GFR), SiC dolgulu cam elyaf takviyeli vinilester kompozitin kuru ve suyla yağlamalı kayma koşulları altında tribolojik performansını incelemiş ve geliştirmişlerdir. Sürtünme ve aşınma testleri, ortam koşullarında dönen bir pin-on-disc konfigürasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Testler 10, 30 ve 50 N normal yükte ve 1,6 m/s, 2,8 m/s ve 4 m/s kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, hem kuru hem de suyla yağlamalı koşullarda uygulanan normal yük değerlerinin artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığını göstermiştir. Öte yandan, saf vinilester için özgül aşınma oranı, kuru kayma koşulunda uygulanan normal yükün artmasıyla artar ve suyla yağlamalı koşullar altında uygulanan normal yükün artmasıyla azalır. Ancak GFR vinylester kompozit ve SiC dolgulu GFR vinylester kompozit için spesifik aşınma oranı, hem kuru hem de su ile yağlanan koşullar altında uygulanan normal yükün artmasıyla azalır. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan yük aralığı ve hızlar için sürtünme katsayısı ve su yağlama maddesi kullanan spesifik aşınma oranları için, kuru duruma göre daha düşük değerler kaydedilmiştir. Saf vinilester ve vinilester + ağırlıkça %50 GFR ve SiC dolgulu GFR vinilester kompozit için kuru ve suyla yağlamalı kayma koşullarında spesifik aşınma oranları  $10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/Nmm mertebesinde olmuştur [64].

Meng ve ark. farklı normal yüklerde bir pin-on-disk aşınma test cihazı kullanılarak kuru kayma ve suyla yağlama koşulları altında karbon nanotüple güçlendirilmiş poliamid 6 (PA6/CNT) kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışını karşılaştırmalı olarak çalışmışlardır. Kompozitlerin aşınmış yüzeylerinin ve karşı yüzeylerinin morfolojileri de taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenmiştir. Sonuçlar, CNT'lerin PA6 matrisi üzerindeki etkili takviye edici ve kendi kendini yağlayan etkilerinden dolayı, CNT'lerin her iki kayma koşulunda da PA6'nın aşınma direncini artırabildiğini ve sürtünme katsayısını önemli ölçüde azaltabildiğini göstermiştir. Kompozitler, kuru kaymaya göre su ile yağlanmış koşullar altında daha düşük sürtünme katsayısı ve daha yüksek aşınma oranı sergilemiştir. Suyun soğutma ve sınır yağlama etkisi kompozitlerin sürtünme katsayısını düşürmeye katkıda bulunsa da, adsorbe edilen su kompozitlerin mukavemetini düşürmüş ve ayrıca karşı yüzeylerde transfer tabakalarının oluşumunu engelleyerek daha az aşınma direnci sağlamıştır. Artan normal yüklerle birlikte, kompozitlerin sürtünme katsayısı, kayma

mukavemeti ve gerçek temas alanlarının tutarsız etkileri nedeniyle kuru kayma altında artmış ve suyla yağlanmış durumda azalmıştır. Kompozitlerin özgül aşınma oranları her iki kayma koşulunda da artmıştır [65].

Pchlik ve Sampath, art arda yağlanan ve kuru kayma aşınmasına maruz kalan, hafriyat aracı alt takımı bileşenlerinde uygulanması düşünülen, termal olarak püskürtülen beş kaplama hazırlamış ve incelemiştir. Farklı temas koşulları altında aşınma tepkisini kontrol eden faktörleri ortaya çıkarmak için dört farklı aşınma deneyi kullanılmıştır. Temas gerilmeleri bilgisi ile bağlantılı olarak kaplamanın yerel ve genel mukavemetini dikkate alan bir yaklaşım, test edilen malzemeler için belirli temas koşulları altındaki ana aşınma modlarının anlaşılmasına yardımcı olmuştur. Deney, daha düşük temas gerilimlerinin olduğu durumlarda, kaplamanın temas tepkisinin doğrudan levhalar arası bağlanma mukavemeti ve sertliği ile değil, daha çok yerel levha özellikleriyle ilişkili olabileceğini göstermiştir. Gözenekli bir yapının, yüksek temas gerilimi altında kuru ortamda nikel alüminyum kaplamanın aşınma direncini sınırlamasına rağmen, yarı yağlamalı kaymada faydalı olabileceği gösterilmiştir [66].

Jia ve ark. saf su güç iletimi pompaları için uygun malzemeleri seçmeyi amaçlayan kuru kayma ve suyla yağlama koşullarında kısa kesilmiş karbon fiber ve grafit, MoS<sub>2</sub> ve Politetrafloroetilen (PTFE) gibi katı yağlayıcılarla güçlendirilmiş yüksek performanslı Poliimidin (PI) ve kompozitlerinin sürtünme ve aşınma davranışını karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Kompozitlerin iki farklı kayma koşulu altındaki aşınma mekanizmaları da, aşınmış kompozit ve çelik muadil yüzeylerin taramalı elektron mikroskopik incelemesine dayalı olarak karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Sonuç olarak, katı yağlayıcıların ve karbon fiberin PI'ye dahil edilmesi, sürtünme ve aşınma davranışını önemli ölçüde iyileştirmeye katkıda bulunmuştur. Paslanmaz çeliğe karşı kayan PI bazlı kompozitlerde, suyla yağlanan koşullarda kuru kaymaya göre daha düşük sürtünme katsayıları ve aşınma oranları ortaya çıkmaktadır. Kompozitlerin aşınma oranlarındaki fark, su emme tabakasının sınır yağlama etkisi nedeniyle su ile yağlama altında sınırlanır, ancak bu durumda PI ve kompozitlerinin transferi önemli ölçüde engellenmiştir. PI ve kompozitleri, hem kuru hem de suyla yağlanan kayma altında plastik deformasyon, mikro çatlama ve

pullanma ile karakterize edilir. Bu tür plastik deformasyon, mikro çatlama ve parçalanma, suyla yağlanmış durumda önemli ölçüde azalır. Bu durum suyla yağlanan koşullar altında kompozitlerin daha iyi sürtünme ve aşınma davranışını açıklamaktadır [67].

Yapılan literatür araştırmasının sonucunda; abrazif aşınma konusunda ortam parametresinin önemi ortaya çıkmaktadır. Ortam olarak yağlamalı ortamlar ve kuru ortam seçilmiştir. Çalışmalarda ortam parametresinin yanında yük parametresinin etkisi üzerine de odaklanılmıştır. Parametre etkileri farklı deney düzenekleri kullanılarak incelenmiştir. Özellikle yağlamalı ortam şartlarının değişimi ile aşınmanın etkilerinin azaltılması sağlanmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında yapılan bu çalışmanın amacı AISI2205 dubleks paslanmaz çelik malzemenin abrazif aşınma performansına ortam ve yük parametresinin etkilerinin incelenmesidir. Deney düzeneği olarak Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan özgün tasarım ball-on-flat deney düzeneği kullanılmıştır.

## BÖLÜM 5

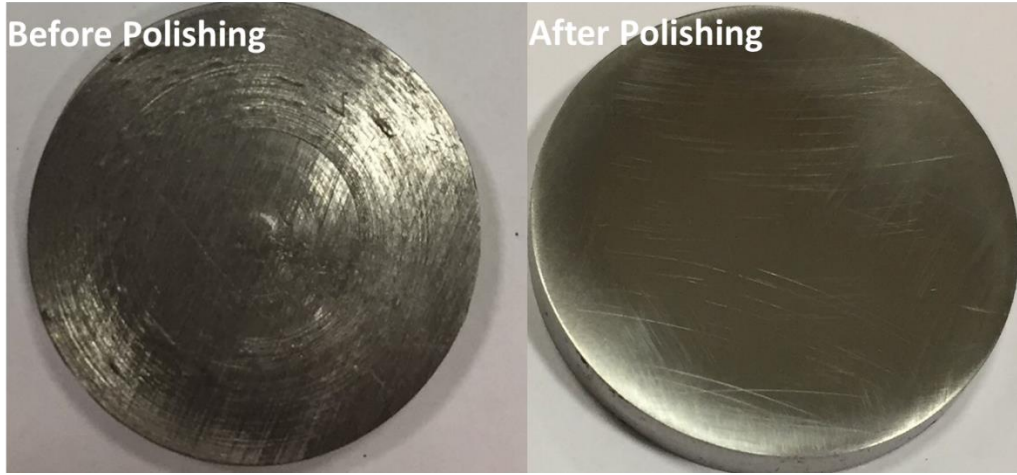
### MATERYAL METOT

#### 5.1. MALZEMELER

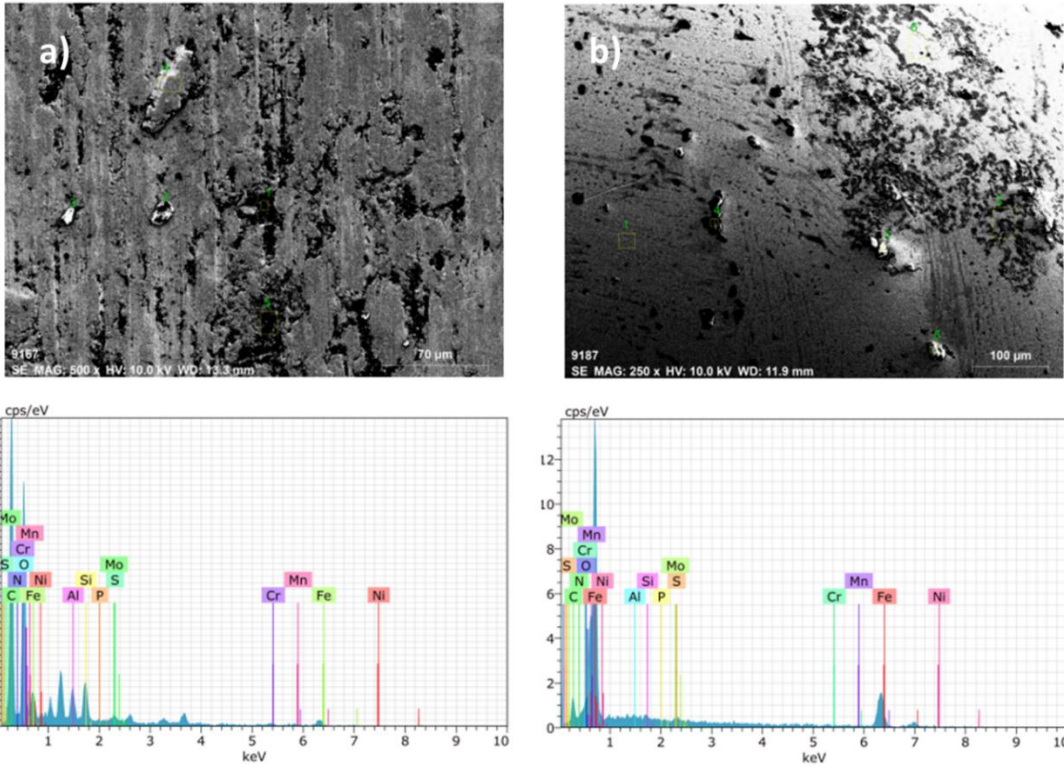
Deneyleerde  $\text{Ø}30 \times 4$  mm ölçülerinde AISI 2205 kalite Ferritik-Östenitik (dublex) paslanmaz çelik numuneler kullanılmıştır. Numunelerle beraber, aşındırıcı malzeme olarak küresel geometriye sahip (SØ6mm) AISI 52100 (100Cr6) kalite malzeme uygulanmıştır. Numuneler ve 100Cr6 bilyeler Şekil 4.1'de gösterilmektedir ve numuneler Şekil 4.2'de gösterildiği gibi parlatılmış ve temizlenmiştir. AISI 2205 ve AISI 52100 kalite malzemelere ait SEM ve EDX görüntüleri ise Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 5.1. AISI 2205 kalite numuneler ve AISI 52100 kalite aşındırıcı toplara ait görsel.



Şekil 5.2. AISI 2205 kalite parlatılmamış ve parlatılmış numunelere ait görsel.



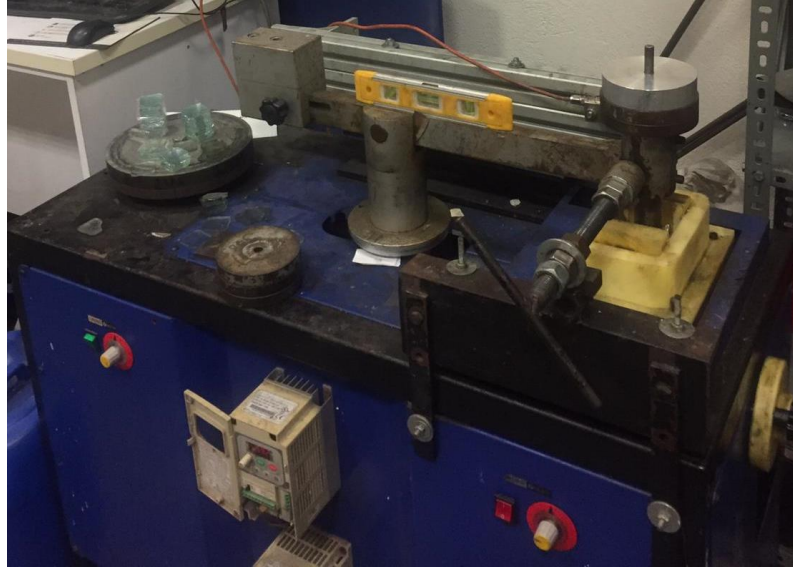
Şekil 5.3. a) AISI 2205 ve b) AISI 52100 kalite malzemelere ait SEM ve EDX görüntüleri.

## 5.2. AŞINMA TESTLERİ VE ORTAMLAR

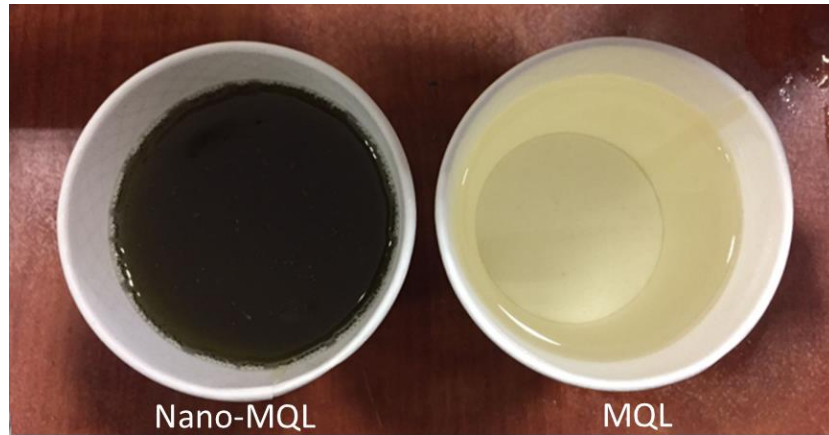
Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, ortam sıcaklığında yapılan ball-on-flat deney çalışmalarını yapmak için Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM - American Society for Testing and Materials) G133 standardındakine



benzer özgün bir aşınma cihazı kullanılmıştır [68-70]. Aşınma cihazı üst limit olarak yaklaşık 80 mm/s'ye eşit bir kayma hızı değerine sahiptir. Ayrıca kuru, MQL ve nano-MQL ortam koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Kuru ortam koşullarında yapılan deneyler herhangi bir yağlama sıvısı olmadan yapılmıştır. MQL ve nano-MQL koşullarında, yağ püskürtme hızı sprey şeklinde ve 40 mL/saat değerinde sabit olarak uygulanmıştır. Yağlama sıvısı olarak hem MQL hem de nano-MQL yağlama şartlarında çevreye zararı olmayan bitkisel bir yağ kullanılmış olup 5 bar hava basıncı ile uygulanmıştır. MQL yağına ağırlıkça %1,2 konsantrasyondaki grafen nanopartikülleri ilave edilerek yağlayıcı olarak kullanılmıştır. Farklı yağlama malzemeleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. G133 ASTM aşınma cihazı.



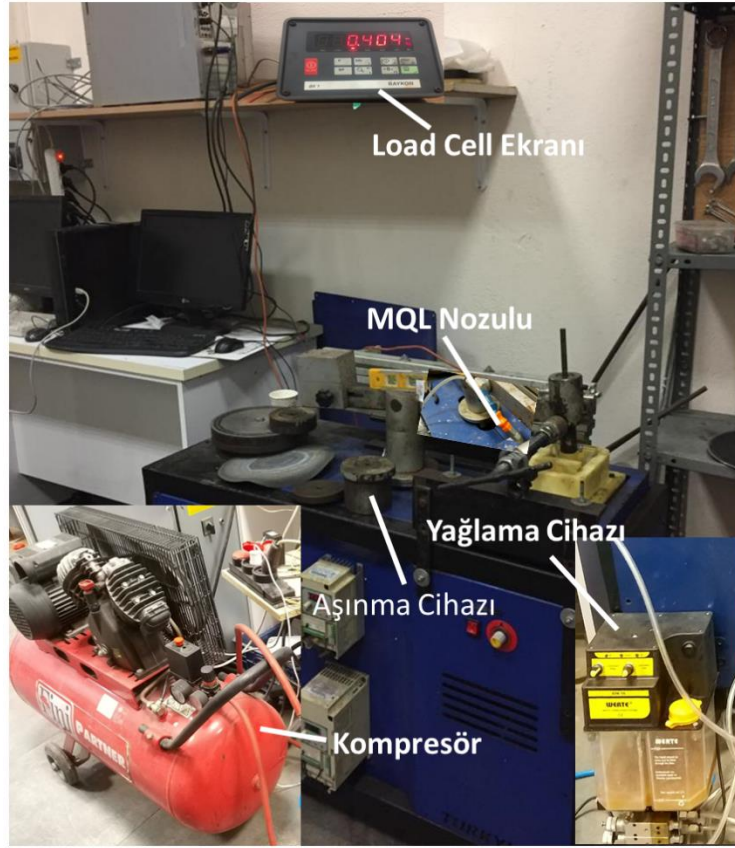
Şekil 5.5. Yağlayıcılar, a) nano-MQL, b) MQL.

### 5.3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Şekil 4.6'da deneylerde kullanılan yükler ve hız ayarının yapıldığı sürücü paneline ait görselleri verilmiştir. Deneylerde 30-40-50 N'luk 3 farklı yük değeri ve 80 mm/s'lik sabit kayma hızı değeri kuru MQL ve Nano-MQL (Minimum Quantity Lubrication-Minimum Yağlama Miktarı) ortam koşulları için kullanılmıştır. Literatürde [69-70] ağırlıklı olarak kullanılan aşınma mesafesi, ASTM standartlarına uygun olarak 100 m'dir. Sonuç olarak, 80 mm/s hızda aşınma testi yaklaşık 24 dakika sürmektedir. Yağlama sistemleri ve ekipmanları gösteren deney düzeneği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 5.6. Deneylerde kullanılan yükler ve hız ayar sürücüsü.



Şekil 5.7. Deney düzeneği.

#### 5.4. AŞINMANIN TESPİTİ

Aşınma miktarının tespitinde Hacim kaybı ( $\Delta V$ ) hesabı önem arz etmektedir. Hacim kaybı eşitlik 4.1 yardımıyla hesaplanmaktadır [71]. Bu denklemde kullanılan  $\Delta V$  değeri  $\text{mm}^3$  cinsinden hacimsel kaybı,  $w_w$  değeri mm cinsinden iz genişliği,  $w_d$  değeri mm cinsinden iz derinliği ve  $s$  değeri ise mm cinsinden iz boyu değerleridir.

$$\Delta V = \frac{2}{3} * w_w * w_d * s \quad (4.1)$$

Sürtünme katsayıları ise deney düzeneği üzerinde yer alan bir load cell yardımı ile deney süresince sürekli yapılan ölçümler sonucunda elde edilmiştir. Sürtünme katsayıları sistem tarafından  $F_f$  – sürtünme kuvveti ve  $F_n$  - normal kuvvet değerlerinden faydalanılarak elde edilmiştir. Deneylerin sonunda izler üzerinde SEM ve EDX analizleri yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

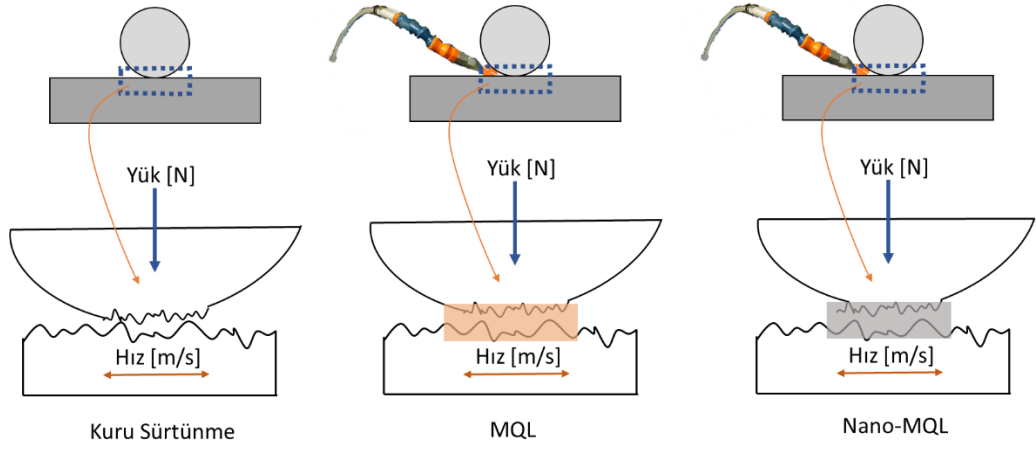
## 5.5. ORTAM KOŞULLARI

### 5.5.1. MQL

Kısa gösterimi MQL olan ve minimum miktarda yağlama olarak bilinen bu yöntem temiz bir yöntem olan ve ortam neredeyse kuru olarak kabul edilir. MQL yöntemi ile yağlama işlemi sırasında aşınma bölgesine oldukça düşük miktarda bir yağlama sıvısı gönderilir. En zor koşullar için bile genellikle yaklaşık olarak 10–100 mL/saat'e eşit bir akış hızı kullanılır. MQL, çevre dostu bir yağlama/soğutma yöntemi olarak kabul edilmiştir [68,72-73]. Ayrıca çok sayıda araştırmacı MQL yöntemi ile soğutmanın özellikle talaşlı imalat proseslerinde standart ıslak veya kuru işlemeye benzer veya gelişmiş işlenebilirlik sağlama imkânı tanıdığını tespit etmiştir. Literatürde, Titanyum da dahil olmak üzere çeşitli alaşımların kesilmesi ve işlenmesi sırasında MQL yönteminin kullanımına ilişkin çalışmalar mevcuttur [74–75].

### 5.5.2. Nano-MQL

Temas halindeki yüzeylerde aşınma ve sürtünmeyi azaltmak için, havacılık, otomotiv ve endüstrinin birçok yerinde yağlama yağına katkı maddesi olarak nanoparçacıklar kullanıldı. Çeşitli element ve bileşiklere ait nanoparçacıkların pozitif sürtünme adaptasyonu ve aşınmaların önlenmesi gibi durumlarda olumlu etkileri oluşturmuştur [76-77]. Kullanılan bir yağlayıcı için kararlı bir nanoparçacık karışımı önemlidir [78,79]. Nanoparçacıkların yağlayıcılara eklenmesi, sürtünme katsayısını önemli ölçüde azaltır ve mekanik sistemlerdeki sürtünen kısımlarında yük taşıma kabiliyetini yükseltir [80]. Bu tür sistemlerde performansı yüksek, enerji tasarrufu sağlayan, çevre dostu ve etkili yağlayıcılar gerekir. Geçen yıllarda nanoparçacıklar, emisyonları azaltma olasılıkları nedeniyle yağlama katkı maddeleri olarak önemli görevler üstlenmeye başlamıştır [81,82]. Grafen farklı malzemelerin sürtünmesini dolayısı ile aşınmasını azaltma yetenekleri nedeniyle farklı araştırmacılar tarafından yağlayıcı katkı maddesi olarak uygulanmıştır [83-84]. Deneylerde kullanılan ortam koşullarına ait şematik görsel Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Deneylerde kullanılan ortam koşulları.

## BÖLÜM 6

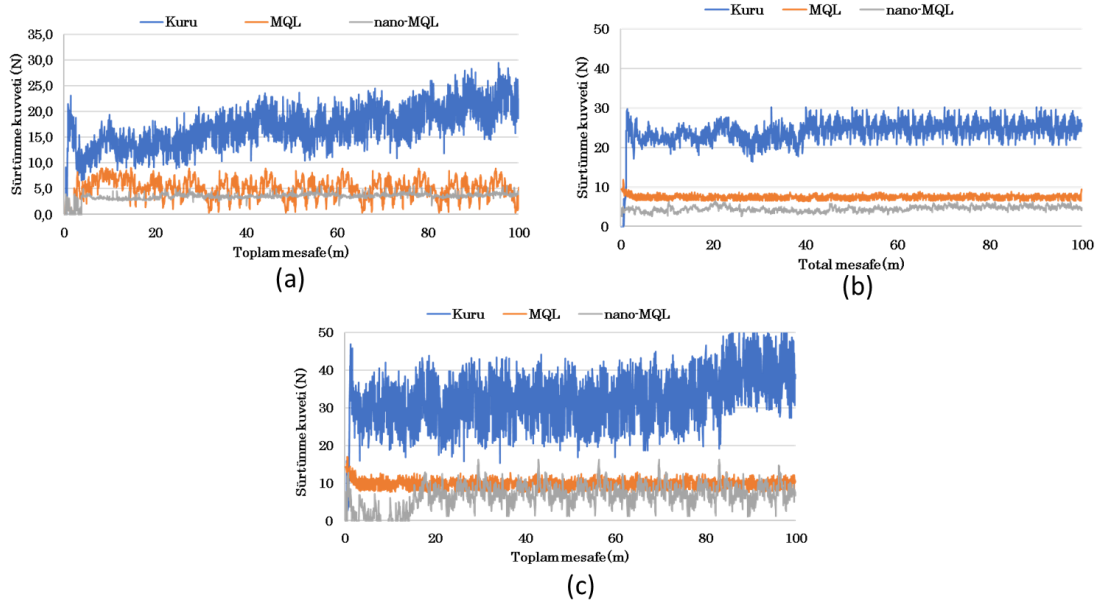
### ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

#### 6.1. SÜRTÜNME KUVVETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 6.1'de, kuru koşullarda ve 80 mm/s'ye eşit bir kayma hızında, en yüksek sürtünme kuvveti değerinin 50 N yükte 32,54 N olduğu gözlenmiştir. Ancak bu değer 40 N yükte 24,25 N ve 30 N yükte 17,10 N olarak elde edilmiştir. Yük 50 N'den 30 N'a değiştirildiğinde sürtünme kuvveti değerinde %47,44'lük bir azalma meydana gelmiştir.

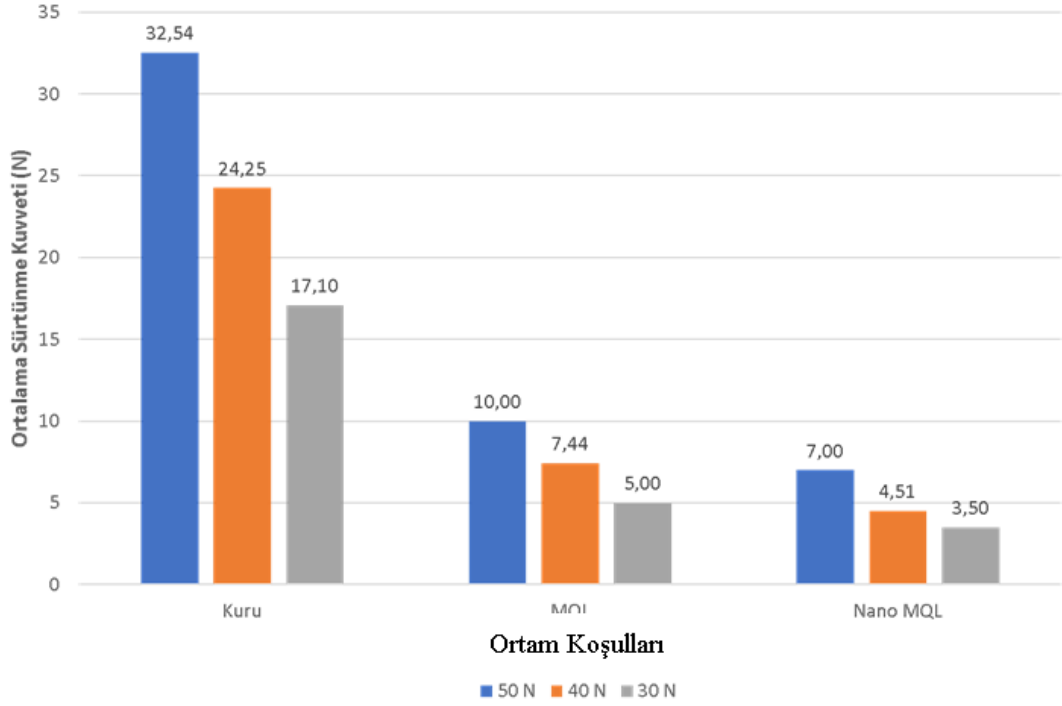
MQL koşulunda 50 N yükte sürtünme kuvvetinin en yüksek değer olan 10 N olduğu görülmektedir. 40 N yükte sürtünme kuvveti 7,44 N olurken 30 N yükte 5 N olduğu tespit edilmiştir. Bu koşullarda 50 N yükten 30 N yüke kaydırıldığında sürtünme kuvveti değerinde %50'lik bir azalma olmaktadır.

Nano MQL koşulunda ise 50 N yükte sürtünme kuvveti 7 N değerini alırken 40 N yükte 4,51 N ve 30 N yükte 3,5 N olmaktadır. Bu koşullarda 50 N yükten 30 N yüke geçişte sürtünme kuvveti değerinde %50'lik bir azalma meydana gelmektedir.



Şekil 6.1. Farklı koşullarda mesafeye karşı sürtünme kuvveti, a) 30 N yük, b) 40 N yük, c) 50 N yük.

Çalışma koşulu MQL'den kuru ortama geçmesi durumundan sürtünme kuvveti değeri 50 N yükte %225,4, 40 N yükte %225,9 ve 30 N yükte ise %242 artmıştır. Çalışma koşulu Nano MQL'den kuru ortama geçmesi durumunda ise sürtünme kuvveti değeri 50 N yükte %364,9, 40 N yükte %437,7 ve 30 N yükte %388,57 arttığı Şekil 6.2'de görülmektedir. Diğer koşullara kıyasla Nano MQL koşullarında daha az sürtünme kuvveti sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlara bağlı olarak, normal yükler azaldığında sürtünme kuvvetleri anlamlı bir şekilde değişmektedir. Sürtünme kuvveti değerleri azalan düzende sıralandığında en yüksek kuru ortam, ardından MQL ve ardından da Nano MQL gelmektedir. Kuru koşullarda, gereksiz sürtünme ve ısı üretimi nedeniyle en yüksek sürtünme kuvveti değerleri elde edilir [68].



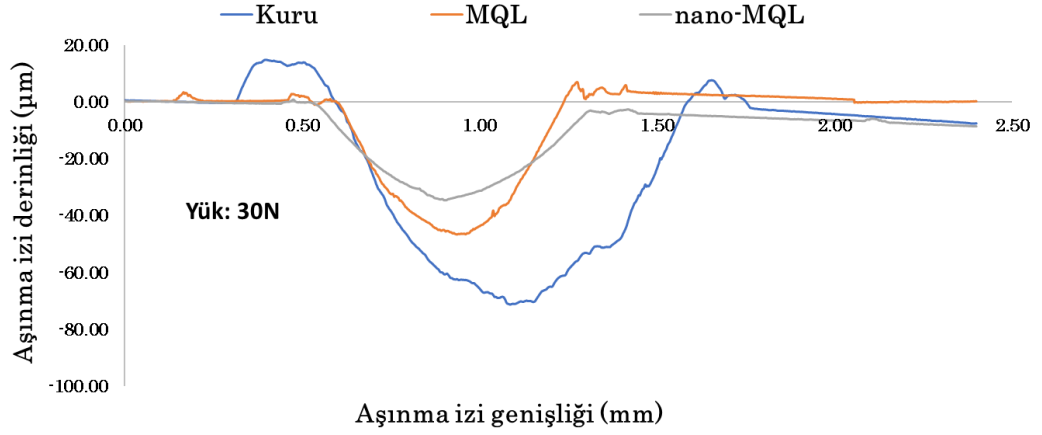
Şekil 6.2. Çeşitli koşullarda ve yüklerde ortalama sürtünme kuvveti.

## 6.2. AŞINMA DERİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

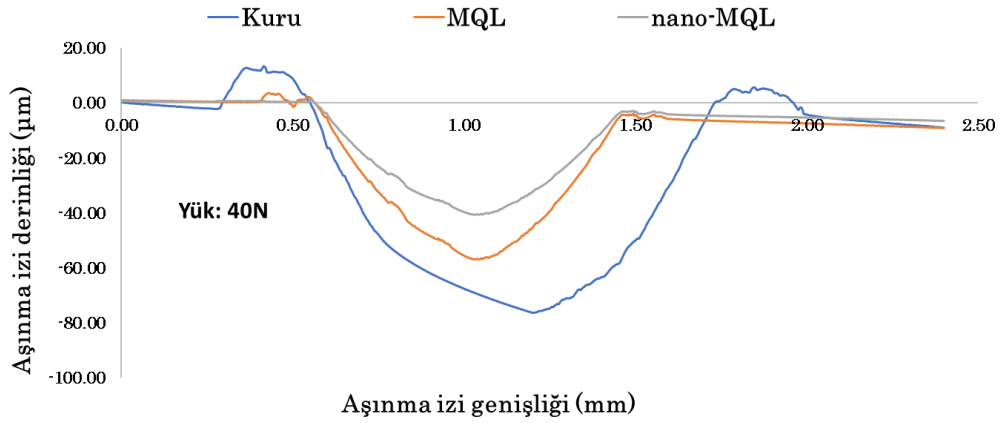
Aşınma derinliği, esas olarak belirli bir malzemenin tribolojik davranışını tahmin etmek için kullanılan önemli bir özellik olarak kabul edilir. Aşınma derinliğinin analizi, aşağıdaki Şekillerde (6.3, 6.4, 6.5) gösterildiği gibi 2D çizim grafikleriyle yapılır. Kuru durumda, 80 mm/s'ye eşit kayma hızında, incelenen aşınma derinliği değerleri 50 N yükte 85,84  $\mu m$ 'ye eşit bir değer göstermektedir. Yük 40 N olarak değiştirildiğinde bu değer %11,04 azalarak 76,36  $\mu m$  değerini göstermektedir. Yük 30 N olarak değiştirildiğinde ise bu değer 50 N yüke göre %16,95 azalarak 71,29  $\mu m$  değerini almaktadır. MQL koşulu altında, 80 mm/s'ye eşit kayma hızında, incelenen aşınma derinliği değerleri 50 N yükte 66,03  $\mu m$ 'ye eşit bir değer göstermektedir. Yük 40 N olarak değiştirildiğinde bu değer %13,73 azalarak 56,95  $\mu m$  değerini göstermektedir. Yük 30 N olarak değiştirildiğinde ise bu değer 50 N yüke göre %29,38 azalarak 46,62  $\mu m$  değerini almaktadır. Nano MQL koşulu altında, 80 mm/s'ye eşit kayma hızında, incelenen aşınma derinliği değerleri 50 N yükte 55,78  $\mu m$ 'ye eşit bir değer göstermektedir. Yük 40 N olarak değiştirildiğinde bu değer %27,07 azalarak 40,68  $\mu m$  değerini göstermektedir. Yük 30 N olarak



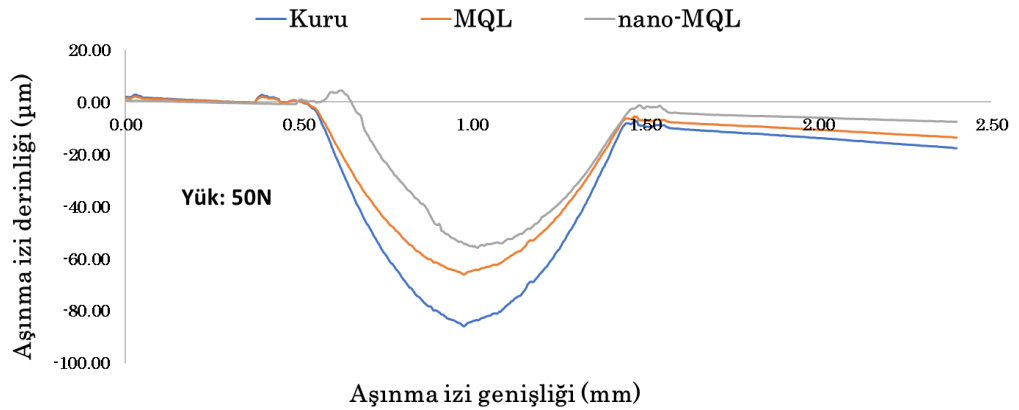
değiştirildiğinde ise bu değer 50 N yüke göre %37,95 azalarak 34,61  $\mu\text{m}$  değerini almaktadır.



Şekil 6.3. 30N yük değeri için aşınma izi formları.



Şekil 6.4. 40N yük değeri için aşınma izi formları.

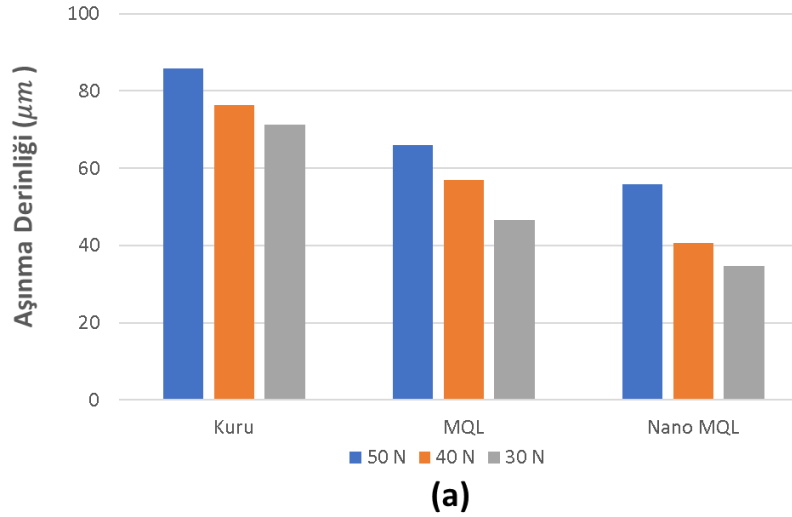


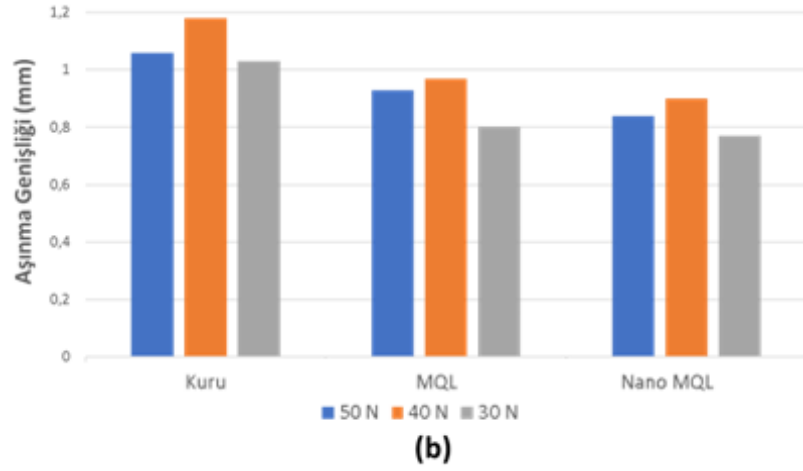
Şekil 6.5. 50N yük değeri için aşınma izi formları.

Kuru deney ortamından MQL ortamına geçildiğinde aşınma derinliği değeri 80 mm/sn kayma hızında ve 50 N yükte %23,08 azalmıştır. Aşınma derinliği değeri kuru deney ortamından MQL ortamına geçildiğinde ve 40 N yükte yaklaşık %25,41 azalmıştır. Aşınma derinliği değeri kuru deney ortamından MQL ortamına geçildiğinde ve 30 N yükte yaklaşık %34,60 azalmıştır.

Kuru deney ortamından Nano MQL ortamına geçildiğinde aşınma derinliği değeri 80 mm/sn kayma hızında ve 50 N yükte %35,01 azalmıştır. Aşınma derinliği değeri kuru deney ortamından Nano MQL ortamına geçildiğinde ve 40 N yükte yaklaşık %46,72 azalmıştır. Aşınma derinliği değeri kuru deney ortamından Nano MQL ortamına geçildiğinde ve 30 N yükte yaklaşık %51,45 azalmıştır.

Tüm aşınma testi koşulları karşılaştırıldığında, önceki şekillerden görülebileceği gibi, Nano MQL koşulundaki aşınma derinliği değerleri tüm yüklerde en düşüktür. Ancak kuru ortamda bu değerler maksimum olmuştur. En düşük aşınma genişliği değerleri, Şekil 6.6'da gösterildiği gibi çeşitli yükler altında Nano MQL koşullarında gözlemlenmiştir.





Şekil 6.6. Farklı soğutma durumlarında a) aşınma genişliği ve b) aşınma derinliği.

### 6.3. HACİM KAYBININ DEĞERLENDİRİLMESİ

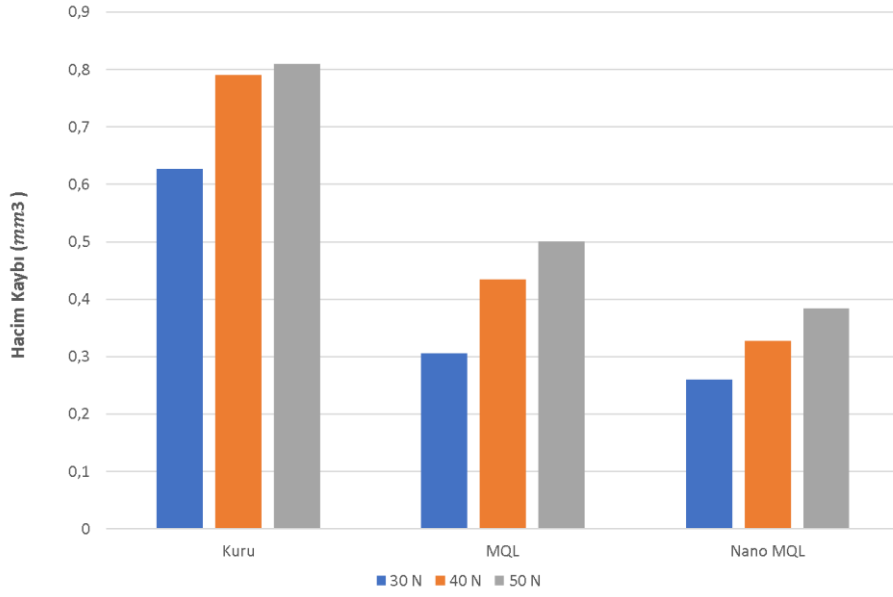
Hacim kaybını elde etmek için 80 mm/sn kayma hızındaki strok değerinin yanı sıra aşınma genişliği ve derinliğinden yararlanılır. Hacim kaybı değerleri değerlendirildiğinde, test edilen AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelere ilişkin minimum hacim kaybı değerinin Nano MQL koşulu sırasında gerçekleştiği görülmüştür. Kuru koşullarda en düşük malzeme kaybı 30 N yük ve 80 mm/s hız ile yapılan testlerde ortalama  $0,62 \text{ mm}^3$  olarak gözlemlenmiştir. 40 N yükte hacim kaybı  $0,79 \text{ mm}^3$  iken 50 N yükte ise  $0,81 \text{ mm}^3$  olmuştur. Sonuçlardan da görüldüğü gibi bu durumdaki hacim kaybının en büyük değeri 50 N yükte gözlenmiştir. Yük 30 N'dan 50 N'a yükselirken hacim kaybı değerinde %30,64 artış görülmektedir. Soğutma koşulları incelendiğinde, kuru durumda en yüksek hacim kaybı değeri ortaya çıkmaktadır.

MQL durumu incelendiğinde en büyük hacim kaybı değerinin 50 N yükte  $0,50 \text{ mm}^3$  olduğu gözlemlenmiştir. En küçük değer ise 30 N yükte  $0,30 \text{ mm}^3$ 'tür. 30 N yükten 50 N yüke geçişte hacim kaybı değeri %66,6 artmaktadır.

Nano MQL durumu analiz edilirken hacim kaybının en büyük değerinin 50 N yükte  $0,38 \text{ mm}^3$  olduğu görülmüştür. En küçük değer ise 30 N yükte  $0,26 \text{ mm}^3$ 'tür. 30 N yükten 50 N yüke geçişte hacim kaybı değeri %45,15 artmaktadır. Değerlere

bakıldığında Nano MQL ile kuru ortamı karşılaştırırken tüm yüklerde hacim kaybı değerleri daha düşüktür.

Örneğin kuru ortamdaki Nano MQL ortama geçerken hacim kaybı değeri sırasıyla 30 N yükte %58,06, 40 N yükte %58,22, 50 N yükte ise %53,08 azaldığı Şekil 6.7’de gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Çeşitli soğutma durumlarında, yüklerde hacim kaybı değerleri.

Kuru ortamdaki MQL ortama geçerken hacim kaybı değeri sırasıyla 30 N yükte %51,61, 40 N yükte %44,3, 50 N yükte %38,27 azalmıştır.

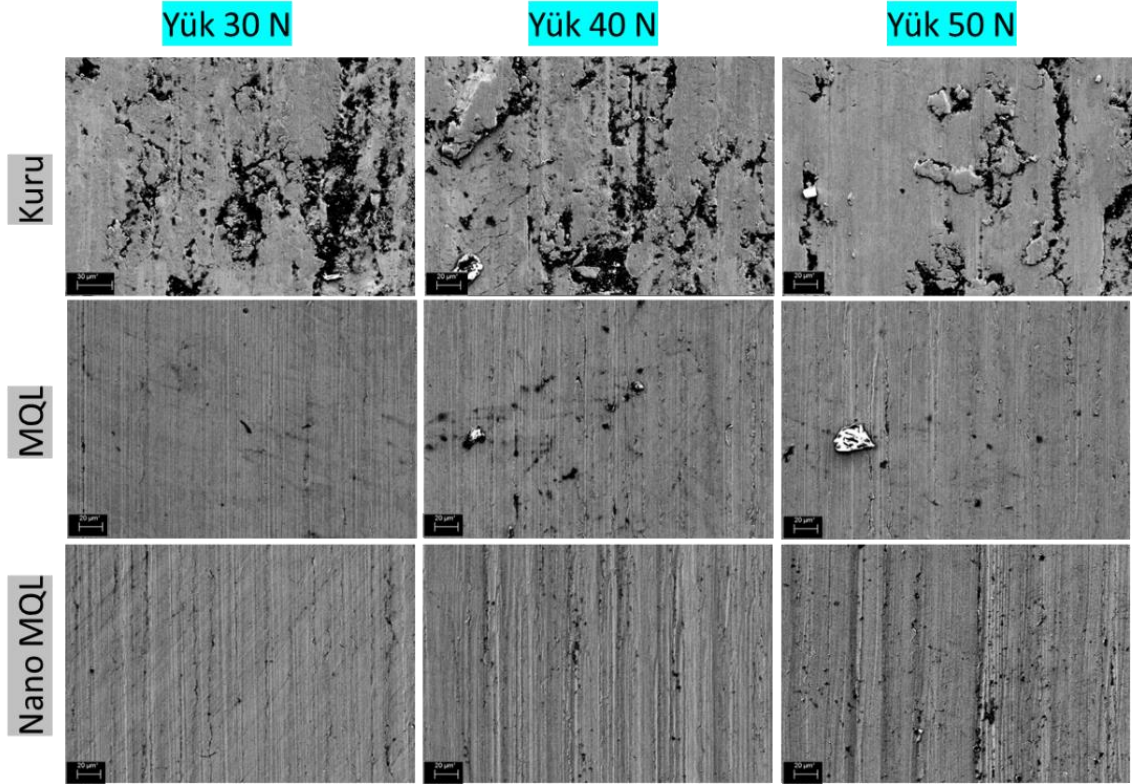
## 6.4. AŞINMA İZİ ANALİZİ

Aşınma yüzeyleri (SEM) taramalı elektron mikroskopları kullanılarak incelenirken, kimyasal yapıyı değerlendirmek için EDX analizi kullanılmıştır. Ayrıca, kimyasal bileşimin derinlemesine değerlendirilmesi için haritalama (mapping) yapılmıştır.

### 6.4.1. SEM ve EDX Analizleri (Numune)

Çeşitli koşullar altında (kuru, MQL, Nano MQL) gerçekleştirilen aşınma deneylerine tabi AISI 2205 duplex paslanmaz çelik numuneleri ile ilgili SEM görüntüleri,

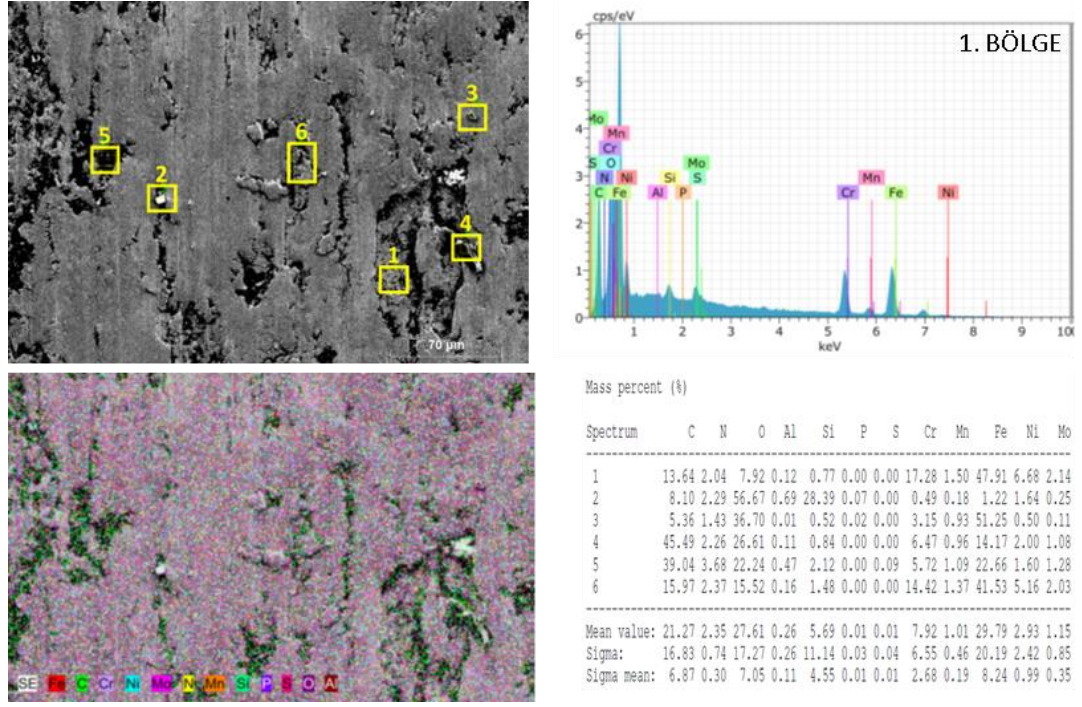
numunelerin test edilen yüzeyinin, Şekil 6.8'de gösterildiği gibi pulluklama nedeniyle plastik deformasyona ek olarak aşınma izlerinin ortaya çıktığını göstermektedir. Deformasyon sonuçları, aşınma boyunca şekillenen bağ enerjisi direnci artışına ek olarak sürtünme kuvvetlerinde bir artış olduğunu göstermektedir [250]. Ek olarak, aşınma yüzeylerinde görülebilen mevcut element miktarının belirlenmesi konusunda EDX analizi yapılmıştır. Analiz, kuru ortam sırasında, numunenin yüzeyinden çıkarılan daha büyük malzeme kaldırma miktarı nedeniyle daha büyük aşınma izi ve çizimin görüldüğünü göstermiştir. Bu tür aşınma izleri ve çizikler ortamın kurudan yağlama ortamlarına değiştirilmesiyle azalır. Ayrıca, görüntülerden, yükün 30 N'dan 50 N'a kaymasıyla aşınma izlerinin arttığı gözlenmiştir, bu durum Şekil 6.8 'de görülmektedir. Ayrıca, kuru ortam altında sürtünme artışının ve normal yükteki artışın, Şekil 6.8'de gösterildiği gibi numunenin yüzey izlerindeki plastik deformasyondaki artışla karakterize edildiği açıktır.



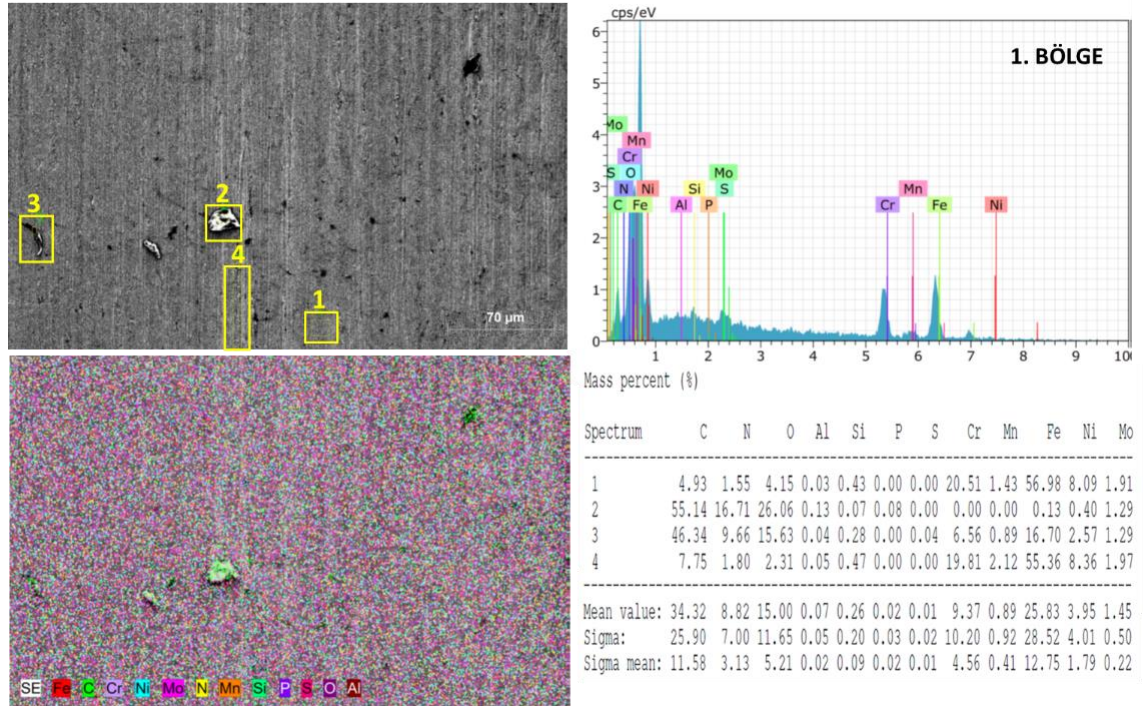
Şekil 6.8. Çeşitli yüklerde ve soğutma koşullarında numune yüzeyi (SEM).

Şekil 6.9'da farklı yağlama koşullarında AISI 2205 duplex paslanmaz çelik numunesinin EDX analizini ve SEM görüntüleri verilmiştir. Sürtünme kuvvetlerinin,

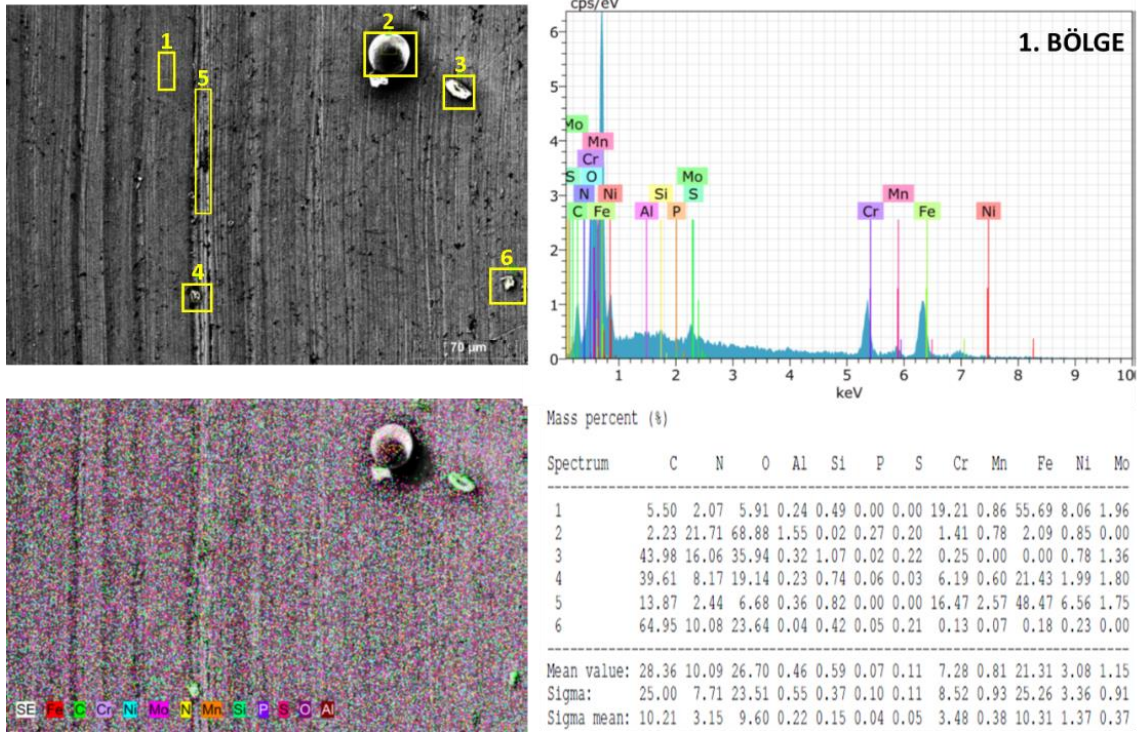
sıcaklıktaki artışın kaynağı olarak numune yüzeyindeki oksit tabakalarının veya fazların gelişmesiyle birlikte, yük ve sıcaklıktaki artışla birlikte değişen numunenin plastik bozulma durumunu arttırdığını göstermektedir [71].



(a) Kuru (50 N)



(b) MQL (50 N)



(c) Nano MQL (50 N)

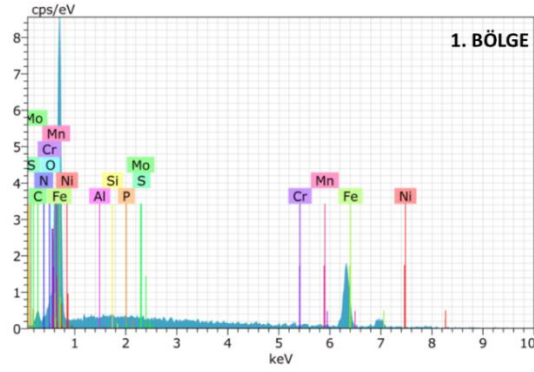
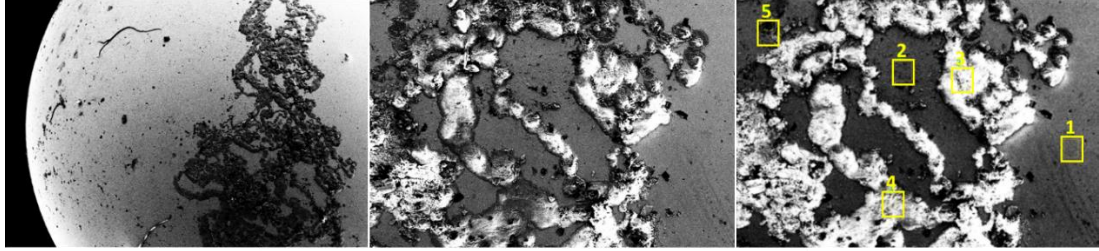
Şekil 6.9. Farklı koşullarda AISI 2205 dublex paslanmaz çeliğin EDX araştırması ve SEM'i.

Nano MQL koşulunun iyi sonuçları, grafen varlığından kaynaklanmaktadır. Grafen, numune yüzeyinin sürtünmesini korumada önemli bir rol oynar ve sürtünme işlemi boyunca numunenin dış yüzeyinde koruyucu bir kaplama oluşturarak sürtünme katsayısını azaltır. Grafenin sağlam bir mekanik mukavemeti olduğu söylenebilir [71]. Sonuç olarak koruyucu tabaka, numunenin yüzeylerinin sürtünmesini hem korozyon hem de aşınmadan önemli ölçüde koruyabilir.

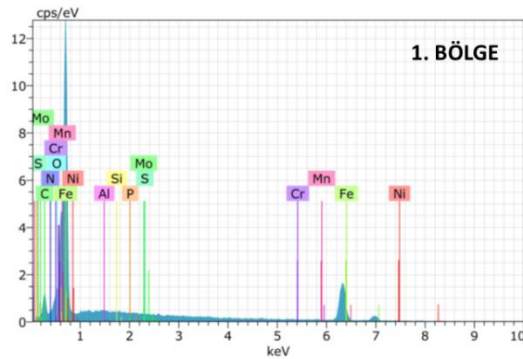
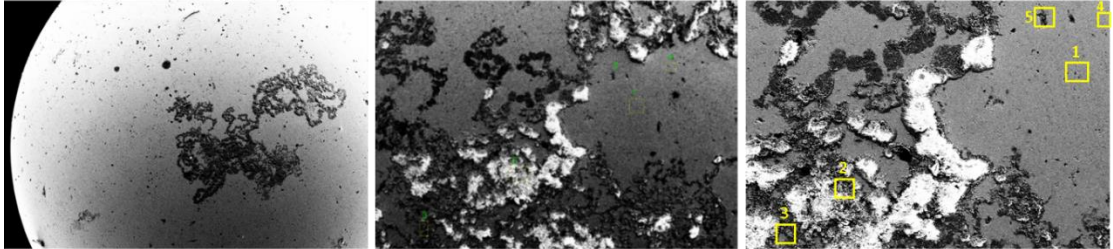
#### 6.4.2. SEM ve EDX Analizleri (Aşındırıcı)

Ortam koşulu olarak yağlayıcı kullanılmaması durumunda numune yüzeyi üzerinde aşındırıcı bilye malzemesi ile karşılaşmaktadır. Bu durum yağlamanın olmadığı anlamına gelmektedir. Elde edilen veriler, farklı koşullarda gerçekleştirilen deneylerde tüm aşındırıcı bilyeler ile numuneler arasında yapışma ve aşınma olduğunu göstermektedir.

Bilyanın yüzeyine uygulanan EDX analizi sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar, tüm koşullarda yapışmanın gerçekleştiğini açıkça göstermektedir. Şekil 6.10'da farklı yüklerde kullanılmış bilyelerin SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.

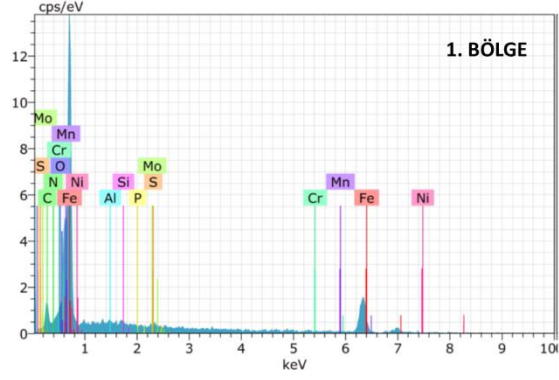
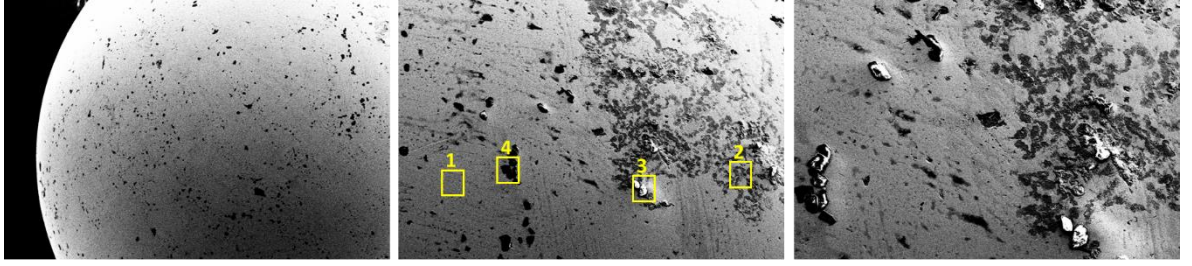


(a)



(b)





(c)

Şekil 6.10. Nano MQL ve a) 30 N yük, b) 40 N yük ve c) 50 N yük koşullarında bilyenin EDX analizi ve SEM'i.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışma ile AISI2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerinin AISI52100 kalite bilyelere karşı tribolojik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Uygulanan ortam koşulları kuru, MQL ve Nano MQL olmak üzere üç farklı ortam koşulu olmuştur. Çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır;

- Elde edilen en düşük sürtünme kuvveti değeri 3,5 N değeri ile nanografen içeren MQL ortam koşulunda ve 30 N yük altında elde edilmiştir. En yüksek sürtünme kuvveti değeri 32,54 N değeri ile kuru ortam koşullarında ortaya çıkmıştır. Sürtünme kuvveti değerinin yüksek olması yağlayıcı bulunmaması ve gereksiz ısı açığa çıkmasından kaynaklanmaktadır.
- En küçük hacim kaybı değeri nanografen içeren MQL ortam koşulunda gerçekleşmiştir. 30 N yükte en az malzeme kaybı değeri ortaya çıkmış ve bu değer 0,26  $mm^3$ 'tür. Buna karşın en fazla hacim kaybı değeri ise 50 N yük altında gerçekleştirilen deneyde 0,81  $mm^3$  olarak hesaplanmıştır.
- Kuru ortamda 50 N yük altında aşınma derinliğinin en yüksek değeri 85,84  $\mu m$  olarak ölçülmüştür. Aşınma derinliğinin en düşük değeri ise 30 N yükte ve nanografen içeren MQL ortam koşulunda 34,61  $\mu m$  değeridir.
- Kuru koşullar altında ortaya çıkan yüzey aşınmaları numune yüzeyinden daha fazla miktarda kaldırılan malzemenin bir sonucudur. Birikmiş malzemeler ve izler kuru ortamdan herhangi bir yağlayıcı ortama geçilerek azaltılabilir. En düşük değer için nanografen içeren MQL ortam koşulu tercih edilmelidir.

İleriki çalışmalarda farklı malzemelerin aşınma performansları incelenebilir. Ayrıca yağlayıcı ortamda farklı özelliklerde nano malzemeler kullanılarak ortam çeşitliliği artırılabilir.

## KAYNAKÇA

- [1] Biezma MV, Martin U, Linhardt P, Röss J, Rodríguez C, Bastidas DM. Non-destructive techniques for the detection of sigma phase in duplex stainless steel: A comprehensive review. *Eng Fail Anal* 2021;122:105227. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105227>.
- [2] Zhou R, Sun G. Laser alloying with Mn + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> and Mn + NiCr-C for improved wear and corrosion resistance of stainless steel. *Surf Coatings Technol* 2022;451:129076. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129076>.
- [3] Hu X, Wang Z, Wang L, Chen C, Zhang F, Zhang W. Effect of pre-deformation on hot workability of super austenitic stainless steel. *J Mater Res Technol* 2022;16:238–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.163>.
- [4] Liou H-Y, Pan Y-T, Hsieh R-I, Tsai W-T. Effects of Alloying Elements on the Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of 2205 Duplex Stainless Steels. *J Mater Eng Perform* 2001;10:231–41. <https://doi.org/10.1361/105994901770345268>.
- [5] Yu H, Han Z, Zhang J, Zhang S. Bionic design of tools in cutting: Reducing adhesion, abrasion or friction. *Wear* 2021;482–483:203955. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203955>.
- [6] Hutchings I, Gee M, Santner E. Friction and Wear. Springer Handb. Mater. Meas. Methods, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2006, p. 685–710. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30300-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30300-8_13).
- [7] Huang SN, Tan KK, Wong YS, de Silva CW, Goh HL, Tan WW. Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring. *Int J Mach Tools Manuf* 2007;47:444–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.06.011>.
- [8] Sekhar AP, Das D. Two-Body Abrasive Wear Behavior and Its Correlation With Mechanical Properties of Aged AA6063 Alloy. *J Tribol* 2022;144. <https://doi.org/10.1115/1.4052828>.
- [9] Maharaj D, Bhushan B. Friction, wear and mechanical behavior of nano-objects on the nanoscale. *Mater Sci Eng R Reports* 2015;95:1–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mser.2015.07.001>.
- [10] Lijesh KP, Khonsari MM. Application of thermodynamic principles in determining the degradation of tribo-components subjected to oscillating motion in boundary and mixed lubrication regimes. *Wear* 2019;436–

437:203002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203002>.

- [11] You Y-L, Li D-X, Si G-J, Deng X. Investigation of the influence of solid lubricants on the tribological properties of polyamide 6 nanocomposite. *Wear* 2014;311:57–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.018>.
- [12] Suresh Kumar Reddy N, Venkateswara Rao P. Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling. *Int J Mach Tools Manuf* 2006;46:189–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.04.008>.
- [13] Singh A, Chauhan P, Mamatha TG. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Mater Today Proc* 2019;25:586–91. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245>.
- [14] Asif A, Zheng Y, Rahman S, Amiri A, Jun HJ, Polycarpou AA. Three-body abrasive wear in the presence of inorganic fullerene-like tungsten disulfide and ionic liquid containing alkanolamines and phosphates. *Wear* 2021;486–487:204073. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204073>.
- [15] Blatter A, Maillat M, Pimenov SM, Shafeev GA, Simakin A V, Loubnin EN. Lubricated sliding performance of laser-patterned sapphire. *Wear* 1999;232:226–30. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00150-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00150-7).
- [16] LI W sheng, WANG Z ping, LU Y, YUAN L hua, XIAO R zhen, ZHAO X dong. Corrosion and wear behaviors of Al-bronzes in 5.0% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. *Trans Nonferrous Met Soc China (English Ed)* 2009;19:311–8. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60270-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60270-8).
- [17] Şap S, Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E, Pimenov DY. Investigation of the Effects of Cooling and Lubricating Strategies on Tribological Characteristics in Machining of Hybrid Composites. *Lubricants* 2022;10. <https://doi.org/10.3390/lubricants10040063>.
- [18] Günay M, Korkmaz ME, Yaşar N. Performance analysis of coated carbide tool in turning of Nimonic 80A superalloy under different cutting environments. *J Manuf Process* 2020;56:678–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.031>.
- [19] Iqbal A, Suhaimi H, Zhao W, Jamil M, Nauman MM, He N, et al. Sustainable Milling of Ti-6Al-4V: Investigating the Effects of Milling Orientation, Cutter's Helix Angle, and Type of Cryogenic Coolant. *Metals (Basel)* 2020;10. <https://doi.org/10.3390/met10020258>.
- [20] Priarone PC, Robiglio M, Settineri L, Tebaldo V. New production technologies in aerospace industry - 5th machining innovations conference (MIC 2014) milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication. *Procedia CIRP* 2014;24:62–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.147>.

- [21] Woma TY, Lawal SA, Abdulrahman AS, Olutoye MA, Ojapah MM. Vegetable oil based lubricants: Challenges and prospects. Tribol Online 2019;14:60–70. <https://doi.org/10.2474/trol.14.60>.
- [22] Mousavi SB, Heris SZ, Estellé P. Experimental comparison between ZnO and MoS<sub>2</sub> nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant. Sci Rep 2020;10:5813. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62830-1>.
- [23] Jayashree P, Turani S, Straffelini G. Effect of temperature and sliding speed on the dry sliding behavior of a SiC-graphite composite against martensitic steel. Wear 2020;450–451:203242. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203242>.
- [24] Babakhani A, Haerian A, Ghambri M. Effect of heat treatment, lubricant and sintering temperature on dry sliding wear behavior of medium alloyed chromium PM steels. J Mater Process Technol 2008;204:192–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.061>.
- [25] Luo Q, Li J, Yan Q, Li W, Gao Y, Kitchen M, et al. Sliding wear of medium-carbon bainitic/martensitic/austenitic steel treated by short-term low-temperature austempering. Wear 2021;476:203732. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203732>.
- [26] Mondal J, Das K, Das S. An investigation of mechanical property and sliding wear behaviour of 400Hv grade martensitic steels. Wear 2020;458–459:203436. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203436>.
- [27] Soykut A.Y, “Cam Şekillendirme Makinalarındaki Aşınan Parçalara Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Performansa Etkileri”, Doktora Tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı***, (2007)
- [28] Demirel Ç., “AISI 8640 VE GS 60 ÇELİK MALZEMELERİN ABRASİF AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ”, Yüksek Lisans Tezi, ***Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı***, Karabük, (2013)
- [29] J.P. Celis, A systems approach to the tribological testing of coated materials. Surface and Coatings Technology 74-75 (1995) 15-22.
- [30] Terence F. J. Quinn, Physical analysis for tribology. Professor of Engineering School of Engineering and Applied Science United States International University (European Campus) Bushey, Hertfordshire
- [31] Ian Hutchings, Philip Shipwa, Tribology Friction and Wear of Engineering Materials Second Edition. University of Cambridge, UK.
- [32] T. Savaşkan & S. Murphy (1990) Decomposition of Zn–Al alloys on quench–aging, Materials Science and Technology, 6:8, 695-704, DOI: 10.1179/mst.1990.6.8.695

- [33] Ferrante, John, and Phillip B. Abel. "Surface Physics." *Handbook of Micro/Nano Tribology* (2020): 145.
- [34] Budinski, Kenneth G. *Guide to friction, wear and erosion testing*. West Conshohocken, PA: ASTM international, 2007.
- [35] İpek R., "AISI 1020 ÇELİĞİNİN, YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ UYGULANARAK AISI 5115 ÇELİĞİNİN YERİNE KULLANABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI", Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı*, Kayseri, (1992)
- [36] Demirsöz R., "GRANÜL CÜRUF TAŞIMADA KULLANILAN BORULARIN İÇ YÜZEYİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük, (2018)
- [37] Stachowiak, Gwidon, and Andrew W. Batchelor. *Engineering tribology*. Butterworth-heinemann, 2013.
- [38] Karaoğlu Y., "BİR AŞINMA TEST CİHAZININ TASARIMI VE İMALATI", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı*, Sakarya, (2006)
- [39] Atamert S., "STABILITY, WEAR RESISTANCE, AND MICROSTRUCTURE OF IRON, COBALT AND NICKEL-BASED HARDFACING ALLOYS" Ph. D. Thesis, *University of Cambridge*, Cambridge, (1988).
- [40] Bhushan, Bharat. *Introduction to tribology*. John Wiley and Sons, (2013).
- [41] Di Puccio, Francesca, and Lorenza Mattei. "Biotribology of artificial hip joints." *World journal of orthopedics* 6.1, 77, DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.77 (2015).
- [42] George W. P. Rengstorff, Kazuhisa Miyoshi and Donald H. Buckley (1986) Interaction of Sulfuric Acid Corrosion and Mechanical Wear of Iron, A S L E Transactions, 29:1, 43-51, DOI: 10.1080/05698198608981658
- [43] Karabaşoğlu M., "AŞINMA DENEY CİHAZI TASARIMI VE İMALATI", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı*, Sakarya, (2008).
- [44] SARIKAYA, Ö., Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri,1-60;(2007).
- [45] Kaştan A., "GRAFİT KATKILI NYLON 6(POLİAMD 6)'NİN AŞINMA DAVRANISLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ", Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı*, İstanbul, (2005).

- [46] Şişman, L., “Bir Aşınma Deney Cihazının Tasarım ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (1999).
- [47] SOYDAN, Y., ULUKAN, L., “Triboloji : Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi”, Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi No: 1, Sakarya, (2003).
- [48] Ulutan, M., “AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Eskişehir, (2007).
- [49] EŞ, M., Dişli Çark Malzemelerinin Aşınma Karakteristiklerinin İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 15-16; Haziran (2004).
- [50] Özdemir, C., “PASLANMAZ ÇELİKLER ve ÜRETİM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri FBE Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Üretimi Anabilim Dalı*, İstanbul, (2010).
- [51] Aran A., Temel M.A, “Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları”, Sarıtaş Teknik Yayın No: 1 2. BASKI, İstanbul, (2004).
- [52] Seitovirta M., “Handbook of Stainless Steel” Sweden by Sandvikens Tryckeri AB, (2013).
- [53] Baysan, E., “ESD İLE İNTERMETALİK KAPLANMIŞ PASLANMAZ ÇELİKLERİN KARAKTERİZASYONU VE KOROZYON DAVRANIŞI”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, Afyon, (2022).
- [54] Kerimak M.Z, “DÖKÜM PASLANMAZ ÇELİKLERİN KOROZYON VE KIRILMA ÖZELLİKLERİNİN ISIL İŞLEMLERLE DEĞİŞİMİ”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, Sakarya, (2021).
- [55] Cobb, Harold M. "Stainless Steels.", Iron and Steel Society, Warrandale (1999).
- [56] Robiette, A.G.E., Electric Melting Practice, Londra, (1996).
- [57] Kaya K., “ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK VE İF ÇELİĞİNİN NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük, (2022).
- [58] Farfan-Cabrera, Leonardo I., et al. "Electrification effects on dry and lubricated sliding wear of bearing steel interfaces." ): 204592, *Wear* 516 (2023).

- [59] Tian, Jingwei, et al. "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).
- [60] Rodiouchkina, M., Lindsjö, H., Berglund, K., and Hardell, J. "Effect of stroke length on friction and wear of self-lubricating polymer composites during dry sliding against stainless steel at high contact pressures". *Wear*, 502, 204393, (2022).
- [61] Holmberg, K., Laukkanen, A., Hakala, T., Ronkainen, H., Suhonen, T., Wolski, M., and Li, L. Topography orientation effects on friction and wear in sliding DLC and steel contacts, part 3: Experiments under dry and lubricated conditions. *Wear*, 486, 204093, (2021).
- [62] Zhang, C., Xu, J., Sun, G., Wei, X., Xiao, J., Zhang, G., & Yin, S., "Wear behaviors of 5 wt % SiO<sub>2</sub>-Ni60 coatings deposited by atmospheric plasma spraying under dry and water-lubrication sliding conditions". <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203621>, (2021).
- [63] Zhou, L., You, Q., Xiong, J., Guo, Z., & Xiao, Y. Dry wear behaviors of graphite/cermet self-lubricating composite under different sliding conditions and simulation of temperature field. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 73, 85-90 (2018).
- [64] Chauhan, S. R., Kumar, A., & Singh, I., "Sliding friction and wear behaviour of vinylester and its composites under dry and water lubricated sliding conditions". *Materials & Design*, 31(6), 2745-2751, (2010).
- [65] Meng, H., Sui, G. X., Xie, G. Y., & Yang, R., "Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition". *Composites Science and Technology*, 69(5), 606-611, (2009).
- [66] Prchlik, L., & Sampath, S. Effect of the microstructure of thermally sprayed coatings on friction and wear response under lubricated and dry sliding conditions, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.042>, (2007).
- [67] Jia, J. H., Zhou, H. D., Gao, S. Q., & Chen, J. M. "A comparative investigation of the friction and wear behavior of polyimide composites under dry sliding and water-lubricated condition" *Materials Science and Engineering: A*, 356(1-2), 48-53, (2003).
- [68] Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., & 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).
- [69] Demirsöz, R. "Wear behavior of bronze vs. 100Cr6 friction pairs under different lubrication conditions for bearing applications", *Lubricants*, 10(9), 212, (2022).



- [70] Gupta, M.K., Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., & 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), 041703, (2023).
- [71] El Etri H., “TRIBOLOGICAL AND SURFACE MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TITANIUM ALLOY AGAINST COATED CARBIDE PIN”, M.Sc. Thesis, *Karabük University Institute of Graduate Programs Department of Mechanical Engineering*, Karabük, (2022).
- [72] Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., & 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).
- [73] Krolczyk, J. B., Maruda, R. W., Krolczyk, G. M., Wojciechowski, S., Gupta, M. K., & Korkmaz, M. E. “Investigations on surface induced tribological characteristics in MQCL assisted machining of duplex stainless steel”. *Journal Of Materials Research and Technology*, 18, 2754-2769, (2022).
- [74] Tai, B. and Shih, A., "Sustainable Built Environment & "Sustainable Manufacturing Nanofluid-minimum quantity lubrication system in machining : towards clean manufacturing", (2021).
- [75] Park, K. H., Suhaimi, M. A., Yang, G. D., Lee, D. Y., Lee, S. W., & Kwon, P., “Milling of titanium alloy with cryogenic cooling and minimum quantity lubrication (MQL)”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18, 5-14, (2017).
- [76] Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., Yaşar, N., Krolczyk, G. M., & 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).
- [77] Sud, D., Singla, A. K., & Gupta, M. K. (Eds.). *Nanomaterials in manufacturing processes*. CRC Press, (2022).
- [78] Chen, Y., Renner, P., & Liang, H. “Dispersion of nanoparticles in lubricating oil: A critical review”, *Lubricants*, 7(1), 7, (2019).
- [79] Çamlı, K. Y., Demirsöz, R., Boy, M., Korkmaz, M. E., Yaşar, N., Giasin, K., & Pimenov, D. Y. “Performance of MQL and nano-MQL lubrication in machining ER7 steel for train wheel applications”, *Lubricants* 10(4), 48, (2022).
- [80] Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Choi, Y., Kwon, L., Lee, J., & Kim, S. H. “Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication”. *Tribology letters* 35, 127-131, (2009).

- [81] Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H., & Liang, H. “Roles of nanoparticles in oil lubrication”, *Tribology International*, 102, 88-98, (2016).
- [82] Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Krolczyk, G. M., Maruda, R. W., & Li, Z., “Effect of nanoparticles as a lubricants in nano-MQL machining of metallic materials: A review”, **In 2021 6th International Conference on Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NanofIM)** (pp. 1-7). IEEE, (2021).
- [83] Liu, Y., Ge, X., & Li, J. “Graphene lubrication”. *Applied materials today*, 20, 100662, (2020).
- [84] Li, Z., Xu, C., Xiao, G., Zhang, J., Chen, Z., & Yi, M. “Lubrication performance of graphene as lubricant additive in 4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl liquid crystal (5CB) for steel/steel contacts, *Materials*, 11(11), 2110, (2018).

## ÖZGEÇMİŞ

Murat CANBAZ, Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2006-2010 yılları arasında tamamlamıştır. Üniversite döneminde çeşitli görevler üstlenerek Makina Mühendisleri Odası Öğrenci Komisyon Başkanlığı ve Mekatronik Klüp yöneticiliği yapmıştır. Yedek Subay olarak askerliğini 1 yılda bitirmiştir. 2011-2012 yılları arasında Isse – Laser SOS firmasında meslek hayatına Ar-Ge mühendisi olarak başlamış, bir dönem İngitlere’de alanında eğitim almıştır. 2012 Yılında Kardökmak AŞ’de satış ve planlama mühendisi olarak göreve başlamış ve aynı şirkette iş geliştirme baş mühendisliği, şirket müdür yardımcılığı yapmıştır. 2019 yılından itibaren şirket müdürü olarak çalışmaktadır. Aynı zamanda TÜDÖKSAD yönetim kurulu üyesi olarak halen göreve devam etmektedir.