



**WC KAPLANMIŞ FREN DİSKİNİN KURU VE SAF  
SU ORTAMINDA TRİBOLOJİK  
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**Huriye BURKUCU**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**WC KAPLANMIŞ FREN DİSKİNİN KURU VE SAF SU ORTAMINDA  
TRİBOLOJİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**Huriye BURKUCU**

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

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**KARABÜK  
Mart 2022**

Huriye BURKUCU tarafından hazırlanan “WC KAPLANMIŞ FREN DİSKİNİN KURU VE SAF SU ORTAMINDA TRİBOLOJİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN .....  
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/03/2022

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Fuat KARTAL (KÜ)	ONLINE
Üye : Dr.Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU (KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTÜN)	.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....  
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.”*

Huriye BURKUCU

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **WC KAPLANMIŞ FREN DİSKİNİN KURU VE SAF SU ORTAMINDA TRIBOLOJİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**Huriye BURKUCU**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**Mart 2022, 88 sayfa**

Fren sistemlerinin çalışmasını etkileyen en önemli faktörlerden biri fren diskinin tribolojik performansıdır. Bu çalışmada, WC-%12Co kaplanmış gri dökme demir matrisli fren diski malzemesinin tribolojik performansı aşınma ve korozyon deneyleri yoluyla araştırılmıştır. Tribolojik performansın incelenmesi için kuru ve saf su ortamı, numune türü, yük ve hız parametrelerinin aşınma ve korozyon dayanımlarına etkisi analiz edilmiştir. WC kaplamanın aşınma direnci, kuru ve saf su ortamlarında 20N-30N yük ve 20 dev/dk-50 dev/dk kayma hızı deney koşullarında incelenmiştir. Çıkış parametresi olarak sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri istatistiksel olarak analiz edilmiş ve sonuçlar ileri görüntüleme yöntemleriyle görsel olarak doğrulanmıştır. İstatistiksel analiz için sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonu hedeflenerek TOPSIS ve S/N analizi ile parametre optimizasyonu yapılmış, ANOVA ve regresyon analizleri ile giriş

ve çıkış parametreleri arasındaki ilişki belirlenmiştir. Görsel analiz için 2D profilometre, SEM ve 3D topoğrafya görüntüleri incelenmiştir.

Potansiyodinamik polarizasyon testleri ile elde edilen korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu değerleri incelenerek korozyon direnci analiz edilmiştir. TOPSIS ve S/N analizlerinden elde edilen sonuçlara göre sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonunun WC kaplamalı malzemenin saf su ortamında 20 N yük ve 50 dev/dk kayma hızı parametrelerinde gerçekleştirilen deneyler ile elde edildiği belirlenmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen istatistiksel analiz sonuçlarına göre WC kaplamanın sürtünme katsayısı (%84,64), aşınma hacmi (%91,03) ve yüzey pürüzlülüğü (%56,69) parametreleri için en etkili parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Korozyon deneyinden elde edilen Tafel grafiği ve grafiğe bağlı olarak belirlenen korozyon akım yoğunluğu ve korozyon potansiyeli değerlerine göre WC kaplamalı numunenin kaplamasız numuneye kıyasla korozyon direncinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Fren diski, WC kaplama, tribolojik performans, korozyon

**Bilim Kodu** : 701.3.019

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF TRIBOLOGY PERFORMANCE OF WC COATED BRAKE DISC IN DRY AND PURE WATER ENVIRONMENT**

**Huriye BURKUCU**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**March 2022, 88 pages**

One of the most important factors affecting the operation of brake systems is the tribological performance of the brake disc. In this study, the tribological performance of WC-12%Co coated gray cast iron matrix brake disc material was investigated through wear and corrosion experiments. In order to examine the tribological performance, the effects of dry and pure water environment, sample type, load and speed parameters on wear and corrosion resistance were analyzed. The wear resistance of the WC coating was investigated under 20N-30N load and 20 rpm-50 rpm sliding speed experimental conditions in dry and pure water environments. As output parameters, coefficient of friction, wear volume and surface roughness parameters were statistically analyzed and the results were visually verified with advanced imaging methods. Minimization of friction coefficient, wear volume and surface roughness for statistical analysis was aimed, parameter optimization was made with

TOPSIS and S/N analysis, and the relationship between input and output parameters was determined by ANOVA and regression analysis. 2D profilometer, SEM and 3D topography images for visual analysis were examined. Corrosion resistance was analyzed by examining the corrosion potential and corrosion current density values obtained by potentiodynamic polarization tests. According to the results obtained from TOPSIS and S/N analyzes, it was determined that the minimization of the friction coefficient, wear volume and surface roughness was obtained by the experiments carried out in the pure water environment of the WC coated material at 20 N load and 50 rpm sliding speed parameters. According to the statistical analysis results obtained from the wear tests, it was concluded that the WC coating is the most effective parameter for the coefficient of friction (84.64%), the wear volume (91.03%) and the surface roughness (56.69%). According to the Tafel graph obtained from the corrosion test and the corrosion current density and corrosion potential values determined based on the graph, it was determined that the corrosion resistance of the WC coated sample was higher than the uncoated sample.

**Key Word** : Brake disc, WC coating, tribological performance, corrosion

**Science Code** : 701.3.019



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım boyunca her an yanımda olduklarını bildiğim, maddi ve manevi hiçbir desteklerini benden esirgemeyen babam Sami BURKUCU'ya, annem Cemile BURKUCU'ya, kız kardeŐim Hülya BURKUCU ve erkek kardeŐim Ramazan BURKUCU'ya tüm kalbimle sonsuz sevgi ve Őükranlarımı sunuyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ ve LİTERATÜR .....	1
BÖLÜM 2 .....	8
FREN DİSKİ MALZEMELERİ .....	8
2.1.DÖKME DEMİRLER.....	9
2.1.1.Beyaz Dökme Demir.....	10
2.1.2. Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demir.....	11
2.1.3.Küresel Grafitli Dökme Demir.....	14
2.1.4.Temper Dökme Demir.....	16
2.1.5.Vermiküler Grafitli Dökme Demir.....	17
BÖLÜM 3 .....	19
3.1.TRİBOLOJİ.....	19

	<u>Sayfa</u>
3.2. SÜRTÜNME.....	20
3.2.1. Kuru Sürtünme.....	20
3.2.2. Sıvı Sürtünme.....	21
3.3. AŞINMA .....	24
3.3.1. Adhesif Aşınma.....	25
3.3.2. . Abrasif aşınma.....	27
3.3.3. Erozif ve kavitasyon aşınması.....	28
3.3.4. Yorulma/Delaminasyon aşınması.....	29
3.3.5. Korozif/Oksidasyon aşınması.....	30
3.4. YAĞLAMA .....	30
3.4.1. Yağlayıcılar.....	31
3.4.1.1.... Katı Yağlayıcılar.....	32
3.4.1.1.1. Grafit.....	32
3.4.1.1.2. Molibden Disülfid .....	33
3.4.1.2.... Sıvı Yağlayıcılar.....	33
3.4.1.2.1.. Organik (Bitkisel ve Hayvansal) Yağlayıcılar.....	33
3.4.1.2.2... Mineraller (Madensel Yağlayıcılar).....	34
3.4.1.2.3.... Sentetik Yağlayıcılar.....	34
3.4.1.3. Plastik (Macun) Yağlayıcılar.....	35
BÖLÜM 4 .....	36
4.1. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	36
4.1.1. Gaz Fazda Yüzey Kaplama Yöntemi.....	37
4.1.2. Sıvı Fazda Yüzey Kaplama Yöntemi.....	38

	<u>Sayfa</u>
4.1.3.Ergimiş/ Yarı Ergimiş Fazda Yüzey Kaplama Yöntemi.....	38
4.2. YÜZEY KAPLAMA MALZEMELERİ.....	39
4.2.1.Tungsten Karbür (WC) Kaplama.....	39
4.2.2.Krom Kaplama.....	40
4.2.3.Krom Oksit Kaplama.....	40
4.2.4.Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Kaplama.....	41
4.2.5.Titanyum Oksit (TiO <sub>2</sub> ) Kaplama.....	42
4.2.6.Zirkonyum Oksit (ZrO <sub>2</sub> ) Kaplama.....	42
BÖLÜM 5 .....	44
5.1.ÇALIŞMA METODOLOJİSİ.....	44
5.2.WC-%12CO KAPLAMA .....	45
5.3.AŞINMA DENEYLERİ.....	46
5.4.İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ .....	48
5.5.GÖRSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ .....	52
5.6.KOROZYON DENEYİ.....	52
BÖLÜM 6 .....	54
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	54
6.1. WC KAPLAMANIN KARAKTERİZASYONU.....	54
6.2. PARAMETRE OPTİMİZASYONU.....	58
6.3.AŞINMA DENEYİ SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL VE GÖRSEL ANALİZİ.....	60
6.3.1.Sürtünme Katsayısı.....	60

## Sayfa

6.3.1.1. Kuru ve sıvı koşullarda elde edilen sürtünme katsayısı için ANOVA.....	65
6.3.2. Aşınma Hacmi.....	65
6.3.2.1. Kuru ve sıvı koşullarda elde edilen hacim kaybı için ANOVA.....	65
6.3.3. Yüzey pürüzlülüğü.....	70
6.4. WC KAPLANMIŞ FREN DİSKLERİNİN KOROZYON PERFORMANSI..	73
BÖLÜM 7 .....	75
SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR; .....	77

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 2.1. Fren Diski .....	8
Şekil 2.2. Beyaz Dökme Demir .....	11
Şekil 2.3. Gri Dökme Demir.....	12
Şekil 2.4. Küresel Grafitli Dökme Demir.....	14
Şekil 2.5. Vermiküler Grafitli Dökme Demir .....	18
Şekil 3.1. Yağlayıcı Türleri .....	31
Şekil 4.1. Kaplanacak malzemenin fiziksel durumuna göre kaplama yöntemlerinin ayrılması.....	37
Şekil 5.1. Çalışma için akış diyagramı .....	45
Şekil 5.2. Ball-on-plate aşınma cihazı.....	47
Şekil 5.3. Aşınma izinin genişliği ve derinliği için dikkate alınan ölçüm metodolojisi .....	48
Şekil 6.1. WC kaplama tabakası kesit görünümü.....	55
Şekil 6.2. Kaplama tabakası için EDX çizgi analizi.....	56
Şekil 6.3. Kaplama tabakası için XRD grafiği .....	57
Şekil 6.4. Sertlik (HV) dağılımı .....	58
Şekil 6.5. Taguchi analizine göre optimum sonuç grafiği.....	60
Şekil 6.6. Sürtünme katsayısı verilerinin a) kuru ve b) saf su ortamında normal dağılım grafikleri.....	63

Şekil 6.7. Optimum koşullar için SEM resimleri, a) en kötü, b) orta seviye, c) en iyi. .....	64
Şekil 6.8. Aşınma sonrası EDX analizleri a) kuru ortam, b) sıvı ortam.....	65
Şekil 6.9. Hacim kaybı verilerinin a) kuru ve b) saf su ortamında normal dağılım grafikleri.....	68
Şekil 6.10. 2d topografya görüntüleri a) en kötü, b) orta seviye, c) en iyi.....	69
Şekil 6.11. Sürtünme katsayısı verilerinin a) kuru ve b) saf su ortamında normal dağılım grafikleri.....	72
Şekil 6.12. En kötü (a), orta seviye (b) ve optimum (c) koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda aşınma yüzeyinden elde edilen 3D topoğrafya görüntüleri .....	73
Şekil 6.13. Tafel eğrileri.....	74

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. Malzeme özelliklerinin adhesif aşınmaya etkisi .....	26
Çizelge 5.1. Gri dökme demir malzemesinin kimyasal bileşimi.....	46
Çizelge 5.2. AISI 52100 (100Cr6) malzemenin kimyasal bileşimi .....	47
Çizelge 5.3. Deney Parametreleri.....	47
Çizelge 6.1. TOPSIS optimizasyon tablosu .....	59
Çizelge 6.2. Sürtünme katsayısı için ANOVA-Kuru koşullar .....	62
Çizelge 6.3. Sürtünme katsayısı için ANOVA-Israk koşullar.....	62
Çizelge 6.4. Hacim kaybı için ANOVA- Kuru koşullar .....	67
Çizelge 6.5. Hacim kaybı için ANOVA- Israk koşullar.....	67
Çizelge 6.6. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA- Kuru koşullar .....	71
Çizelge 6.7. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA- Israk koşullar .....	71
Çizelge 6.8. Korozyon testi sonuçları .....	74



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Cu	: Bakır
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
Si	: Silisyum
Al	: Alüminyum
Au	: Altın
H	: Hidrojen
He	: Helyum
Cr	: Krom
C	: Karbon
Mn	: Mangan
Al	: Alüminyum
S	: Kükürt
P	: Fosfor
Sn	: Kalay
Fe	: Demir

## KISALTMALAR

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

EDX : Enerji Dağıtıcı X-ışını

EDS : Enerji Dağılım Spektroskopisi

XRD : X-ışınları difraktometresi

MMC :Metal Matrisli Kompozit

EDAX: Enerji Dispersif X Işınları Analizi)

HVOF: Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme

HVAF: Yüksek Hızlı Hava Yakıtı

KGDD: Küresel Grafitli Dökme Demir

VGDD: Vermiküler Grafitli Dökme Demir

WC : Tungsten Karbür

SiC :Silisyum Karbür

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ ve LİTERATÜR

Günümüzde herkesin kullandığı ve hatta kullanmak zorunda olduğu araçların konforu ve genel mali giderlerinin az olması istenilen bir durumdur. Bunu da sağlayabilmek için otomobillerin servis ömürlerinin arttırılması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Otomobillerin servis ömrünün artması ve bakım maliyetlerinin azalması, fren sistemi elemanlarının tribolojik açıdan yüksek performans gösterebilmesine de bağlıdır. Özellikle yüksek gerilmelere maruz kalan fren disklerinde sürtünmenin etkisiyle yüksek ısı oluşumu meydana gelmektedir.[1]. Fren diski ve balatasının temas bölgesinde meydana gelen sıcaklık artışı aşınmaya sebebiyet vermesiyle birlikte, fren sisteminin mekanik performansını düşürmesinin yanı sıra, titreşim ve ses oluşumunu da arttırarak seyir konforunu azaltmaktadır. Aşınma kaynaklı meydana gelen olumsuz etkilerin minimize edilebilmesi için ise fren diski malzemelerinin tribolojik performans özellikleri açısından yüksek malzemelerden imal edilmesi gerekmektedir. Fren diski malzemesinde en çok istenen özelliklerden biri sürtünme katsayısının büyüklüğü olacaktır. Tabi bunların yanında kullanılan fren diskinin düşük aşınma hızına da sahip olması gerekmektedir. Bu parametreler göz önünde bulundurularak; fren diskleri yaygın olarak düşük maliyet, yüksek termal iletkenlik, yüksek erime noktası ve yüksek sönümlenme kabiliyeti özelliklerine sahip gri dökme demirden üretilmektedir [2–7]. Fakat dökme demir malzemelerin düşük kırılma tokluğu, düşük korozyon direnci, yüksek ağırlığa sahip olması sebebiyle yakıt tüketimini arttırması, istenilen boyut ve şekilde üretim zorluğu gibi dezavantajları [8–10] nedeniyle son yıllarda yüksek aşınma direnci ve korozyon direnci, yüksek sürtünme katsayısı, hafiflik, yüksek kırılma dayanımına sahip metal matrisli kompozit malzemeler geliştirilmiştir [1,5,6,8–13]. Xiao vd [14]. Sürtünmeye maruz kalan fren malzemelerini sıcaklık, basınç ve hız parametrelerinin frenleme performansına etkilerini literatür çalışmalarını inceleyerek detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Çalışmada ilk olarak farklı malzemelerden imal edilmiş sürtünme malzemeleri sınıflandırılarak bu malzemelerin olumlu-olumsuz yönleri ve kullanım alanları özetlenmiştir. Daha sonra sürtünme filminin oluşum mekanizması incelenmiş ve sıcaklık, basınç ve frenleme hızının frenleme mekanizmasına etkisi analiz edilmiştir.

Analiz sonucunda yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve başlangıç frenleme hızı koşullarında aşınma oranı miktarının arttığı belirlenmiştir. Polak ve Grzybek [15], otomobillerde kullanılan fren disklerinin aşınma performansını deneysel ve görsel yöntemlerle araştırmışlardır. Çalışmada gri dökme demirden imal edilmiş fren diski, 400 °C sıcaklık, 0-10 m/s kayma hızı ve disk ile balata arasındaki basıncın 4 MPa olduğu deney koşullarında pin-on-disk yöntemi ile aşınma deneyine tabi tutulmuş ve deney sonrasında aşınmış bölgelerin SEM görüntüleri incelenerek yüzey morfolojisi analiz edilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerine göre deformasyona maruz yüzeylerde çukurcukların oluştuğu görülmüştür. Shin vd. [8], gri dökme demirden imal edilmiş fren disklerinin korozyon davranışını deneysel ve görsel yöntemlerle araştırmışlardır. Çalışmada gri dökme demirden imal edilmiş fren diski ile çelik ve 2 adet çelik olmayan balatalar kullanılarak dinanometre testi yapılmış, test sonucunda sürtünme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Disklere uygulanan korozyon testi ile disk üzerindeki oksit tabakasının kalınlığı ve disk kalınlığındaki değişim analiz edilmiştir. Ayrıca balataların mikroyapı analizi için EDX görüntüleri incelenmiştir. Deneyler ve görsel analizlere göre oksit tabakasının kalınlığının balatanın malzemesine göre değişim gösterdiği, çelikten imal edilen balatada çelik olmayan balatalara kıyasla disk kalınlığında daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Blau ve Meyer III [16], konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan fren diski malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler için gri dökme demir, seramik (C/SiC) kompozit, SiC partikülleriyle geliştirilmiş Al matrisli kompozit (MMC), ve Fe<sub>3</sub>Al alaşımlı dökme demir malzemeleri seçilmiş ve testler 11 m/s kayma hızında ve 161 N yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre ortalama sürtünme katsayısı gri dökme demir ve seramik kompozit için 0,38, MMC ve Fe<sub>3</sub>Al alaşımlı dökme demir için 0,21 olarak elde edilmiştir. Deney öncesi ve sonrasında ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri kıyaslandığında ise pürüzlülük miktarının deney sonrasında dökme demir ve seramik kompozitte azaldığı, MMC malzemesinde değişmediği, Fe<sub>3</sub>Al alaşımlı dökme demir malzemesinde ise metalik etkileşime bağlı olarak aşınan partiküllerin etkisiyle arttığı sonucuna varılmıştır. Natarajan vd. [17], dökme demir ve alüminyum takviyeli metal matrisli kompozit malzemedan (MMC) imal edilmiş fren disklerinin aşınma davranışlarını deneysel ve görsel olarak incelemişlerdir. Deneyler 5 farklı yük (20 N, 40 N, 60 N, 80 N, 100 N) ve 4 farklı kayma hızı (2,5 m/s, 3,7 m/s, 5 m/s, 6,3 m/s) koşullarında pin on disk yöntemi ile

gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, dökme demir ve MMC malzemesinin hacim kaybı, sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı parametrelerinin grafiksel olarak analizi ile değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yük ve hız değerlerinin artışına bağlı olarak dökme demir malzemesinin MMC'ye kıyasla daha fazla aşındığı, sürtünme kuvveti değerlerinin ise her iki malzeme için arttığı belirlenmiştir. Sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerlerinin MMC'de dökme demire kıyasla %20 daha fazla olduğu sonucu elde edilmiştir. Analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde MMC malzemesinin dökme demire kıyasla fren malzemesi olarak kullanımının daha uygun olduğu belirlenmiştir. MMC ve dökme demir için deney öncesi ve sonrasında elde edilen optik mikroskop görüntüleri de grafiksel analiz sonuçlarını destekler niteliktedir. Shivamurthy ve Surappa [18], A356 Al + %10 SiCp ve A356 Al + %20 SiCp kompozit malzemeden imal edilmiş fren disklerinin tribolojik performanslarını deneysel ve görsel olarak araştırmışlardır. Çalışmada iş parçası olarak A356 Al, A356 Al + %10 SiCp ve A356 Al + %20 SiCp malzemelerinden imal edilmiş fren diskleri kullanılmış, 192 N yük ve 1 m/s – 5 m/s arasında değişen hız koşullarında pin on disk yöntemi ile aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Aşınma deneyleri sonunda fren disklerinin ve pim olarak kullanılan fren balatalarının aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri analiz edilmiştir. Ayrıca yüzey morfolojisinin analizi için disk ve balataların aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri elde edilmiş ve EDAX ile elemental olarak analiz edilmiştir. SEM ve EDAX görüntülerine göre A356 Al + %10 SiCp ve A356 Al + %20 SiCp kompozitlerinde koruyucu tabaka oluşurken, A356 Al alaşımından elde edilen diskin yüzeyinde koruyucu tabaka oluşmadığı görülmüştür. Deneysel verilere göre ise en düşük aşınma oranı A356 Al + %20 SiCp diskinde, en yüksek aşınma oranı ise koruyucu tabaka oluşumunun gerçekleşmemesi sebebiyle A356 Al diski verilerinden elde edilmiştir. Fren balatalarının aşınma oranları incelendiğinde ise en yüksek aşınma oranının A356 Al + %20 SiCp diskinin deneyinde kullanılan balatada elde edildiği görülmüştür. Deney verileri ve yüzey görüntülerinden elde edilen sonuçların birbiriyle ilişkili olduğu belirlenmiştir. Djafri vd.[19], nem ve korozyon parametrelerinin fren diski malzemesinin sürtünme ve aşınma davranışına etkisini deneysel ve görsel olarak araştırmışlardır. Çalışmada yük, hız, nem ve korozyon parametrelerinin dökme demir (FG25), kromlu rulman çeliği (100Cr6) ve alüminyum takviyeli metal matrisli kompozit malzeme (A359/SiCp) malzemelerinden imal edilmiş fren disklerinin sürtünme ve aşınma davranışına etkisi incelenmiştir.

Aşınma deneyleri, tuzluluk oranı yüksek (%5 NaCl konsantrasyonu) bir test ortamında 10N-200N yük, 500 rpm-1800 rpm hız ve %20-%90 bağıl nem koşullarında pin-on-disk yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney sonunda elde edilen aşınmış ve korozyona uğramış numunelerin optik mikroskop görüntüleri incelenerek yüzeyler görsel olarak analiz edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kayma hızındaki artışın bütün fren disklerinde aşınma miktarında artışa sebep olduğu görülmüştür. Bağıl nemin artmasıyla birlikte yüzeyde oluşan su tabakasının yağlayıcı işlevi sebebiyle bütün fren disklerinde aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. FG25 ve 100Cr6 malzemelerinden imal edilmiş fren disklerinin korozyon davranışının sürtünme ve aşınma üzerinde büyük etki gösterdiği, A359/SiCp kompozit malzemedan imal edilmiş fren disklerinde korozyon tabakasının ihmal edilebilir seviyede olmasından dolayı sürtünme ve aşınma davranışına etki etmediği görülmüştür. Hız, nem ve korozyon parametrelerinin etkileri birlikte değerlendirildiğinde ise A359/SiCp kompozit malzemesinin, FG25 ve 100Cr6 malzemelerine kıyasla daha iyi tribolojik performans sergilediği sonucu elde edilmiştir. Krenkel vd. [20], üç farklı kaplama ile kaplanan kompozit malzemedan imal edilmiş fren disklerinin aşınma performansını deneysel yöntemle araştırmışlardır. C/C – SiC kompozit malzeme ile üretilmiş fren diskleri CVD-SiC, SiSiC ve Sinter- SiSiC ile kaplanmış, elde edilen kaplamalı diskler fren testine tabi tutularak sürtünme katsayısı ve aşınma miktarına etkileri test edilmiştir. Test sonuçlarına göre SiSiC kaplamasının aşınma miktarını ve ağırlığı azaltarak, sürüş performansı ve fren diskinin ömrünü arttırdığı belirlenmiştir. Kompozit malzemedan imal edilen fren disklerinin hafiflik, yüksek aşınma direnci gibi avantajlarının yanı sıra maliyetinin yüksek olduğu görülmüştür.

Kompozit malzemedan imal edilen fren diskleri yüksek mekanik ve tribolojik performans sağlaması gibi avantajlarının yanı sıra üretim zorluğu, zayıf termal özellikleri ve yüksek maliyetli olması sebebiyle sürdürülebilirliği kısıtlamaktadır [21–23]. Sürdürülebilirliği sağlayabilmek için ise düşük üretim maliyetine sahip [15] dökme demir malzemelerin aşınma ve kırılma direnci yüksek malzemeler ile kaplanması, dökme demir malzemeye soğuk veya sıcak sertleştirme işlemleri uygulanması gibi çözümler geliştirilmeye çalışılmıştır. Çakmakaya [24], Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-%25NiCr ve WC-%12Co kaplamalı fren disklerinin fren performansı ve aşınma davranışını deneysel ve görsel olarak araştırmıştır. Çalışmada, kaplamasız ve

kaplamalı fren diskleri, hazırlanan bir fren testi sisteminde çeşitli yük koşullarında test edilerek aşınma miktarları belirlenmiştir. Hazırlanan fren diski numunelerinin yüzey analizi için ise deney öncesi ve sonrasında yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüş, ayrıca yüzeylerin SEM, EDX ve yüzey topoğrafyası görüntüleri incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre disk kalınlıklarındaki azalma miktarının kaplamasız yüzeyde 0,22 mm, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-%25 NiCr ile kaplanmış diskte 0,03 mm ve WC-%12 Co ile kaplanmış diskte 0,01 mm olduğu belirlenmiştir. SEM, EDX ve topoğrafya görüntülerinden de WC-%12 Co ile kaplanmış diskteki aşınma izlerinin daha yüzeysel olması aşınma miktarı sonuçlarını destekler niteliktedir. Öz vd. [25], %88 WC-%12 Co ve Colmonoy-88 (Ni-W-Cr-B-Si) kaplamalı fren disklerinin frenleme performansını deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Çalışmada kaplamasız disk ve kaplamalı diskler titreşim, deformasyon ve gerilme testlerine tabi tutularak ses, sürtünme katsayısı, frekans parametrelerinin birbirleri ile ilişkileri grafiksel olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre kaplamalı disklerin kaplamasız diske kıyasla daha yüksek frenleme performansı gösterdiği belirlenmiştir. Kaplamalı diskler kıyaslandığında ise %88 WC-%12 Co kaplamalı diskin daha yüksek performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Kang vd. [1], seramik kaplamalı fren disklerinin frenleme performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada NiCr – Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (sermet) ve ZrO<sub>2</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (zirkonyum) seramik kaplamalı S38C malzemesinden imal edilmiş fren diskleri ve 28CDV5 çelik fren diskinin performans analizi için fren testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre yüksek hız ve yüksek enerjili fren koşullarında seramik kaplamalı fren disklerinde kararlı bir sürtünme davranışı görülürken, çelik diskte kararsız bir sürtünme davranışı görülmüştür. Seramik kaplama tabakasının disk ile fren pabucu arasındaki ısı etkisini azaltma etkisi sayesinde fren diskindeki aşınma miktarı minimize edilmiş, bu sayede fren diskinin tribolojik performansı artırılmıştır. Demir vd. [26], kaplamalı fren disklerinin tribolojik performansını deneysel ve görsel olarak incelemiştir. Çalışmada, NiCr malzemesinden imal edilmiş fren diskleri NiCr-Cr<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> malzemeleriyle kaplanmış, elde edilen kaplamalı fren disklerinin tribolojik performansları, kaplama işlemi uygulanmamış fren diski ile kıyaslanmıştır. Yapılan bütün testler ve görsel analizler birlikte değerlendirildiğinde, NiCr- Cr<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub> ile kaplanmış fren diskinin tribolojik performansı en yüksek fren diski olduğu belirlenmiştir. Bartys vd. [27], raylı sistem araçlarında kullanılan fren disklerine kaplama malzemelerinin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada C38

malzemeden imal edilmiş fren diskleri kobalt bazlı süper alaşım, farklı kimyasal bileşime sahip iki adet nikel bazlı süper alaşım ve sermet ( $\text{NiCr-Cr}_3\text{Cr}_2$ ) malzemeleri ile kaplanmış, daha sonra bu diskler fren testlerine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarına göre en yüksek sürtünme katsayısına sahip olan diskin sermet kaplamalı fren diski olduğu görülmüştür. Ayrıca 1200 s'lik zaman diliminde gerçekleştirilen fren testinde en çok ısınan diskin kobalt bazlı süper alaşım malzemesi ile kaplanan disk olduğu belirlenmiştir. Aranke vd. [28], otomotiv sektöründe yaygın kullanılan gri dökme demirden imal edilmiş fren disklerinin tribolojik performansının artırılması için diskle entegrasyonu sağlanan kaplama malzemelerinin özellikleri ve kaplama teknolojilerini literatür çalışmalarını detaylı şekilde inceleyerek analiz etmişlerdir. Analiz sonucuna göre kaplama işleminin fren diskinin servis ömrünü arttırdığı, HVOF ve HVAF yöntemlerinin düşük işlem sıcaklığı ve matris malzemeye entegrasyon kabiliyeti sayesinde gözeneklilik ve dekarbürizasyon miktarını minimize etmeleri sebebiyle en uygun yöntemler olduğu belirlenmiştir. Güney ve Mutlu [7],  $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  ile kaplanmış gri dökme demirden (GG25) imal edilmiş fren diskinin deneysel ve görsel olarak inceleyerek, kaplama malzemesinin diskin performansına etkisini analiz etmişlerdir. Kaplamalı ve kaplamasız diskler fren testine tabi tutulmuş, çıkış parametresi olarak sürtünme katsayısı, aşınma miktarı, sertlik, sıcaklık parametreleri değerlendirilmiştir. Ayrıca kaplamalı ve kaplamasız disklerin SEM görüntüleri ile mikroyapıları incelenmiş, EDS görüntüleri ile elemental analizi yapılarak kaplama malzemesinin penetrasyon kabiliyeti analiz edilmiştir. Test sonuçlarına göre kaplamalı diskin kaplamasız malzemeye kıyasla daha az aşındığı ve kaplamalı malzeme ile balatanın temas alanında daha fazla sıcaklık oluşumunun meydana geldiği belirlenmiştir. SEM ve EDS görüntülerine göre kaplama malzemesinin matris malzemeye yeterli penetrasyonu sağlayabildiği görülmüştür.

Mevcut literatür çalışmalarında kaplamalı fren disklerinin tribolojik özellikleri incelenmiş ve tungsten karbür kaplamalı disklerin diğer kaplama malzemelerine kıyasla daha iyi tribolojik performans gösterdiği belirlenmiştir. Fakat WC kaplanmış dökme demir esaslı fren disklerinin su ortamındaki aşınma ve korozyon davranışlarına ilişkin çalışma literatürde mevcut değildir. WC kaplanmış fren disklerinin atmosfere açık koşullarda çalışması sebebiyle su altındaki tribolojik davranışlarının incelenmesi bu çalışmanın özgün değeridir. Bu kapsamda, WC-%12Co kaplanmış gri dökme demir



esaslı fren disklerinin kaplama karakterizasyonu metalografik açıdan yapılmış, diskler kuru ve saf su ortamında aşınma testine tabi tutulmuş ve kaplanmış disklerin korozyon davranışı incelenmiştir. Aşınma deneyleri ball-on-plate yöntemiyle, 30 N ve 20 N yük ve 20 dev/dk ve 50 dev/dk hız parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayısı ve deney sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Ayrıca 2D profilometre ile aşınma izinin boyutsal değerleri elde edilerek aşınma hacmi değerleri hesaplanmıştır.

Çalışmada ikinci özgün değer olarak, çıkış parametrelerinin yük ve hız parametreleri ile ilişkisi varyans analizi (ANOVA) ile nicel olarak incelenmiştir. Fren disklerinin aşınma mekanizmaları ve korozyon davranışları SEM görüntüleri ile, aşınma bölgelerinin elemental davranışları ise EDX ile analiz edilmiştir. 3D yüzey topoğrafyası görüntüleri incelenerek aşınmış bölgelerin yüzey morfolojisi incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### FREN DİSKİ MALZEMELERİ

Araçlarda fren sistemlerinin temelini oluşturan ekipmanların başında fren diskleri ve fren balataları gelmektedir (Şekil 2.1). Frenleme işlemine baktığımızda aracın sahip olduğu kinetik enerji ısı enerjisine dönüşmektedir ve bu enerjinin yaklaşık %90'ı fren disklerinde ısı enerjisi olarak depolanmaktadır. Geriye kalan %10'luk kısım ise ortama transfer edilir. Bu ısı transferi ise fren disklerinin yapısından kaynaklı olarak hava kanallarıyla gerçekleşmektedir. Fren disklerinin hava kanallı imal edilmesinin ana prensibi ısı transferini etkili şekilde gerçekleştirerek aşırı ısınmadan kaynaklı sürtünme katsayısının düzensizliğini önlemektir. Hava kanalına sahip olmayan fren disklerinde ise bu transfer yavaş gerçekleşerek diskin ısınmasına ve sürtünme katsayısının kararsızlığına sebep olabilmektedir. Isı ve sürtünme katsayısı kararsızlıkları fren sisteminin çalışma performansını son derece olumsuz etkilemektedir. Fren sisteminin emniyetli şekilde ve yüksek performansla çalışabilmesi için sistem elemanlarının yüksek verimle çalışması büyük önem taşımaktadır. Fren sisteminin bir elemanı olan fren disklerinin çalışma verimliliğini irdeleyecek olursak, fren disklerinin verimli bir şekilde çalışabilmesinin en etkin faktörlerinden biri malzeme seçimidir. Fren disklerinde malzeme seçimini önemli kılan etken, fren balatası ile fren diski arasındaki mekanik sürtünme katsayısı ve aşınma direncinin büyüklüğü olmaktadır [30]. Sürtünme katsayısının fazla olması ve frenleme esnasındaki ısı (enerji) kaybı da verimli frenlemeye engel olmaktadır. Fren diskinin sürtünme katsayısının yüksek değerlerde olmasının yanında yüksek sıcaklıklarda sabit ve kararlı olması gerekmektedir. Tüm bunların yanı sıra fren diskinin aşınma direnci yüksek bir malzemeden imal edilmesi gerekmektedir.



Şekil. 2.1. Fren diski [31]

Fren sistemlerinde kullanılan frenleme ekipmanlarında istenen karakteristik özellikleri kısaca şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Yüksek sürtünme katsayısına sahip olmalı ve farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısı değerini muhafaza edebilmelidir.
2. Düşük aşınma hızı
3. Yüksek ısı mukavemeti
4. Yüksek ısı iletim kapasitesi
5. Düşük ısı genleşme katsayısı
6. Yeterli basma mukavemeti
7. Aşınma ve korozyona karşı yüksek değere sahip olmalıdır.
8. Nem ve yağ gibi çevresel etmenlerden çok fazla etkilenmemelidir.

Sıralanan bu özellikler göz önünde bulundurularak kullanılan frenleme ekipmanları malzemeleri yarı metalik malzemeler, organik malzemeler ve karbon elyaf içeren kompozit malzemelerden imal edilmektedirler. Fren diskleri genel olarak ısı mukavemeti çok iyi olan ve sürtünme katsayısı orta değerdeki çelik, dökme demir ve bakır alaşımlı malzemelerden imal edilir. Fren diskleri genellikle dökme demirlerden imal edilirken son yıllarda yapılan çalışmalarla birlikte alüminyum matrisli kompozitlerle de imal edilmeye başlanmıştır. Alüminyum matrisli kompozitlerden imal edilen fren diskleri dökme demirden imal edilen fren disklerine oranla hafif, yüksek ısı iletkenlik ve aşınma direncine sahip olmaları nedeniyle fren diski malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Alüminyum matrisli kompozitler imalatlarının yüksek maliyetli olması sebebiyle fren disklerinde dökme demir malzemeler kadar yaygın kullanılmamaktadır [33].

### **1.1. DÖKME DEMİRLER**

İçerisinde %2,11 ile %6,67 arası karbon barındıran karbon-demir alaşımlarına dökme demir denir. Çelikler de yine aynı şekilde demir-karbon alaşımı ile elde edilirken dökme demirlere nazaran çok daha düşük seviyede karbon (%2,11'den az) içermektedirler [34].

Dökme demirler, demir-karbon alaşımı ile elde ediliyor olsa da günümüzde dökme demirin sanayide üretimi sırasında alaşımın içerisine %1-%3 oranında silisyum ilavesi yapılmaktadır. Yapılan silisyum ilavesini de göz önüne aldığımızda sanayide üretilen dökme demirler demir, karbon ve silisyum alaşımları olarak da adlandırılabilirler. Dökme demirlerin yapısında bulunan karbon ve silisyuma ilave olarak düşük miktarda fosfor, kükürt ve mangan da bulunmaktadır.

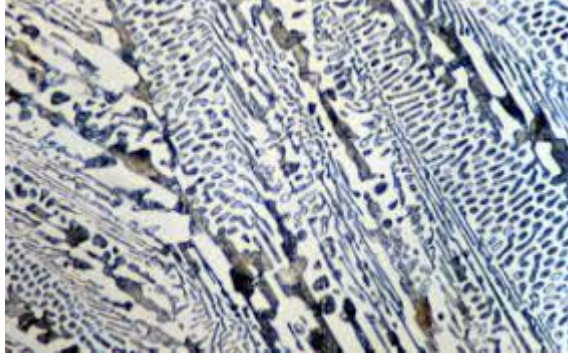
Fren diski imalatında dökme demirlerin kullanılmasındaki ana etmenler aşağıda sıralanmıştır.

1. Düşük ergime sıcaklıklarına sahip olmaları
2. Düşük maliyete sahip olmaları
3. Döküme elverişli olmaları (akışkanlıklarının iyi olması)
4. Yüksek basma dayanımı
5. Aşınma ve korozyon dayanımları yüksektir.

Tüm bunların yanı sıra dökme demirlerin basma gerilimi yüksek fakat çekme gerilimleri düşüktür. Herhangi bir alaşımlandırma işleminin yapılmaması durumunda dövülmeleri ve şekillendirilmeleri çok zordur.

### **1.1.1. Beyaz Dökme Demir**

Beyaz dökme demirler kalıba dökülürken demirin hızlı bir şekilde soğuyup karbonun içeri hapsolmesi ile imal edilmektedirler. Beyaz dökme demirlerin içerisinde C, Si, Ni, Cr ve Cu elementleri bulunmaktadır. Genellikle bileşenlerinde %1,8-3,6 C elementi ve %0,5-1,9 Si elementi bulunmaktadır [36]. Beyaz dökme demirlerin soğuma hızları karbonun grafit yaprakları şeklinde çökmesine sebep olmaktadır (Şekil 2.2).

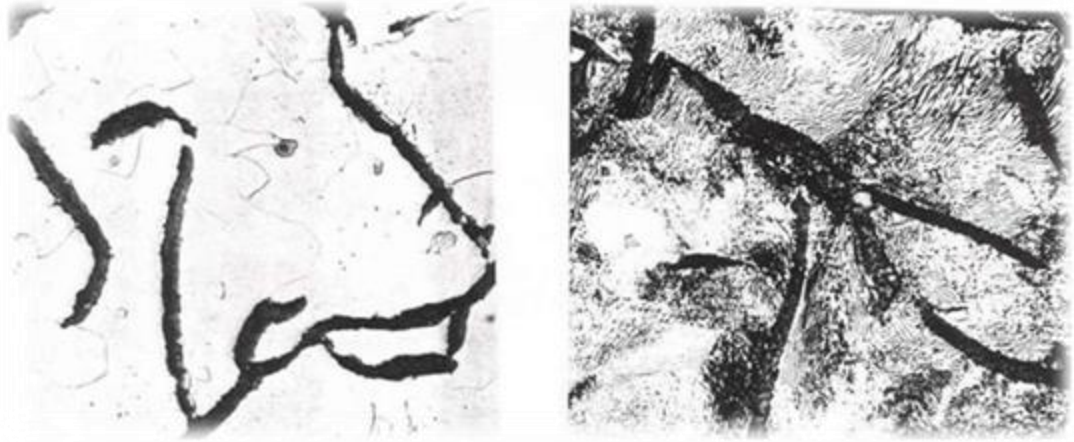


Şekil.2.2. Beyaz dökme demir [34]

Çelik üretiminde, demir içerisinde bulunan karbon miktarının çok çok az olmasından kaynaklı olarak karbon katılaşma esnasında bileşenden ayırlanamamakta ve çözünmüş olarak yapıya hapsolmuş durumda kalmaktadır. Beyaz dökme demir üretiminde de buna çok benzer bir olay gerçekleşmektedir. Çeliklere nazaran dökme demirlerin içerisinde fazla miktarda karbon bulunmasından dolayı sıvı fazda çözünmüş haldeki karbonun çökelmeye başlamadan katılaştırılması gerekmektedir. Beyaz dökme demirlerin yapısı çeliklere benzemekte ve çok kırılgan yapıda olmaktadır. Kırılgan bir yapıya sahip olmalarından ötürü genellikle sementit parçacıklarından kırılmalar gerçekleşmektedir. Malzemede gerçekleşen bu kırılma yüzeyini incelediğimizde ise genellikle açık bir renk görülür ve bu yüzden ki malzeme beyaz dökme demir olarak adlandırılır. Beyaz dökme demirler genellikle madencilik sektöründe, çamur pompalarında ve çimento endüstrisinde kullanılmaktadır.

### 1.1.2. Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demir

Dökme demirlerin kimyasal bileşimine farklı alaşım elementleri ilave edilerek iyi mukavemet, sağlamlık, esneklik ve ısıl işlemlerle sertleştirilebilme özellikleri elde edilebilmektedir. Gri dökme demirlerin bileşiminde bulunan karbonun büyük bir kısmı serbest grafit lamelleri halinde bulunmaktadır (Şekil 2.3). Lamel grafitli (gri) dökme demir, dökme demirler arasında önemli bir yere sahiptir. Malzemede gerçekleşen kırılma sonucunda kırılma yüzeyinin gri renkteki görünümü sebebiyle gri dökme demir denilmektedir.



Şekil.2.3. Gri Dökme Demir, a) Ferrit yapılı dökme demir, b) Perlit yapılı dökme demir [34]

Gri dökme demirlerin iç yapısına baktığımızda %2,5-%4 karbon oranına %1-%3 silisyum oranına, %0,2-%1 mangan oranına, %0,02-%1 fosfor oranına ve %0,02-%0,25 kükürt oranına sahiptir [34]. Gri dökme demirlerin içerisinde bulunan bu elementlerin her biri farklı etkilere sebep olmaktadır. Bu elementlerin etkileri aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

**Karbon;** gri dökme demirlerin ergime sıcaklıklarını düşürürken maddenin akıcılığını arttırmakta ve dayanımını azaltmaktadır. Gri dökme demirlerin bileşenlerindeki karbon miktarı arttıkça (%3'ten fazla) gri dökme demirlerin çekme dayanımı azalmaktadır [34].

**Silisyum;** gri dökme demirlerin içerisinde %1,00 ila %3,50 arasında bulunmaktadır. Dökme demirlerin içerisinde bulunan silisyum ise grafitleşmeye etki etmektedir. Az miktardaki silisyum katılma (soğuma) esnasında grafitleşmeyi sağlayamayacak kadar yetersiz kalabilmektedir. Az miktarda kullanılan silisyum yüksek sıcaklıklarda yapılan ısı işlem ile katı halde grafitleşme ve çekirdek oluşumunu sağlamaktadır. Gri dökme demirin mikro yapısını incelediğimizde silisyum ferrit yapı içerisinde erimiş halde bulunurken ferrit yapıya dayanım kazandırmaktadır [34].

**Kükürt;** gri dökme demirlerin yapısında %0,25 civarında bulunmaktadır. İçeriğinde %0,25'ten fazla kükürt içeren gri dökme demirler göz ardı edilemeyecek derecede sertlik kazandırırken gri dökme demirlerin işlenebilme kabiliyetlerini düşürmektedir

[34]. Gri dökme demir içerisinde tek başına bulunan kükürt elementi demir sülfür oluşumuna neden olmaktadır. Kükürt elementi mangan ile beraber kullanıldığında malzemede perlitik mikro yapının devamlılığını sağlamaktadır.

**Fosfor;** alaşım içerisinde bulunan fosfor elementi metalin akışkanlığını ve soğumuş metal parçasının aşınma direncini arttırmaktadır. Soğuma sırasında fosfor elementinin eriyik içerisine direkt atılmasından kaynaklı olarak eriyiğin katılaşma sıcaklığı düşmektedir.

Gri dökme demirlerin içerisinde bulunan tüm bu elementlerin fren diskine olan etkileri yukarıdaki gibidir. Gri dökme demirlerin fren diski imalatında kullanılmasının avantajları aşağıda sıralanmıştır.

1. Grafit yapılı hammaddenin enerji emme kapasitesi yüksektir ve bu sebepten ötürü titreşim sönümleme kabiliyetleri çok yüksektir.
2. Aşınma korozyon dirençleri yüksektir.
3. Gri dökme demirler eriyik halde akışkan olduklarından dolayı kompleks parçaların dökümünü gerçekleştirebilirler.
4. Eriyik halde bulunan hammaddenin soğuma (katılaşma) sırasında şekil bozukluğu yaşama oranı (büzülme-çekilme) düşüktür.
5. Diğer metallere nazaran daha ucuzdur.
6. İşlenebilirlikleri yüksektir.
7. Kaynak edilebilmeleri kolaydır.

Bu avantajların yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır;

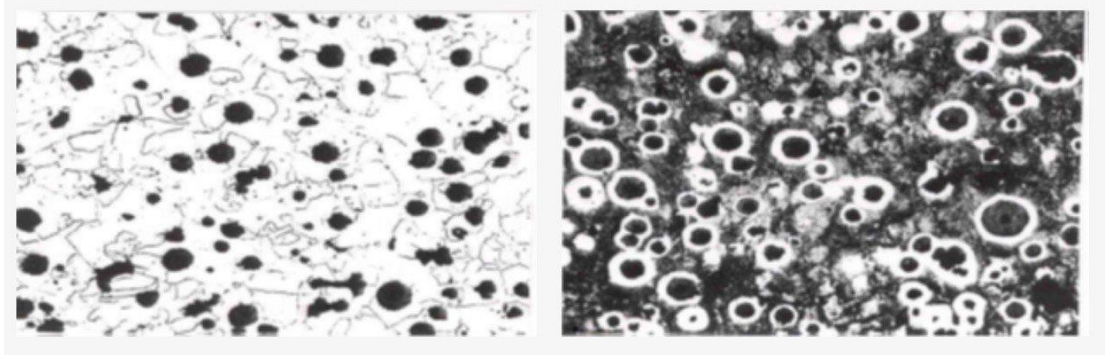
1. Mikro yapısında lamel grafit kümeleri bulundurmalarından dolayı düşük süneklik ve çekme dayanımına sahiptirler.
2. Grafit yapıları nedeniyle kırılabilirler ve darbe dirençleri yok denecek kadar azdır.

Genel olarak baktığımızda gri dökme demirler diğer dökme demirler arasında en yaygın kullanılanlardır. Sahip oldukları özelliklerden dolayı inşaat sektöründe, takım tezgahlarının gövdelerinde, denizcilik sektöründe, boru ve boru bağlantı parçalarında, ergitme potalarında, tarımsal aletlerde, ısı direnci ve sönümlemenin önemli olduğu

fren disklerinde kullanılırlar. Fren disklerinin yanında otomotiv sektöründe motor bloklarında da kullanımları mevcuttur.

### 1.1.3. Küresel Grafitli Dökme Demir

Küresel grafitli dökme demirler, yapısında bulunan karbonun küresel şekle sahip grafit toplarından oluşmasından dolayı bu ismi almıştır (Şekil 2.4). Küresel grafitli dökme demirlerin bir diğer ismi de sfero dökme demirdir. Dökme demir içerisindeki küresel grafit yapısı, sıvı kırı dökme demire magnezyum veya seryum, lityum ve kalsiyum gibi elementlerin eklenmesiyle de elde edilebilir. Elde edilen küresel grafit yapısı dökme demirlerin sünek (yumuşak) olmasını sağlar. Genel olarak baktığımızda küresel grafitli dökme demirler ile gri dökme demirlerin arasında kimyasal bileşim olarak pek de bir fark yoktur. Ama gri dökme demirler lamelli yapıya sahipken küresel grafitli dökme demirlerin yapısında küresel karbon partikülleri bulunmaktadır.



Şekil.2.4. Küresel grafitli dökme demir, a) Ferrit yapılı, b) Perlit yapılı [34]

Küresel grafitli dökme demirler kimyasal yapısında %3-%4 karbon, %2-%3 silisyum, %0,10-%0,90 mangan, maksimum %0,10 fosfor, maksimum %0,03 kükürt ve %0,030-%0,080 magnezyum oranına sahiptir [34]. Küresel yapılı dökme demirlerin içerisinde bulunan bu elementlerin her biri farklı etkiler göstermektedir.

Bu elementlerin etkileri aşağıda sıralanmıştır.

**Karbon;** Genellikle küresel grafitli dökme demirler karbon oranı %3-4 arasında değişmektedir. Ancak küresel dökme demirler için istenilen karbon oranı dar



limitlerdedir. Grafit küreleri karbon oranıyla doğrudan alakalıdır. Karbon oranı (yüzdesi) arttıkça grafit küre sayısı da artmakta sonuç olarak da akışkanlık ve dökülebilirlik kabiliyetleri artmaktadır.

**Silisyum;** Küresel grafitli dökme demirlerde karbon oranı %1,80 ile %2,80 aralığındadır [34]. Silisyum miktarı ötektoid dönüşümde oluşan ferrit oranını ve sertliği arttırarak dökme demirlerin mukavemetlerinde belli bir orada artış meydana getirmektedir.

**Fosfor;** Fosfor elementi gri dökme demirlerde olduğu gibi küresel grafitli dökme demirlerde de kırılgan bir yapıya sebep olur. Fosfor elementi malzemenin tokluğunu ve sünekliliğini aksi yönde etkilediği için %0,05'ten fazla kullanılmamalıdır [34].

**Mangan;** Küresel grafitli dökme demirlerde en önemli alaşım elementlerinin başında gelir ve döküm halinde karbürlerin oluşmasını önlemek amacıyla mangan oranının kontrol altında tutulması gerekmektedir. Malzeme yapısı içeriğindeki kükürtün yapı içeriğindeki olumsuz etkilerini gidermek veya minimuma indirmek amacıyla kullanılır. Mangan elementi tek başına karbür yapıcı özelliindedir. Aynı zamanda silisyum ile (%1,7) + %0,3 Mn değerini aşar ise grafit küreleri sayısını azaltmaktadır. Malzeme içeriğindeki tek başına mangan miktarı %0,4 oranını aştığında kırılganlık oluşmaktadır.

**Magnezyum;** Malzeme içeriğinde minimum %0,05 oranında magnezyum bulunmaktadır. Magnezyum ilave edildiği materyal içerisinde lamelli grafit oluşumunu önleyip küresel grafit oluşmasına sebebiyet vermektedir.

**Molibden;** Küresel grafitli dökme demirlerde molibden elementi yüksek sıcaklıklarda dayanımı ve sertliği arttırmak amacıyla malzemeye ilave edilmektedir. Molibden elementi tek başına ilave edilmesinden ziyade nikel ve bakır elementleriyle birlikte ilave edildiğinde sertliği arttırmakta daha da etkili olmaktadır.

**Nikel;** Nikel elementi temperleme, östemperleme ve sertleştirme uygulanacak dökme demirlerin üretimlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Nikel elementi grafit oluşumunu

kolaylaştırmakla birlikte perlit ve beynit yapıcı bir özelliğe sahiptir. Nikel elementi ilave edildiği metalde sertlik, akma ve çekme mukavemetini arttırırken darbe direncini ve uzamayı düşürmektedir.

**Bakır;** Bakır elementi maliyetinin düşük olmasından dolayı küresel grafitli dökme demirlerde malzemenin sertliğini arttırmak ve perlitik yapı elde etmek için sık kullanılan bir elementtir. Bakır elementi perlitik yapı oluşturduğundan dolayı KGDD'lerin çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve sertliğini arttırırken, sünekliğini ve darbe dayanımını azaltmaktadır.

Küresel grafitli dökme demirlerin içerisinde bulunan tüm bu elementlerin fren disklerine sağlamış oldukları etkileri inceledik. Fren disklerinde kullanılan küresel grafitli dökme demirlerin avantajları aşağıda sıralanmıştır.

1. Talaşlı imalat açısından kolay işlenilebilir bir metaldir.
2. Akma-çekme dayanımı iyidir.
3. Korozyona karşı dayanımları iyidir.
4. Kırılganlığın aksine sünek bir yapıya sahiptirler.
5. Dökülebilirliği, elastikiyetleri, mukavemetleri iyidir.
6. Nispeten darbe dirençleri yüksektir.
7. Düşük üretim maliyetleri vardır.
8. Yüksek ısı iletkenliklerine sahiptirler.

Genel olarak baktığımızda yüksek mukavemet, aşınma direnci ve iyi derecede tokluk özellikleri göstermelerinden ötürü küresel grafitli dökme demirler çoğunlukla sanayi sektöründe kullanımları mevcuttur. Traktör parçalarında, krank milleri, pistonlar, motor şasisi, volanlar, vinç tamburları, ocak kapıları, kaldıraçlar, torna aynaları vb. gibi alanlarda kullanımları da mevcuttur.

#### **1.1.4. Temper Dökme Demir**

Temper dökme demirler genellikle az karbonlu çeliklerin özelliklerini gösterirken beyaz dökme demirlerin bazı ısıl işlemlerden geçirilmeleri sonucunda elde edilirler.

İç yapılarında yüksek miktarda karbon elementi bulunan beyaz dökme demirler uzun süre yüksek sıcaklığa ve oksitleyici bir ortama maruz kaldıkları takdirde temper döküm halini almaktadırlar. Temper yapıyı elde etmek amacıyla katılma sonrasında parçanın ısı işleme tabi tutulması gerekmektedir.

Temper dökme demirler iki gruba ayrılmaktadır;

1. Beyaz Temper Dökme Demirler
2. Siyah Temper Dökme Demirler

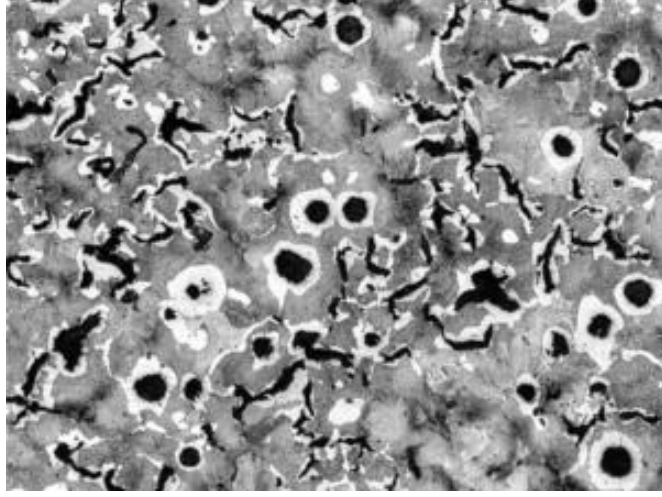
Temper dökme demirlerin özellikleri;

1. Temper dökme demirlerde karbon yapraksı şekilde değil de küresel şekilde olduğu için bir miktar sünektirler.
2. Talaşlı imalatta işlenebilirlikleri kolaydır.
3. Korozyona karşı dirençleri kaplama yapılarak arttırılabilmektedir.
4. Kaynak kabiliyetleri düşüktür.

### **2.1.5. Vermiküler Grafitli Dökme Demir**

Vermiküler grafitli dökme demirler sıkıştırılmış grafitli dökme demirler olarak da adlandırılır. Yapıları lamel grafit ve küresel grafit arasında geçiş sağlayabilecek bir grafit yapısına sahiptir (Şekil 2.5). Vermiküler grafitli dökme demirleri küresel grafitli dökme demirlerle kıyasladığımızda daha iyi termal şok dayanımı, daha az esneklik katsayısı, daha iyi sönümlenme ve daha kolay dökülebilirlik özelliklerine sahiptirler. Belirtilen tüm bu özelliklerin yanı sıra vermiküler grafitli dökme demirler yüksek sıcaklıklara ve ani sıcaklık değişimlerine maruz kalan parçaların üretimleri için uygundur.

Şekilde de görüldüğü gibi vermiküler grafitli dökme demirlerin solucanımsı grafit yapıları gri dökme demirlere nazaran daha iyi mekanik özelliklerinin olmasını sağlamaktadır. Gri dökme demirlerin lamel grafitli yapıları yük altında gerilme yığılmasına neden olarak çatlak oluşmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil.2.5. Vermiküler Grafitli Dökme Demir [34]

Vermiküler grafitli dökme demirlerin kimyasal yapısında elementlerin etkileri aşağıda sıralanmıştır.

**Karbon;** Karbon elementi VGDD’lerde termal difüzyon katsayısını arttırmaktadır.

**Mangan;** Mangan elementi VGDD’lerde metal içeriğindeki çekirdek oluşumunu güçlendirmektedir.

**Fosfor;** Fosfor elementi VGDD’lerde sertliği ve kırılabilirliği arttırmaktadır.

**Bakır;** Bakır elementi VGDD’lerde metal içerisinde perlit dönüşümünü uyarmaktadır. Yapı içeriğindeki bakır elementinin artışıyla doğru orantılı olarak lameller incelmekte ve küçülmektedir bu da termal iletkenliğe sebebiyet vermektedir.

**Nikel;** Nikel elementi bir alaşım elementi olarak malzemenin çekme mukavemetini ve sertliğini arttırmaktadır. Malzemenin daha ince tane yapısına sahip olmasını sağlayarak yüksek sıcaklıklarda yorulma dayanımını iyileştirmektedir.

Vermiküler grafitli dökme demirler yüksek sıcaklıklarda ve ani sıcaklık değişimlerine maruz kalan parçaların üretimlerinde, silindir krank kutularında, turbo kompresörlerde, fren disklerinde, debriyaj plaklarında kullanılmaktadır.

## BÖLÜM 3

### 2.2. TRİBOLOJİ

Tekerleğin icadıyla ve devamında gelen birçok yeni keşifle sürtünme kuvvetini (kaybını) en aza indirgeyebilmek bilim insanlarının başlıca görevleri arasında yer almıştır. Sürtünmeyi minimize edebilmek adına atılan ilk adımlar arasında kaymalı yataklar yer almaktadır. Bunu takiben rulmanlar ve çeşitli yağlayıcıların kullanılmasıyla sürtünmenin en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Bir materyalin ekonomik ömrü ve mekanizmanın verimli çalışması da göz önünde bulundurulduğunda tüm bunlarının yanı sıra sürtünme kuvveti kadar aşınma da önemli bir hal almıştır. Bilinen şöyle bir gerçek vardır ki üretilen enerjinin yaklaşık üçte biri sürtünme olayı sonucunda harcanmaktadır. Diğer bir yandan da sürtünme olayı gerçekleşirken iki yüzey arasında büyük miktarlarda aşınma da gerçekleştiği için bu da ekonomik olarak da kayıplara sebebiyet vermektedir. Ekonomik kayıpları en aza indirebilmek amacıyla aşınmanın kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bunu yapabilmek için de gerekli yağlayıcılar kullanılmaktadır. Tüm bu (aşınma, yağlama ve sürtünme) konularını inceleyen bilim dalı “Triboloji” olarak adlandırılmaktadır. Tribolojinin asıl amacı sürtünmeyi ve aşınmayı en aza indirgeyebilmektir. Triboloji konusu üzerine birçok çalışma olup halen daha geliştirilme evresinde olan yeni bir mühendislik disiplini. Bu geliştirilmeler ışığında triboloji hususunun tek bir parametreye bağlı olmadığı mekanizma içerisindeki tüm malzemeleri kapsadığı da net bir gerçektir.

Tekin'in (2015) çalışmasında da belirttiği gibi sistemde aşınma olayının belirlenebilmesi için tribolojinin temel unsurlarının bilinmesi gerekmektedir [35]. Bu unsurlar sistem içerisindeki unsurlardan çoğu aşınmayı etkileyecek parametrelerdir. Bunlardan bazıları; temel sürtünme elemanları, ara maddesi, yükleme kuvveti ve sistem hızıdır [37]. Bu etkenlerden yola çıkarak tribolojiyi sürtünme, aşınma ve yağlama olarak üç ana başlıkta incelemek daha doğru olacaktır.

## 2.3. SÜRTÜNME

Birbirine temas halinde bulunan iki cisim arasında gerçekleşen harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterilen dirence sürtünme denilmektedir. Cisimler kayma, yuvarlanma ve kayma-yuvarlanma olmak üzere üç farklı şekilde hareket edebilmektedirler. Her bir şekil harekette de bir dirence yani sürtünme kuvvetine maruz kalınmaktadır. Sürtünme kuvveti cismin kütlesine ve sürtünme katsayısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Araçların fren sistemlerinde gerçekleşen sürtünmeyi incelediğimizde fren pedalına etki eden kuvvet sistem tarafından fren disklerine iletilir. İletilen bu kuvvet kısa sürede aracın hızını düşürmekle birlikte aracın hızı büyük oranda sürtünmeden dolayı ısıya dönüşmektedir. Açığa çıkan bu yüksek ısıdan dolayı seçilen fren diskleri ve fren balataları da ısıya karşı dirençli olmalıdır. Sürtünmeyi etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir.

1. Temas yüzeyinin topografyası
2. Temas yüzeylerine dışarıdan gelen toz veya aşınma mahsulleri
3. Temas halinde bulunan malzemelerin birbirlerine göre sertlik farkları
4. Dış yükler
5. Malzemelerin mikro yapısı
6. Temas yüzey alanı
7. Temas eden cisimlere uygulanan kuvvetin yönü ve hızının büyüklüğü
8. Sürtünme kuvveti temas halinde olan yüzeylerin bulunduğu

### 3.2.1. Kuru Sürtünme

Cisimlerin yüzeyleri çok iyi bir şekilde temizlenmiş olsalar dahi hareket kabiliyetlerine karşı dirençten yoksun kalamazlar buna da “kuru sürtünme” denilmektedir. Kuru sürtünmede cisimler arasında kalan yüzeylerin pürüzlü olduklarını unutmamak gerekmektedir. Pürüzlü olan yüzeylere sahip cisimlerin hareketlerine karşı daha fazla direnç uygulanmaktadır. Enerji tasarrufu uygulamalarının önem kazandığı son yıllarda kuru sürtünmeden kaçınılmaktadır. Sürtünen yüzeylerin üzerine veya aralarına özel yağlayıcı maddelerin konulması halinde artık yüzey hem kuru değildir hem de sürtünme kuvveti daha fazla azalacaktır. Kuru sürtünmenin özellikleri aşağıda verilmiştir.

1. Sürtünme kuvveti temas yüzeyine dik değil teğet olarak uygulanmaktadır.
2. Gerçekleşen hareket yönüne ters yöndedir.
3. Statik sürtünme genellikle dinamik sürtünmeden daha büyüktür [38].
4. Sürtünme kuvvetinin fazlalığından dolayı devrilme olayı da gerçekleşebilmektedir.

### 3.2.2. Sıvı Sürtünme

Birbirleriyle temas eden yüzeylerin arasına özel yağlayıcıların sürülmesi durumunda bu sürtünme artık kuru sürtünme değildir. Sıvı sürtünme olarak adlandırılan bu sürtünme şeklinde harekete karşı direnç kuvveti daha az olup yüksek verimli bir çalışma sistemi gerçekleşmektedir. Yağlanmış yüzeyler arasında gerçekleşen sürtünme kuvveti kullanılan yağlayıcı maddenin viskozitesine (kalınlığına) bağlı olarak da değişmektedir. Sıvı sürtünmede oluşan yağ tabakasının oluşum şeklinin önemli olduğundan hidrodinamik ve hidrostatik sıvı sürtünmeleri söz konusudur. Yağ tabakası sürtünen elemanların hareketleri sonucunda oluşuyorsa buna hidrodinamik sürtünme denilmektedir. Sürtünen elemanlar yağlanmadan temas bölgesi dışarıdan bir pompa yardımıyla yağlandığında buna hidrostatik sürtünme denmektedir. Sıvı sürtünmede; sıvı, gaz veya gres gibi yağlayıcı maddeler kullanılabilir.

Araçların fren sistemlerinde kullanılan fren balatası ve fren disklerinin arasında da bir sürtünme gerçekleşmektedir. Gerçekleşen sürtünme aşağıda belirtilen etkenlere bağlı olarak değişmektedir.

1. Aracın hızına
2. Basınca
3. Ortamın sıcaklığına
4. Fren diskinin yapısına ve malzemesine
5. Frenleme süresine ve sayısına
6. Fren diski ve fren balatasının sürtünme alanına
7. Fren disk yüzeyinin kaplama çeşidine

### **3.2.2.1.Aracın Hızının Sürtünmeye Etkisi**

Shorowordi ve ark. yaptıkları çalışmada sürtünme halinde olan farklı malzeme çiftlerinin artan kayma hızı sebebiyle aşınmış partikül seviyesinde bir artış olduğunu ve dolayısıyla da sürtünme tabakasını arttıran bileşenlerin de arttığını bulmuşlardır [39].

### **3.2.2.2.Basıncın Sürtünmeye Etkisi**

Ericsson ve ark. balata ve fren disklerinin arasındaki ortalama sürtünme katsayısının artan basınçta azalan basınca nazaran daha düşük olduğu deneyler doğrultusunda tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmadan anlaşılacağı üzere belirli basınç değerlerinde en küçük sürtünme değeri yakalarken belirli basınç aralığında da yüksek sürtünme katsayısı elde etmemiz mümkündür.

### **3.2.2.3.Ortam Sıcaklığının Sürtünmeye Etkisi**

Araçlarda frenleme esnasında fren ekipmanları arasında gerçekleşen sürtünme kuvvetinden kaynaklı olarak bir ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Isı enerjisi birbirine temas halinde bulunan frenleme ekipmanlarının sıcaklıklarının artmasına ve dolayısıyla da fren balatasının ve fren disklerin ısınmasına yol açmaktadır. Fren balatasının ve fren diskinin ısınmasından kaynaklı olarak sürtünme kuvvetinde bir zayıflama gerçekleşir [39]. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bu sürtünme zayıflaması fren sistemlerinde kullanılacak malzemeler için kritik bir özelliktir. Yüksek sıcaklıklarda sürtünme mekanizmasının malzemeleri olumsuz etkileneceğinden dolayı aşınmada da ani bir artış gerçekleşebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda aşınma arttıkça yüzey azalacak ve sürtünme katsayısı azalacaktır. Bunun sonucu olarak da yüksek sıcaklıklarda frenleme kuvveti düşecektir.

### **3.2.2.4.Fren Diski Yapısının Sürtünmeye Etkisi**

Fren diskinin yapısının kimyasal bileşiminin yanı sıra yüzey geometrisinin de sürtünme katsayısı üzerinde önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır. Fren diskinde temas



alanı arttıkça sürtünme katsayısı da artmaktadır. Bu sebeple fren diskinin tasarlanmasında bu etken göz önüne alınarak tasarım yapılmaktadır.

### **3.2.2.5.Frenleme Süresinin ve Sayısının Sürtünmeye Etkisi**

Sürtünme katsayısı gerçekleşen her bir fren esnasında farklı bir değer gösterebilmektedir. Yeni kullanıma başlayan fren disklerinin yüzeylerinde bulunan pürüzler nedeniyle temas yüzeyi az ve sürtünme kuvveti de az olacaktır. Zamanla yüzey pürüzlülükleri sürtünme ile ortadan kalkarak sürtünme yüzeyi artar ve sürtünme kuvveti de artmış olur. Belli bir sayıda frenden sonra fren diki ve fren balatası üzerindeki sıcaklık artar ve temas bölgelerinde aşınma meydana gelmektedir. Gerçekleşen bu aşınmalar sonrasında sürtünme katsayısı belli bir değerden sonra yavaş yavaş düşüş gösterir.

### **3.2.2.6.Fren Diskinin ve Fren Balatası Arasındaki Temas Yüzeyinin Sürtünmeye Etkisi**

Fren sistemlerinde temas yüzeyleri arttıkça sürtünme kuvveti artacağından frenleme mesafesi azalacaktır. Fakat yapılan bazı çalışmalara göre fazla sürtünme yüzeyi aşırı ısınmaya sebebiyet vereceğinden disk yüzeyinde pekleşmeye (sertleşmeye) sebep olmaktadır. Disk yüzeyinde pekleşme istenmeyen bir değişimdir. Çünkü sertleşme gerçekleşmiş yüzeyden sürtünme esnasında fazla parçacık kopacağından (yüzey daha fazla aşınacağından) kısa bir süre sonra sürtünme katsayısı düşecek ve frenleme mesafesi artacaktır.

### **3.2.2.7.Disk Yüzeylerinde Oluşturulan Kaplama Çeşitlerinin Sürtünmeye Etkisi**

Fren disklerinin yüzey kaplamaları yapılırken göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husus maliyettir. Maliyet dikkate alınırken bir yandan da güvenli ve konforlu sürüş sağlanabilmesi için sürtünme katsayısının belli bir seviyede olması gerekmektedir. Fren diski yüzeyine yapılan kaplamalar değişken hava koşullarında da sürtünme katsayısını maksimum seviyede tutacak şekilde olmalıdır. Fakat fren disk yüzeylerine yapılan kaplama çeşitleri sürtünme katsayısını yani sürtünme kuvvetini

(frenleme süresi) artıracığından yapılacak olan kaplamanın özel bir kaplama olması gerekmektedir.

### 3.3. AŞINMA

Aşınma olayı birbirlerine temas halinde bulunan ve hareketli iki parça yüzeyleri arasında oluşan sürtünmeden kaynaklı malzemenin ağırlık ve boyutlarında meydana gelen kayba aşınma denilmektedir [40]. Bunların yanı sıra aşınma olayı sürtünme ve hareket olaylarından bağımsız olarak metallerin zamanla buldukları ortamlardan dolayı maruz kaldıkları tahribata da aşınma denilmektedir. Sürtünme gerçekleşen yüzeylerde aşınma, sıcaklık artışı ve enerji kaybı da meydana gelir ve bu hareketli sistemlerde istenmeyen bir durumdur. Aşınma istenmeyen bir durum olmasının yanı sıra çalışan sistem içerisindeki materyallerin ömürlerini de tayin etmektedir. Sistem içerisindeki elemanların aşınmaya karşı tasarımları yapıldıktan sonra kullanılan konstrüksiyon elemanlarının da aşınmaya karşı korunması hem sistem ekonomisinin hem de sistemin sağlıklı çalışabilmesi için son derece önemlidir. İki yüzey arasındaki sürtünmeyi yani aşınmayı azaltabilmek için en önemli etken de yağlamadır. Alınan bu önlemler doğrultusunda aşınma tamamen ortadan kalkmamakla birlikte, aşınmanın türüne ve tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınma hızını yavaşlatır ve sistemin çalışma ömrünü uzatır.

Otomobillerde kullanılan fren disklerinin aşınması kullanım koşullarıyla ilişkilendirilmelidir. Aracı kullanan sürücünün sürüş şekli ve freni ne kadar fazla kullandığı ile bağlantılı olarak fren disklerinin aşınması gerçekleşmektedir. Aşınma gerçekleşirken malzeme kaybı, malzeme yüzeyinde bölgesel erime, malzemede kimyasal çözünme ve malzeme yüzeyinden fiziksel anlamda parçacık kaybı olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşmektedir.

Aşınma çoğu zaman makine ve makine parçalarının çalışma ömürlerini belirlemektedir. Sürtünme olayında olduğu gibi aşına gerçekleşen yüzeylerde de geri dönüşü olmayan etkiler kalır. Sürtünen yüzeyler aşınır ve malzeme kaybı yaşanır. Malzeme kayıplarının yaşanmaması veya minimize edilmesi amacıyla çeşitli önlemler alınmaya ve geliştirilmeye çalışılmaktadır. Geliştirilen bu çalışmalar genellikle

malzeme yüzeyinde olmaktadır. Aşınmaya maruz kalan malzemenin yüzeyi gerekli kaplama yöntemleriyle kaplandığı takdirde aşınmanın miktarı değişmekte ve malzemenin kullanım ömrü artmaktadır.

Yapılan son çalışmalarla birlikte aşınma dayanımını artırmak amaçlı yüzey kaplama yöntemleri, kullanılan elemanların malzemesi ve tasarımında önemli değişikliklere sebebiyet vermiştir.

Aşınmayı etkileyen faktörlerle sürtünmeyi etkileyen faktörler birbirlerine benzerlik göstermektedirler. Malzemede gerçekleşen aşınmanın belli bir çoğunluğu da sürtünme olayı sonrasında gerçekleşmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün fazla olduğu malzemelerde temas alanının azlığından dolayı sürtünme kuvveti az ve dolayısıyla da aşınma da azdır. Aşınmayı etkileyen faktörler değişik aşınma türlerini meydana getirmektedir. Aşınma türleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Adhesif aşınma
2. Abrasif aşınma
3. Erozif ve kavitasyon aşınması
4. Yorulma/delaminasyon aşınması
5. Korozyon/Oksidasyon aşınma

Malzeme yüzeylerinde tek bir tür aşınmaya maruz kalmazlar genellikle birçok tip aşınmaya birden maruz kalmaktadır. Örneğin; Adhesif ve abrasif aşınma birçok durumda birlikte gerçekleşir. Aşınmanın giderilmesi için her ne kadar yağlayıcı maddeler kullanılsa da aşınma sıfıra indirilemez. Bu nedenledir ki birlikte temas haline kullanılan malzemelerden genellikle biri daha yumuşak seçilir.

### **3.3.1. Adhesif Aşınma**

Sürtünme eylemi içerisinde bulunan iki yüzey arasında koruyucu tabakalar bir müddet süre sonra etkilerini kaybetmektedirler. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi birbirleriyle temas halinde bulunan iki yüzey sürtünme kuvvetinden dolayı bir müddet sonra cisimlerde sıcaklık artışı gerçekleşmektedir. Cisimlerde gerçekleşen bu sıcaklık artışıyla birlikte metal yüzeylerinde bir kaynama gerçekleşmektedir. Sistemin çalışma

sırasında gerçekleşen bu yapışmalar birbirinden ayrılırken malzeme yüzeylerinde ufak parçalar kopar. Bu şekilde gerçekleşen yüzey aşınmalarına adhesif aşınma denilmektedir. Adhesif aşınma yapışma, plastik deformasyon ve yenme olaylarını içermektedir. Aşınmanın belirtileri arasında kazıma, ovalama ve sürtünerek aşınma bulunmaktadır.

Adhesif aşınmanın gerçekleştiği yüzeylerde yumuşak olan malzemedan imal edilmiş cisim yüzeyinde boşluklar oluşurken diğer sert malzemedan imal edilmiş yüzeyde çukıntılar meydana gelerek iki yüzey arasında adhesif parçacıklar dökülmektedir. Bu sebeptendir ki aşınmanın gerçekleştiği çalışma sistemlerinde sökölüp takılması veya tamir edilmesi kolay parçaların diğerine nazaran yumuşak malzemedan imal edilmesi tercih edilir. Bunu bir örnekle gösterecek olursak dişli çarklarda ana dişli ve pinyon dişli arasında gerçekleşen sürtünme ve aşınmayı buna örnek olarak verebiliriz. Bu malzeme çiftinde pinyon dişlinin sökölüp takılması ve tamir edilmesi daha kolay olduğu için pinyon dişlinin yumuşak malzemedan ana dişlinin ise pinyon dişliye göre daha sert malzemedan imal edilmesi tercih edilir. Adhesif aşınmada yüzeyler arasında yağlamanın da önemi büyüktür. Yüksek hız ve basınç altında çalışan sistemlerin temas yüzeyleri arasına yağlayıcı madde konulursa yağ bu iki yüzey arasındaki aşınmayı minimize edebilmektedir [37]. Yüksek hız ve yüklerde görülen adhesif aşınma sürtünme yüzeyindeki oksit ve nem tabakasına da bağıllık göstermektedir. Malzemelerin özelliklerine göre adhesif aşınmaya etkileri Çizelge 3.1'deki şekilde sıralanabilir.

Çizelge 3.1. Malzeme özelliklerinin adhesif aşınmaya etkisi [37]

Malzeme Özellikleri	Adhesif Aşınma
Oksitli Yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hegzogonal Kristal yapı	Az
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok
Yüksek sertlik	Çok
Yüksek elastiklik modülü	Çok
Yüksek ergime noktası	Çok

Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Çok
Küçük atom yarıçapı	Çok

Adhesif aşınmayı minimize edebilmek için bazı önlemler alınabilir. Bunlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Karşılıklı temas halinde çalışacak malzeme çiftleri birbirleriyle uyumlu bir şekilde seçilmelidir.
2. Temas halindeki yüzeyler güzel temizlenmeli ve tüm yüzey pürüzlülüklerinden arındırılmalıdır.
3. Uygun çalışma atmosferi seçilerek aşınma miktarı azaltılmalıdır.
4. Yüzeyler arasında bulunan CO<sub>2</sub>, oksit, nem ve Azot gibi maddeler aşınmanın azalmasını sağlar [36].
5. Temas yüzeyleri uygun yağlayıcı madde seçilerek yağlanmalıdır.

### 3.3.2. Abrasif aşınma

Sürtünme eylemi içerisinde bulunan iki yüzey arasında kayan sert ve iri parçacıklar sebebiyle aşınma meydana gelir ve bu aşınmaya abrasif aşınma denilmektedir. Bu tür aşınmada malzeme yüzeyinden parça oyuk oluşturarak, yüzey kazınarak ve parçacık ayrılmasıyla gerçekleşir. Tribolojik sistemlerde aşınma ile ortaya çıkan döküntü partiküller temas yüzeyleri arsına sıkışarak temas yüzeyleri arasında oluklar oluşmasına sebebiyet vermektedir [42].

Kullanılan malzemelerin sertlikleri abrasif aşınmayı kontrol altına almak için önemli bir etkidir. Abrasif aşınma hızı, metal malzeme yüzeyine etki eden yükü azaltarak yavaşlatılabilir. Sürtünme eylemi içerisindeki malzemede abrasif aşınmayı azaltmak için aşağıda belirtilen işlemler yapılabilir.

1. Malzeme yüzeyleri sertleştirilmeli
2. Malzeme sertliğini arttırabilmek amacıyla malzemeye ısı işlem uygulamalı
3. Kullanılacak malzemelerin yüzeylerini sert bir tabaka ile kaplanmalı
4. Dışarıdan sürtünme yüzeyleri arasına herhangi bir sert malzemenin girmesi önlenmeli

5. Sistem içerisindeki makinalar ve kullanılan yağlar talaş ve diğer pisliklerden temizlenmeli

### 3.3.3. Eroziyon ve kaviteleşme aşınması

Birbirleriyle temas halinde bulunan iki yüzey arasındaki hızın yüksek değerlere ulaştığı anlarda meydana gelen aşınma şekli erozyon olarak tanımlanır. Erozyon sıvı madde içerisindeki partiküllerin katı yüzeye hızla çarpması sonucu gerçekleşir. Bunun yanı sıra küçük sıvı damlacıklarının yüksek hızlarda malzeme yüzeyine çarpması sonucunda malzeme yüzeyindeki basınç malzemenin basma mukavemet değerini aştığından dolayı malzeme yüzeyinde çukurlar ve yüzey altı deformasyonlar gerçekleşmektedir. Bu olayın sürekli tekrarı sonucunda da erozyon aşınması gerçekleşir.

Kaviteleşme aşınması; katı yüzey ile sıvının birlikte hareketleri sonucunda sıvı içerisinde bulunan kabarcıkların sürtünme alanındaki basıncın düşmesi sonucu kabarcıkların patlamasıyla meydana gelen şok dalgalarının cisim yüzeyine çarpmasıyla gerçekleşir. Sıvı içerisindeki kabarcıkların yüzey gerilmelerinin düşük olması durumunda katı malzeme yüzeyinde daha az tahribat meydana gelmektedir. Bu tip kaviteleşme aşınmaları genellikle su türbinlerinde ve su pompalarında gerçekleşir. Bunun yanında seramik yüzeylerde yapılan bazı deneyler sonucunda silisyum karbür partiküllerinin yüzeye çok hızlı çarpmaları yerel yüzey erimesine neden olur. Eroziyon aşınma gerçekleşen malzemelerde atomik bağ ile aşınma miktarı arasında doğru bir orantı bulunmaktadır. Malzeme içerisindeki atomik bağların güçlü olduğu metallerin atomik bağların zayıf olduğu metallere oranla daha az aşındığı bilinmektedir [42]. Eroziyon aşınmayı etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir.

1. Sürtünme alanında bulunan parçacıkların boyutları, şekilleri ve sertlikleri
2. İki yüzeyin birbirlerine sürtünme hızları
3. Sürtünme eyleminin gerçekleştiği ortam sıcaklığı

Eroziyon aşınmayı azaltmak için alınacak önlemler aşağıda verilmiştir.

1. Seçilen malzemenin atomik bağları kuvvetli bir malzeme olması gerekmektedir.

2. Kullanılan sıvı içerisindeki partiküllerin yüzey gerilmelerinin düşük olması gerekmektedir.

#### **3.3.4. Yorulma/Delaminasyon aşınması**

Birbirleriyle sürekli temas halinde bulunan makine parçalarında zamanla sürtünme veya titreşim kaynaklı aşınmalar ve yorulmalar meydana gelmektedir. Bu aşınma şekli özellikle değişken yüklere maruz kalan yüzeylerde daha çok meydana gelmektedir. Yüzeye yakın bölgelerde oluşan mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek malzeme yüzeyinden parçacıkların kopmasına sebebiyet vermektedir. Gerçekleşen bu aşınma olayına ise yorulma aşınması denilmektedir [43].

Temas halindeki iki yüzey yük altında birbirleriyle sürekli olarak temas ettiklerinde sadece adhesif aşınma değil yorulma aşınması da gerçekleşmektedir. Yorulma aşınması genele olarak yuvarlanma hareketi yapan sistemlerde (rulmanlı yataklar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları) meydana gelmektedir. Yuvarlanma hareketi gerçekleştiği esnada malzeme değişken yüklere maruz kaldığından dolayı bu değişken yükler malzemenin elastikiyet sınırını geçmesine sebebiyet vermektedir. Elastikiyet sınırını aşan malzemede küçük boşluklar meydana gelmektedir.

Delaminasyon aşınması; birbirleri ile temas eden iki yüzey arasında mikro ölçekte yüzeyin altında gerçekleşen aşınma şekline denilmektedir. Yüzeyin hemen altında gerçekleşen bu yorulma aşınması şekli mikro ölçekli çatlaklara sebebiyet vermesinin yanında temas yüzeyindeki yükün daha fazla artmasıyla diğer çatlaklarla birleşerek büyük çatlaklar oluşturur ve malzeme yüzeyinde kopmalara sebebiyet verir.

Yorulma aşınmasını azaltmak için temas halinde bulunan malzemelerin yüzeylerini karbürizasyon veya dövme ile sertleştirilmeli ve seçilen ortam nemden uzak kuru bir ortam olmalıdır.

### **3.3.5. Korozi/Oksidasyon aşınması**

Sürtünme eylemi içerisinde bulunan iki malzeme fiziksel yıpranmanın yanı sıra kimyasal ve elektrokimyasal yıpranmaya da maruz kalmaktadır. Sürtünme esnasında iki yüzey arasında yapısal farklılıklardan dolayı oluşan tabakada gerçekleşen aşınmaya korozi aşınma denir. Aşınma önleyici katkı maddelerinin çok fazla kullanılması da korozi aşınmaya sebebiyet vermektedir.

Kimyasal aşınma malzemede kendi kendine oluşabilmesinin yanında diğer aşınma şekilleriyle birlikte de gerçekleşebilmektedir. Korozi aşınma gerçekleşen yüzeylerde gerçekleşen reaksiyon partikülleri sürtünme eylemi ile birlikte malzeme yüzeyinden ayrılmaktadır. Malzemede gerçekleşen aşınma miktarı malzeme yüzeyindeki reaksiyon hızına ve yüzeyde oluşup sürtünme eylemi ile yüzeyden ayrılan malzeme parçacıklarının hızına da bağlıdır.

Oksidasyon aşınması; sürtünen elemanlar arasında oluşan oksit tabakası malzemenin aşınma direncini büyük ölçüde düşürmektedir. Oluşan oksit filmi malzemenin adhesif aşınmaya karşı direncini arttırırken, devamlı hareket halinde yırtılan oksit filmi abrasif aşınmayı arttırmaktadır. Korozi ve oksidasyon aşınmasını azaltmak amacıyla sürtünme mekanizması içerisinde bulunan malzeme yüzeyleri fosfat veya sülfat ile kaplanmalı ya da oksidasyonu önlemeye yardımcı olan yağlayıcı maddeler kullanılmalıdır.

### **3.4. YAĞLAMA**

Yağlama birbirleriyle temas halinde olan yüzeyler arasındaki sürtünmeyi ve dolayısıyla da aşınmayı azaltmak amacıyla kullanılan sıvı veya katı kayganlaştırıcı maddelerdir. Yağlama işlemi ile sistem içerisinde aşınmanın azaltılması amaçlanırken sistem verimliliği de artmış olur. İki yüzey arasında gerçekleşen kayma hareketi ile temas yüzeyleri arasında bulunan partiküller de yağlayıcı madde ile sistemden uzaklaştırılması sağlanır. Yağlayıcı maddelerin bir diğer önemli özelliği ise sürtünme eylemi gerçekleşen parçalar arasında sıcaklık artışını engellemektir. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi sürtünen cisimler arasında gerçekleşen sıcaklık artışı aşınmayı

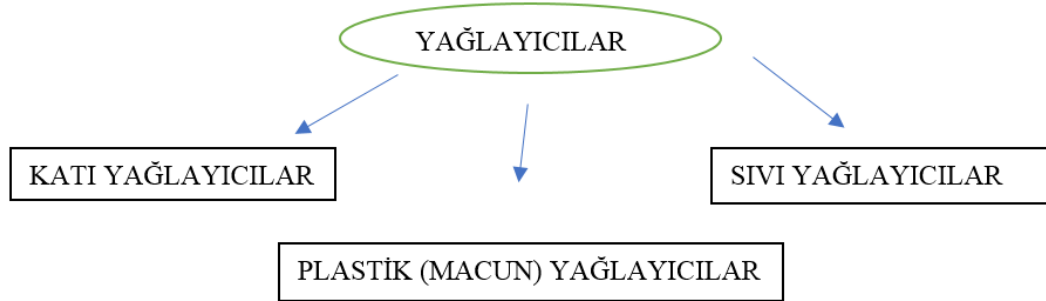


arttırmakta ve malzemenin ömrünü azaltmaktadır. Buradan anlaşılıyor ki kullanılan yağlayıcı maddeler sistem içerisindeki elemanların kullanım ömürlerini arttırarak tasarruf sağlamış olur.

Fren sistemlerinde kullanılan yağlamanın amacı ise fren diski ve fren balatası arasındaki sürtünmenin sürekliliğini sağlamak amacıyla. Fren diski ve balatası arasında gerçekleşen sürtünme sonucu malzeme sıcaklığının artmasıyla fren balatası fren diskine yapışma eğiliminde olur. Bu yapışmayı yani fren konforunu ve verimliliğini arttırmak amacıyla fren diskleri yağlanmaktadır. Yağlanan fren diskleri vibrasyondan ve gürültüden uzak olacaktır.

### 3.4.1. Yağlayıcılar

Tribolojik sistemlerde kullanılacak olan yağlayıcılar katı, sıvı veya gaz formlarda olabilmektedirler (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yağlayıcı Türleri

Yağlayıcı madde kullanmanın avantajları;

1. Yatak ve benzeri sistem elemanlarında sürtünme ve aşınmayı azaltır.
2. Yeterli miktarda yapılan yağlama sürtünme mekanizması içerisinde yabancı madde girişini de önler.
3. Yağlayıcı madde sayesinde kopan talaş parçacıkları sistem içerisinde rahatlıkla uzaklaştırılabilmektedir.
4. Yağlayıcı maddeler sürtünme mekanizmaları içerisinde soğutucu işlevi görerek sistemin ısınmasını engeller.

5. Kullanılan yağlayıcı maddeler materyallerin korozyon ve paslanmasını engeller.
6. Yağlayıcı maddeler kullanıldığı bazı sistemlerde yalıtkan olarak da görev yapabilir.

#### **3.4.1.1. Katı Yağlayıcılar**

Katı yağlayıcılar kullanıldıkları yüzey üzerinde toz veya ince bir tabaka oluştururlar. Oluşan bu tabaka hareket esnasında sürtünmeyi azaltmayı ve yüzeyleri aşınmaya karşı korumaya yarar. Toz haline bulunan yağlayıcılar yalnız başlarına da kullanılabilir ya da sıvı veya gres yağlayıcılarla beraber karıştırılarak da kullanılabilir. Pratikte en çok kullanıma sahip toz yağlayıcılara; Grafit (C), molibden disülfid ( $\text{MoS}_2$ ), boron nitrit, titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) ve tungsten disülfid ( $\text{WS}_2$ ) örnek olarak verilebilir. Katı yağlayıcılar yüksek sıcaklıklara kadar iyi bir şekilde yağlayıcı özelliklerini koruyabilmektedirler.

##### **3.4.1.1.1. Grafit**

Grafit yataklama ve elektroteknikte yaygın olarak kullanılan yağlayıcı maddedir. Bu yağlayıcı madde roket ve benzeri diğer makinelerde yüksek sıcaklık altında çalışan mafsallarda yatak malzemesi olarak da kullanılabilir. Bunun yanında sentetik grafitler diğer yağlara karıştırılarak sınır sürtünme halinde olan mekanizmalarda sürtünme ve aşınma boyutlarını değiştirir.

Grafitin iyi bir yağlayıcı özelliğe sahip olmasının en önemli özelliği %95 saf olmasıdır [45]. Grafitin kimyasal yapısına baktığımızda karbon atomları hexagonal şekilde sıralanmıştır. Tanecik tapıları yassı levhalardan meydana gelmekte ve bu levhalar birbirleri arasında rahatça hareket edebildiklerinden ve yüksek basınçlara dayanabildiklerinden grafitler yüksek performanslı bir yağlayıcı olma özelliğine sahiptir. Bu sebeptendir ki genellikle fren balata sistemlerinde yağlayıcı olarak grafit kullanılmaktadır.

#### **3.4.1.1.2. Molibden Disülfid**

Molibden disülfid ince film tabakası oluşturan bir yağlayıcı olması sebebiyle sertliği arttırıp sürtünmeyi azaltmaktadır. Molibden disülfid küçük oranlarda diğer yağlayıcılarla birlikte kullanılmasının yanı sıra çevre şartlarına ve neme göre yağlama özelliği değişmekte olup nemli ortamda sürtünme özelliklerini kötüleştirir.

Düşük hızlarda çalışan kayar yüzeylerde ve tozlu ortamlarda kullanılması tercih edilir. Gres ve diğer yağlayıcılarla birlikte kullanıldıklarında daha iyi performans verebileceklerken oda sıcaklıklarında kuruması bu yağlayıcı çeşidi için bir dezavantajdır.

#### **3.4.1.2. Sıvı Yağlayıcılar**

Sıvı yağlayıcıları üç ana grupta incelenmek daha doğru olacaktır. Bunlar; organik (bitkisel ve hayvansal) yağlayıcılar, mineraller (madensel yağlayıcılar) ve sentetik yağlayıcılardır. Sistem içerisinde kullanılan malzemeler metal veya metal alaşımları ise sürtünmeyi aza indirmek amaçlı kullanılacak yağlayıcı madde çeşitleri farklı farklı olabilmektedir. Fakat sistem içerisinde bulunan sürtünme ve aşınmaya maruz kalan malzemeler plastik, lastik ve metal dışı malzemeler ise sürtünmeyi minimize etmek amacıyla kullanılacak yağlayıcı madde sıvı yağlayıcılar olmalıdır. Yukarıda bahsettiğimiz sıvı yağlayıcı çeşitleri aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

##### **3.4.1.2.1. Organik (Bitkisel ve Hayvansal) Yağlayıcılar**

Bitkisel ve hayvansal organizmalardan ekstraksiyon (bir bileşiğin herhangi bir çözücü kullanılarak karışımdan seçici olarak çıkartılması) yoluyla elde edilen yağlar en geniş uygulama alanına sahip yağlardır. Organik yağlayıcıların uygulama alanlarının geniş olmasının bir diğer sebebi ise ıslatma kabiliyetlerinin yüksek olmasıdır. Sistem içerisindeki sürtünmeye maruz kalan yüzeylere yağlayıcı maddenin ıslatması ve tutması özelliğine ıslatma kabiliyeti denilmektedir. Organik yağlayıcıların ıslatma kabiliyetleri mineral yağlardan çok daha fazla olması sebebiyle organik yağlayıcıların kullanım alanları daha geniştir. Tüm bu olumlu özelliklerin yanı sıra organik

yağlayıcıların kimyasında bulunan bağların belli bir kopma limiti bulunmaktadır. Organik yağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık gösterememesinden dolayı kısa ömürlüdürler.

#### **3.4.1.2.2. Mineraller (Madensel Yağlayıcılar)**

Madensel yağlar ham petrolün damıtılması yani fraksiyone kondansasyon (kısmi yoğunlaştırılması) sonucu elde edilen yağlardır. Temel yağlar arasında harmanlama sonucu daha değişik yağlar elde edilebilmektedir. Kullanılan ham petrolün yapısına göre parafin, naften ve karışık esaslı mineral yağlar elde edilir.

Mineral yağların kullanımının yaygın olmasının sebeplerini şu şekilde sıralayabiliriz.

1. Mineral yağlar yani sıvı yağlar sürtünme yüzeyleri arasında kolayca yayılabilirler.
2. Mineral yağların sistem içerisinde kullanımında akış bulunduğu takdirde sistem ısısını dışarıya taşıyabilmektedirler.
3. Metalleri oksitleme özellikleri bulunmamakta aksine oksitlemeye karşı metali korumaktadırlar.
4. Kullanıldıkları yüzeylere iyi yapışarak yağlayıcının verimini arttıırırlar.
5. Diğer yağlayıcılara göre daha ucuzdur ve üretimi daha kolaydır.

#### **3.4.1.2.3. Sentetik Yağlayıcılar**

Sentetik yağlar genellikle kimyasal maddelerden ısı ve basınç altında üretilen yapay yağlardır. Yapay yağlar olmasına rağmen sentetik yağlar kalitelidirler. Kimyasal yağlarına göre sentetik yağlar dört ana gruba ayrılmıştır. Bunlar poliolefinler, poliglikoller, silikonlar ve esterlerdir.

Sentetik yağların kullanımının avantajları aşağıda verilmiştir.

1. Sıcaklığa karşı mukavemetleri iyidir.
2. Zor oksitlenme özelliğine sahiptir.
3. Zor tutuşurlar bu sebeple de içten yanmalı motor aksamlarının yağlanmasında kullanılırlar.

4. Geniş sıcaklık aralılarında kullanılabilme özelliklerine sahiptirler.

Sentetik yağların kullanımının dezavantajları aşağıda verilmiştir.

1. Korozyona sebebiyet vermektedirler.
2. Her malzemeye uyum sağlayamamaktadırlar.
3. Diğer yağlayıcı maddelerle birlikte kullanıldıklarında kullanılan katkı maddesini içinde çözümleyemeyebilirler.
4. Pahalıdırlar.

### **3.4.1.3. Plastik (Macun) Yağlayıcılar**

Pratikte gres olarak bilinen plastik yağlayıcılar, madensel sabun ve çeşitli sıvı yağların krem kıvamında karıştırılmasıyla elde edilir. Plastik yağlayıcılar kullanılan karışım maddelerine göre sodyum gresi, lityum gresi, kalsiyum gresi olarak isimlendirilirler. Gresler genellikle açık sistemlerde ve uzun yağlama süreli, düşük ve orta hızda yük altında çalışan sistemlerde kullanılırlar. Greslerin özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Temas ettikleri malzemeye yapışma kabiliyetleri yüksektir.
2. Sürtünmeyi azaltma özellikleri vardır.
3. İçerisinde kullanılan katkı maddeleri sonucunda korozyona karşı koruyuculuk özelliği kazanmaktadırlar.
4. Darbeli ve sarsıntılı yataklarda 100 °C'ye kadar iyi sonuçlar vermektedirler.

## BÖLÜM 4

### 4.1. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Sanayileşmenin hızla arttığı bu dönemde kullanılan ekip ve ekipmanların herhangi bir işlem uygulanmaksızın kullanılması sistem performansı için yetersiz kalmaktadır. Sistem performansını ve ömrünü arttırmak amacıyla sistem elemanlarına ısıtma işlemi, yüzey sertleştirme ve kaplama, yağlama gibi bazı işlemler uygulanarak sistem performansını ve ömrünü arttırmak mümkün kılınmaktadır. Bunların yanı sıra sistem içerisinde çalışan malzemeye yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Uygulanan yüzey işlemleri kaplama malzemesinin sistem elemanına etkileşim şekillerine göre veya kaplama malzemesinin fiziksel durumuna göre sınıflandırılmaktadır.

Kaplama malzemesinin sistem elemanına olan etkileşimine göre sınıflandıracak olursak eğer. Yüzey kaplama teknikleri aşağıda sıralanmıştır.

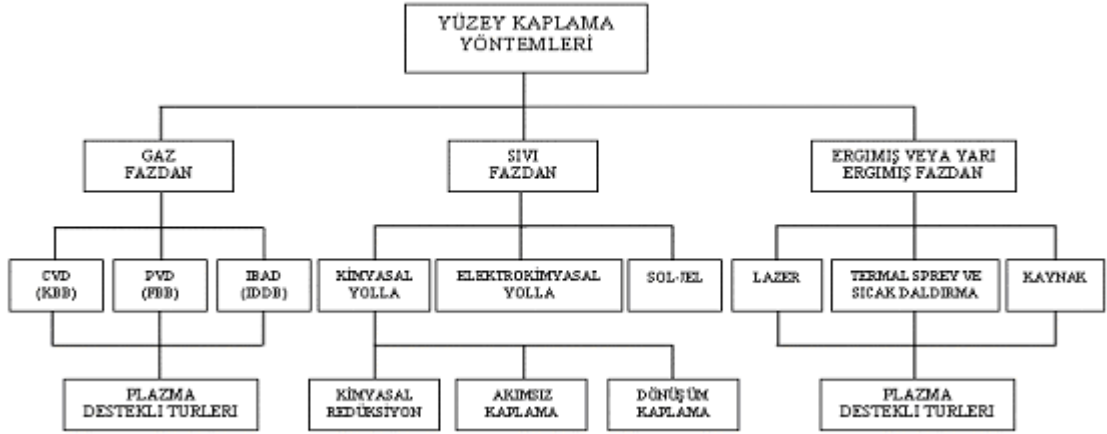
1. Fiziksel teknikler
2. Mekanik teknikler
3. Kimyasal teknikleri
4. Elektrokimyasal kaplamalar

Bunların yanı sıra yüzey kaplama yöntemleri orijinal dediğimiz kullanılmamış parçaya uygulanmasının yanı sıra bozulan ve tamire ihtiyaç duyulan parçalara da uygulanabilmektedir [46].

Yüzey kaplama işlemleri, sistem elemanının aşınma, erozyon, yıpranma, darbe dayanımı, manyetik ve termal etkileşimlerini, korozyon direncini, tribolojik performansını ve iletkenliğini arttırmak amacıyla yapılmaktadır. Yüzey kaplama yöntemlerini kullanılacak olan kaplama malzemesinin fiziksel durumuna göre sınıflandırmak gerekirse eğer;

Yüzey kaplama yöntemleri aşağıda sıralanmıştır (Şekil 4.1).

1. Gaz Fazda Yüzey Kaplama
2. Sıvı Fazda Yüzey Kaplama
3. Ergimiş/Yarı Ergimiş Fazda Yüzey Kaplama



Şekil 4.1. Kaplanacak malzemenin fiziksel durumuna göre kaplama yöntemlerinin ayrılması [47]

#### 4.1.1. Gaz Fazda Yüzey Kaplama Yöntemi

Gaz fazda yüzey kaplama yöntemi kaplama yapılacak kaplama malzemesinin fiziksel durumundan dolayı bu kaplama yöntemine gaz (buhar) fazda kaplama yöntemi olarak da isimlendirilmektedir. Buhar fazda kaplama yöntemi uygulanan malzemede yüksek aşınma ve korozyon direnci oluşmaktadır. Ayrıca buhar fazda kaplama yöntemleri buharın karmaşık yüzeylere ulaşılabilirliği sebebiyle dekoratif yapı malzemelerde de kullanılmaktadır [48]. Gaz fazda yapılan yüzey kaplama yöntemlerinin avantajları aşağıda verilmiştir.

1. Yapılan kaplama malzemenin yüzey kalitesini artırırken malzeme yüzeyinden dökülmez.
2. Yapılan kaplama malzeme yüzeyinde homojen bir şekilde dağılım göstermektedir.
3. Yüksek sertlik ve yüksek aşınma mukavemeti sağlar.
4. Düşük sürtünme ve ısıl iletkenliğe sahip olmasından dolayı malzemenin sürtünme davranışı altında ısınmasını azaltır [49].
5. Gaz fazında yapılan yüzey kaplama yöntemi düşük kaplama kalınlığı ile malzemenin yüzey-boyut toleranslarını aşmamasına sebebiyet verir.

#### **4.1.2. Sıvı Fazda Yüzey Kaplama Yöntemi**

Sıvı fazda yüzey kaplama yöntemi çözeltilerden faydalanılarak yapılan yüzey kaplamaları olarak da bilinmektedir. Çözeltilerden gerçekleştirilen yüzey kaplama yöntemlerine kimyasal kaplama, elektrokimyasal kaplama, kimyasal redüksiyon işlemleri ve sol-jel metodu da örnek olarak verilebilmektedir. Bu yüzey kaplama metodu ile krom, altın, bakır, gümüş, çinko vb. metaller malzeme üzerine kolaylıkla kaplanabilmektedir [48]. Yöntemin avantajları aşağıda verilmiştir.

1. Korozyon direncini artırır.
2. Kaplanan malzemeyi yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını artırır.
3. Çevreden gelebilecek kimyasal deformasyonlara karşı malzemeyi korur.
4. Malzemenin aşınma direncini artırır.

#### **4.1.3. Ergimiş/ Yarı Ergimiş Fazda Yüzey Kaplama Yöntemi**

Ergimiş/Yarı Ergimiş fazda yüzey kaplama yöntemi termal püskürtme, metalik veya ametalik yüzey kaplama uygulamaları için kullanılan bir tanımlamadır. Kullanılacak toz, tel ve çubuk gibi kaplama malzemeleri ergimiş veya yarı ergimiş faza farklı enerji kaynakları kullanılarak getirilir. Ergimiş veya yarı ergimiş faza dönüştürülen kaplama malzemesi kaplanacak malzeme üzerine belli bir hızda ve sıcaklıkta püskürtülür. Deforme olmuş malzeme yüzeyinin yenilenmesinde ve onarılmasında malzeme yüzeyini tamir etmek amacıyla ve dekoratif kaplama yapılması için de kullanılabilir [48]. Yapılan bu kaplama yöntemi sonucunda aşağıda belirtilen avantajlar elde edilebilir.

1. Daha yüksek aşınma dayanımı sağlar.
2. Malzeme yüzeyinde farklı ikincil bir tabaka oluşturarak malzeme kaybını önlemeyi sağlar.
3. Korozyon direncini artırır.
4. Oksitlenmeyi ve sıcak korozyonu engeller.



## 4.2. YÜZEY KAPLAMA MALZEMELERİ

Metallerin yüzeylerinin farklı metotlar yardımıyla kaplanacak yüzeyin ve kaplama sonucu makine parçasına sağlayacağı fiziksel özellik bakımından kaplama malzemeleri de büyük önem arz etmektedir. Malzeme yüzeylerini kaplamak amacıyla kullanılan tungsten karbür, nikel, molibden, Alüminyum titanyum nitür, Alüminyum krom nitür, zirkonyum oksit, krom, titanyum oksit, alüminyum oksit kaplama gibi birçok kaplama malzemesi bulunmaktadır. Kullanılmakta olan bu yüzey kaplama malzemelerinden birkaç tanesini detaylı incelemek gerekirse;

### 4.2.1. Tungsten Karbür (WC) Kaplama

Tungsten karbür, Tungsten atomu (W) ve karbon atomunun (C) kimyasal yolla birleşik oluşturmasıyla elde edilen bir bileşiktir. WC toz halinde kullanılabildiği gibi tel halinde de kullanılabilmektedir. Tungsten karbür kaplama yöntemi ile elde edilen malzeme ürünün kendisinden daha ucuz ve özellikleri daha düşük bir taban malzemesinden daha sert ve dayanımı yüksek malzeme elde etmemizi sağlamaktadır. Kaplama sonucunda daha sert bir malzeme elde edilmekle birlikte yüzey pürüzlülüğü yüksektir ve yapısı taneli olmasından dolayı talaşla işlenemez. WC kaplama yöntemi ağır yük altında aşınma ve korozyonun fazla olduğu iş makineleri parçalarını kaplamak amacıyla kullanılmaktadır.

WC kaplama yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

1. HVOF Yöntemi
2. Ark sprej yöntemi
3. Alev tel püskürtme yöntemi
4. Alev toz püskürtme yöntemi

Kullanılan bu kaplama yöntemlerinden HVOF yöntemi ile gerçekleştirilen yüzey kaplamalarında aşınma ve korozyon direnci yüksek Tungsten Karbür kaplamalar yapılabilmektedir.

WC kaplamanın özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Yüksek yüzey sertliği
2. Daha uzun malzeme ömrü
3. Daha yüksek korozyon ve aşınma direnci [50]
4. Daha iyi darbe direnci ve yorulma direnci sağlar [51]

#### **4.2.2. Krom Kaplama**

Yaygın olarak yüksek hızlı oksit sprey (HVOF) kaplama metoduyla uygulanan Krom kaplamalar kapladıkları malzemenin yüzeyine sertlik kazandırmaktadırlar. Krom kaplamanın sonucunda basınca, darbeye, korozyona ve aşınmaya dayanıklı yüzeyler elde edilmektedir. Kaplama yapılan malzeme oda sıcaklığına nazaran yüksek sıcaklıklarda oksit tabakası oluşturması sebebiyle aşınma direnci artar ve sürtünme ile malzeme kaybı azalır. Sarıca'nın yaptığı çalışmaya göre kullanılmayacak sistem parçalarının sert krom kaplama ile geri kazanılması ve kullanım ömrünün arttırılmasının yanı sıra %60'lara varan tasarruf edilebilmektedir [57].

Krom kaplamaların kullanım yerleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Krom kaplama çelik esaslı hammaddeden yapılan parçaların yüzey sertliklerini arttırmak ve korozyon dayanımını iyileştirmek amacıyla uygulanır.
2. Yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direnci gösterdiklerinden dolayı buhar türbinleri ve döküm kalıplarında kullanılır.
3. Bunların yanı sıra; silindir, motor valfleri, piston halkaları, çekme takımları ve mil yataklarının kaplamalarında kullanılır.
4. Düşük ıslanabilirlik ve yapışma özelliklerine sahip olduklarından metal, plastik, cam ve kauçuk gibi malzemelerin üretim kalıplarında kullanılırlar [56].

#### **4.2.3. Krom Oksit Kaplama**

Krom oksit kaplamalar alümina esaslı yüzey kaplama malzemelerine göre daha yüksek aşınma direnci sağlamaktadırlar. Kaplama sonucunda malzemeye yüksek sertlik ve korozyon direnci sağlamaları sebebiyle yüksek aşınmaya maruz kalabilecek

endüstriyel uygulamalarda krom oksit kaplanmış malzemelerin kullanılması tercih edilmektedir.

Güzel'in yapmış olduğu çalışmaya göre krom oksit yüzey kaplama yöntemiyle kaplanan malzemenin oda sıcaklığında ve ısıtma işlem sonrası aşınma performansının arttığı görülmüştür [52]. Ağır hizmet şartlarında çalışan metalik kaplamalar aşınma ve korozyon direncini geliştirmek için makine, tekstil, otomotiv ve mühendislik elemanlarının kaplanmasında kullanılır [54]. Krom oksit kaplamalar yüksek sıcaklıklarda çalışacak malzemelerin kaplanmasında tercih edilmemektedirler. Krom oksit kaplamalar yüksek mekanik ve kimyasal özellikler sergilerler. Krom oksit kaplamalar yüksek yüzey sertliği oluşturduklarından dolayı diğer oksit içerikli kaplamalara nazaran daha iyi sürtünme, aşınma ve korozyon direnci sağlarlar. Oksit kaplamalar arasında en yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahiptir.

#### **4.2.4. Alüminyum Oksit ( $Al_2O_3$ ) Kaplama**

Beyaz renge sahip olan Alüminyum Oksit ( $Al_2O_3$ ) kaplamalar boşluklu kimyasal yapıya sahip olmaları sebebiyle diğer birçok kaplama çeşitlerinden daha fazla aşınma kaybı sergiledikleri tespit edilmiştir. Alüminyum oksit kaplamalar diğer kaplama malzemelerinden olan zirkonyum oksit kaplamalara göre daha sert olmaları sebebiyle aşınma hızının daha hızlı olduğu bilinmektedir [52]. Alüminyum ile malzeme yüzeyini kaplamak için sıcak daldırma, püskürtme, elektrik ark püskürtme, akımsız metal kaplama, vakum kaplama ve iyon kaplama yöntemi gibi farklı kaplama yöntemleri kullanılabilir [55]. Alümina esaslı seramik kaplamalar hem yüksek sıcaklık uygulamalarında hem de aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilen kaplamalardır. Güzel'in yaptığı çalışmaya göre ısıtma işlem sonrası alüminyum esaslı kaplamalar oda sıcaklığında aşınma miktarının arttığı yani aşınma direncinin azaldığı tespit edilmiştir [52].  $Al_2O_3$  kaplamalar seramik kaplamada başarılıdır. Aşınma, erozyon, kaviteasyon ve korozyon dirençlerini yükseltir. Alüminyum esaslı kaplamalar yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direnci sağlayabilmektedirler.

#### 4.2.5. Titanyum Oksit (TiO<sub>2</sub>) Kaplama

Titanyum oksit kaplama aşınma, korozyon, kavitasyon ve erozyona karşı direnç istenilen durumlarda kaplanmaktadır. Yüzeyi kaplanacak malzemede TiO<sub>2</sub> miktarı arttıkça sertlik ve sürtünme katsayısında düşüş gerçekleşmektedir. Bu kaplama çeşidi aşınma ve korozyona karşı direnç istenilen sistemlerde kullanılmaktadır. Kaplama malzemesindeki TiO<sub>2</sub> miktarının artışı plazma yöntemiyle püskürtülmüş seramik kaplamalarda kırılma tokluğu, düşük gözeneklilik, daha iyi tokluk, aşınma ve sürtünme direnci sağlarken TiO<sub>2</sub> ile kaplanan diskin ve ona bağlı olarak da balatanın daha uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [54]. TiO<sub>2</sub> ile kaplanan malzemelerde sürtünme ve aşınma katsayısı azalmaktadır. Mutlu ve ark. bildirdiğine göre titanyum'ca zengin kaplamalar malzemenin çalıştığı sistemdeki yük ve sıcaklık arttıkça Oksit tabakası kaplamanın aşınma ve sürtünme davranışını etkilemektedir [54]. Kaplama malzemesine yapılan TiO<sub>2</sub> ilavesi kaplamanın daha iyi bağ oluşturması sebebiyle kırılma tokluğunun ve aşınma direncinin artmasına yol açmaktadır.

#### 4.2.6. Zirkonyum Oksit (ZrO<sub>2</sub>) Kaplama

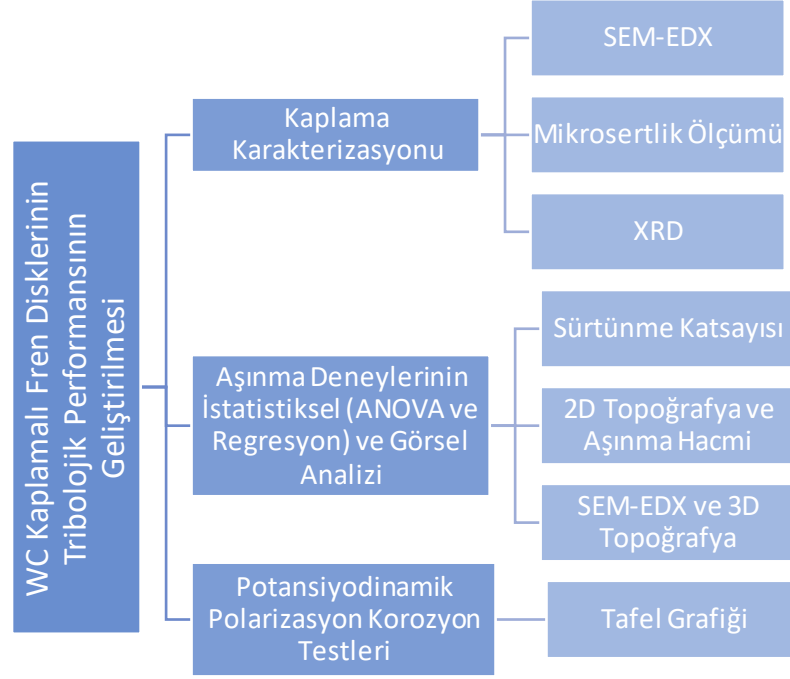
Kirli sarı renkli olan zirkonyum oksit kaplamalar yüksek sıcaklıklara dayanıklı kaplamalardır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olan zirkonyum oksit kaplamalı malzemeler uygulanan ısıl işlem sonrasında aşınmaya karşı daha dayanıklı hale gelmektedirler. ZrO<sub>2</sub> oksit kaplamalı metallerin yüzey pürüzlülükleri diğer yüzey kaplama malzemelerine nazaran daha yüksektir. Güzel'in yaptığı çalışmada zirkonyum kaplamalı metal parçasının ısıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü azalmıştır [52]. Zirkonyum oksit yüzey kaplama malzemesi boşluklu yapıya sahip olmasından dolayı aşınma direnci düşüktür. Fakat Güzel'in yapmış olduğu çalışmaya göre alüminyum oksit esaslı kaplamalar zirkonyum esaslı kaplamalara göre daha fazla boşluklu yapıya sahip olmasından dolayı özelliklerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir [52]. ZrO<sub>2</sub> esaslı kaplamalar genellikle termal sprey kaplama yöntemiyle malzemeye uygulanmaktadırlar. ZrO<sub>2</sub> esaslı kaplamaların mekanik dayanımları diğer kaplama malzemelerinden daha yüksektir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı kaplama malzemesidir. ZrO<sub>2</sub> esaslı kaplama yapılmış malzeme asidik kimyasal maddelere ve

cürufa karşı aşınma dirençleri yüksektir.  $ZrO_2$  kaplamalar erozif aşınmaya karşı direnci sebebiyle türbin kanatçıklarının kaplanmasıda kullanılmaktadırlar.

## BÖLÜM 5

### 4.3. ÇALIŞMA METODOLOJİSİ

Çalışma metalografik karakterizasyon, aşınma deneyleri ve korozyon deneyleri olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1). İlk aşamada, dökme demir esaslı fren diski tungsten karbür (WC) ile kaplanmıştır. Kaplama karakterizasyonu mikrosertlik ölçümü, SEM, EDX ve XRD görüntüleri ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, kaplamasız ve WC kaplamalı fren diski numuneleri kuru ve saf su koşullarında farklı yük ve hız parametrelerinde ball-on-plate aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Giriş parametrelerinin çıkış parametrelerine etki oranları ANOVA yöntemi ile belirlenmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiş, bu parametreler dikkate alınarak TOPSIS yöntemi ve S/N grafikleri ile optimizasyon yapılmıştır. Optimum, orta seviye ve en kötü deney koşullarında elde edilen SEM görüntüleri ile malzeme yüzeyinde meydana gelen aşınma mekanizmaları belirlenmiş, elemental analiz için EDX görüntüleri kullanılmıştır. Aşınma deneyleri sonrası yüzey formundaki değişiklikler 2D profilometre ve 3D topoğrafya görüntüleri ile analiz edilmiştir. WC kaplamanın dökme demir esaslı fren diskinin korozyon direncine etkisi, potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri ile test edilmiştir. Korozyon deneylerinden elde edilen sonuçlar, Tafel grafiği ve SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir.



Şekil 5.1. Çalışma için akış diyagramı

#### 4.4. WC-%12CO KAPLAMA

Çalışmada gri dökme demir malzemesiyle üretilen fren diskinin tribolojik performansı analiz edilmiştir. Gri dökme demir malzemesi döküm yöntemiyle üretiminin kolay olması, termal iletkenlik kabiliyeti, titreşim sönümleyebilme kabiliyetinin yüksek olması ve yüksek erime noktası sayesinde ulaşım sektöründe fren diski malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [5,6]. Yüksek termal iletkenlik özelliği sayesinde frenleme esnasında sürtünmeden kaynaklı meydana gelen ısı minimize edilebilmekte ve grafitlerin etkisiyle sürtünme arayüzeyinde yağlama etkisi oluşturulabilmektedir. Belirtilen avantajlarının yanı sıra aşınma ve korozyon direncinin alternatif fren diski malzemelerine (kompozit malzemeler) kıyasla daha düşük olması frenleme performansını ve fren diskinin servis ömrünü azaltmaktadır [29]. Bu durum göz önünde bulundurularak çalışmada, Çizelge 5.1’de kimyasal bileşimi verilen gri dökme demirden üretilmiş olan fren diski malzemesi, aşınma ve korozyon direncinin artırılması için tungsten karbür (WC) ile kaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Gri dökme demir malzemesinin kimyasal bileşimi.

Element	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Sn</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>
% Ağırlık	3,8	1,8	0,5	0,2	0,25	0,09	0,08	0,05	0,05	-

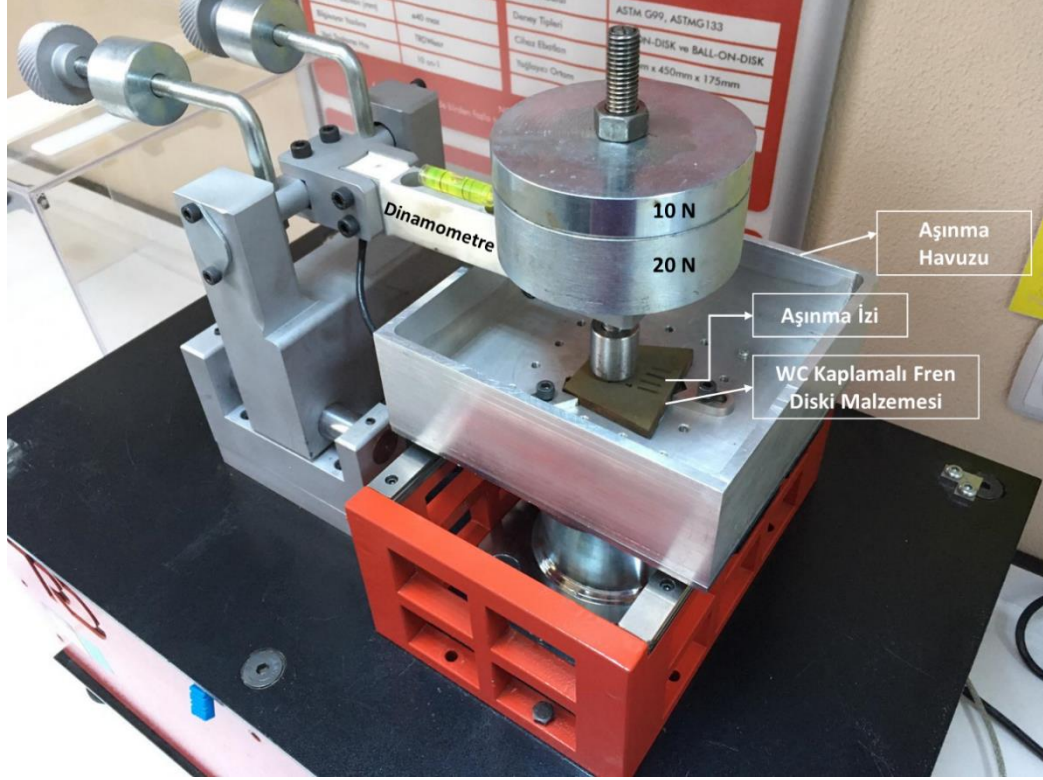
WC kaplamalar, malzemelerin mekanik ve tribolojik (sertlik, tokluk, aşınma ve korozyon direnci) özelliklerini önemli oranda iyileştirmektedir [26,29-58]. WC kaplamaların sağladığı avantajlar, yüksek sıcaklığın olduğu endüstriyel uygulamalardaki mekanik parçaların çalışma performansını ve kullanım ömrünü arttırmaktadır. Fren mekanizmalarında disk ile balatanın temas alanındaki basınç sebebiyle meydana gelen yüksek ısı disklerin aşınmasını hızlandırarak sistem verimini ve disklerin servis ömrünü azaltmaktadır. WC kaplamaların yüksek ısı uygulamalarındaki üstün performansı ve endüstrideki yaygın kullanımı dikkate alınarak çalışmada kaplama malzemesi olarak WC tercih edilmiştir [59]. WC kaplama prosesi için HVOF yöntemi kullanılmıştır. HVOF yönteminde yüksek basınç ve düşük sıcaklık ile kaplamanın gerçekleştirilmesi sayesinde dinamik mukavemet ve korozyon açısından uzun ömürlü kullanıma sahip malzemeler elde edilebilmektedir [60]. Kalıcı basma gerilmesi ve düşük gözeneklilik etkileri sebebiyle çalışma kapsamında HVOF yöntemi tercih edilmiştir [60,61]. %12 Co bağlayıcı malzeme ile gerçekleştirilen kaplama işlemi sonrası numuneler metalografik işlem için bakalite alınmış, kademeli olarak gerçekleştirilen zımparalama / parlatma işlemleriyle yüzeyler temizlenmiş ve nital çözeltisi (%5 konsantrasyon) ile dağlama yapılmıştır. Kaplama karakterizasyonu için mikrosertlik ölçümü, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile kaplama kalınlığı ölçümü, enerji dağılım spektroskopisi (EDX) ve x-ışınları difraktometresi (XRD) yöntemleri kullanılmıştır.

#### 4.5. AŞINMA DENEYLERİ

Aşınma deneyleri Şekil 5.2’de resmi verilen ball-on-plate aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Fren diski malzemesi olarak Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen gri dökme demir ve tungsten kaplamalı dökme demir malzemesi, aşındırıcı malzeme olarak ise Çizelge 5.2’de kimyasal bileşimi verilen 100Cr6 (AISI 52100) malzemesi kullanılmıştır. Deneyler kuru ve saf su koşullarında 20 N- 30 N yük ve 20 dev/dk. -50



dev/dk. hız parametreleri ile 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.3). Deney parametreleri literatür çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir [62-63].



Şekil 5.2. Ball-on-plate aşınma cihazı

Çizelge 5.2. AISI 52100 (100Cr6) malzemenin kimyasal bileşimi.

Element	C	Si	Mn	$P_{max}$	$S_{max}$	Cr	Mo
% Ağırlık	1,02	0,27	0,32	0,025	0,015	1,53	≤0,1

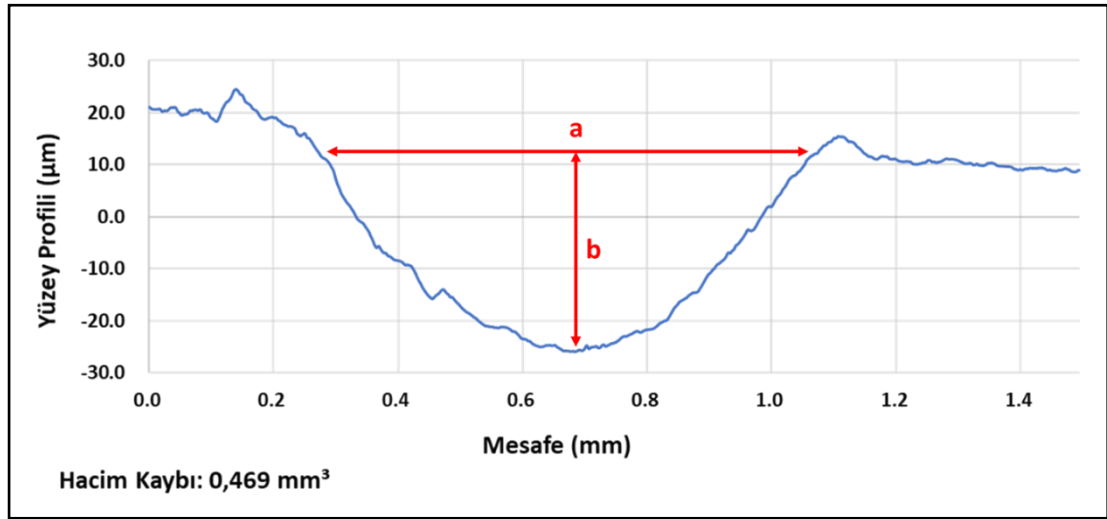
Çizelge 5.3. Deney parametreleri.

Parametre	Aşınma Ortamı	Yük (N)	Kayma Hızı (dev/dk)
Seviye 1	Kuru	20	20
Seviye 2	Saf Su	30	50

Aşınma cihazına entegre edilen dinamometre yardımıyla sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. 2D topoğrafya yöntemiyle aşınma bölgelerinden elde edilen yüzey

profili görüntüleri kullanılarak aşınma izinin genişlik (a) ve derinlik (b) değerleri, kumpas ölçümü ile de stroke mesafesi (c) belirlenmiştir (Şekil 5.3). Profil görüntüsü ve kumpas ölçümü ile elde edilen değerler kullanılarak Eşitlik 5.1’de verilen bağıntı ile aşınma hacmi değerleri hesaplanmıştır [64].

$$V = \frac{2}{3} \cdot a \cdot b \cdot c \quad (5.1)$$



Şekil 5.3. Aşınma izinin genişliği ve derinliği için dikkate alınan ölçüm metodolojisi

#### 5.4. İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ

Çalışmada sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin minimum değerlerini sağlayan giriş parametreleri TOPSIS ve Taguchi yöntemiyle (S/N analizi) belirlenmiştir. Çok kriterli karar verme yöntemleri alternatifler arasından optimum alternatifini belirlemek için kullanılan istatistiksel yöntemlerdir [65-66]. Hesaplama kolaylığı, tek analizle birden fazla çıkış parametresinin çözümüne olanak sağlaması, parametre sayısından bağımsız olarak hesaplama aşama sayısının aynı olması, sayısal verilerin yanı sıra nitel verilere de uygulanabilmesi, bilgisayar destekli çözüme uygun bir matematiksel model olması sebebiyle TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir [67-69]. Yöntem, optimum alternatife en yakın, negatif-ideal çözüme en uzak mesafeyi dikkate alarak çözümlenmektedir [70-72]. Bu sayede optimum ve en kötü alternatifler aynı anda belirlenebilmektedir [73]. Literatür çalışmaları

incelendiğinde TOPSIS yönteminin ulaştırma, lojistik, işletme, enerji yönetimi, tasarım ve imalat uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığı ve güvenilir sonuçlar elde edildiği görülmektedir [74–79]. Bu durum dikkate alınarak mevcut çalışmada çok kriterli karar verme yöntemi olarak TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir. En kötü, orta seviye ve optimum deney kombinasyonların belirlenmesi için TOPSIS yönteminin çözümlene adımları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir [80].

#### *Adım 1: Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması*

Farklı türdeki kriterlerin boyutsuz hale getirilerek kıyaslanabilmesi için normalizasyon işlemi yapılmaktadır [67]. Normalize karar matrisi vektörel normalizasyon yöntemi ile oluşturulmuştur [81]. Vektörel normalizasyon eşitliği Eq(5.2) bağıntısında verilmiştir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad i= 1, \dots, m; \quad j= 1, \dots, n \quad (5.2)$$

“ $x_{ij}$ ” i seçeneğinin j ölçütüne göre mevcut performansını göstermektedir. (“ $x_{ij}$ ” shows the current performance of option “i” according to criterion “j”.)

#### *Adım 2: Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması*

Çıkış parametrelerinin etki oranları prosese göre değişebilmektedir. Bu durum dikkate alınarak parametreler önem derecesine göre farklı oranlarda ağırlıklandırılabilir. Bu çalışmada sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin fren diskinin tribolojik performansına etkisi aynı seviyededir. Bu sebeple sürtünme katsayısı 0.33, aşınma hacmi 0.33, yüzey pürüzlülüğü 0,34 oranında ağırlıklandırılmıştır. Çıkış parametreleri için belirlenen etki oranları dikkate alınarak normalize edilmiş değerlerle parametrelerin etki oranları çarpılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi elde edilmiştir [81]. Ağırlıklandırılmış karar matrisinin elde edildiği bağıntı Eq (5.3)’de verilmiştir.

$$v_{ij} = w_{ij} \cdot r_{ij} \quad i= 1, \dots, m; \quad j= 1, \dots, n \quad (5.3)$$

Eq (5.3)'de “ $v_{ij}$ ” ağırlıklandırılmış karar matrisini, “ $r_{ij}$ ” normalizasyon değerini, “ $w_{ij}$ ” parametrenin ağırlık oranını ifade etmektedir.

*Adım 3: Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Elde Edilmesi*

Çıkış parametrelerinin amacına (olumlu veya olumsuz etki) göre her parametre için pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri elde edilir. Parametreler proses için olumlu etki ediyorsa pozitif ideal çözüm değerleri ağırlıklandırılmış karar matrisinin sütunlarındaki en büyük değerler, olumsuz etki ediyorsa negatif ideal çözüm değerleri ağırlıklandırılmış karar matrisinin sütunlarındaki en büyük değerlerdir [83]. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri Eq (5.4) ve Eq (5.5)' de verilen bağıntılar ile elde edilmektedir.

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} = \{(\max v_{ij} | j \in K_1), ((\min v_{ij} | j \in K_2) | i=1,2,\dots,m)\} \quad (5.4)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} = \{(\min v_{ij} | j \in K_1), ((\max v_{ij} | j \in K_2) | i=1,2,\dots,m)\} \quad (5.5.)$$

Eq (5.4) ve Eq (5.5)'da  $K_1$  fayda (olumlu) kriteri,  $K_2$  negatif (olumsuz) kriteri ifade etmektedir.

*Adım 4: Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerine Uzaklığın Belirlenmesi*

Daha güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için çıkış parametrelerinin pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerinden sapma uzaklığı Öklid yaklaşımıyla hesaplanmıştır [84]. Sapma uzaklıkları Eq (5.6) ve Eq (5.7)'de verilen bağıntılar ile elde edilmiştir.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i=1,2,\dots,m \quad (5.6)$$

$$S_i^- = \sqrt{(v_{ij}^- - v_j^-)^2} \quad i=1,2,\dots,m \quad (5.7)$$

Eq (5.6) ve Eq (5.7)'de verilen bağıntılarda  $S_i^+$  pozitif ideale olan sapma mesafesini,  $S_i^-$  negatif ideale olan sapma mesafesini ifade etmektedir.

#### *Adım 5: İdeal Çözüme Yakınlığın Hesaplanması*

Alternatiflerin ideal çözüme yakınlığı Eq (5.8)'de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$C_i = \frac{C_i^-}{C_i^+ + C_i^-} \quad i=1,2,\dots,m \quad 0 \leq C_i \leq 1 \quad (5.8)$$

$C_i=1$  alternatifin pozitif ideale yakın olduğunu,  $C_i=0$  alternatifin negatif ideale yakın olduğunu göstermektedir. Elde edilen “ $C_i$ ” değerleri büyükten küçüğe sıralanarak her bir alternatifin optimuma yakınlık derecesi belirlenebilmektedir [85].

TOPSIS ile elde edilen optimizasyon sonuçlarının güvenilirliğinin artırılması için Taguchi tabanlı S/N oranları analiz edilmiştir. “En küçük en iyi” yaklaşımına göre dikkate alınan S/N bağıntısı Eq (5.9)'da verilmiştir [86].

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \left( \sum_{k=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Eq} \quad (5.9)$$

Eq (5.9)'da “n” ölçüm sayısını, “ $y_i$ ” ölçümden elde edilen değeri ifade etmektedir. Verilerin istatistiksel analizi için varyans (ANOVA) ve regresyon analizleri kullanılmıştır. ANOVA ile giriş parametrelerinin çıkış parametresi üzerindeki etki oranları, regresyon analiziyle de istatistiksel anlamlılık test edilmiştir. ANOVA analizinde güvenilirlik için “p” değerinin 0,05 değerinden küçük olması gerekmektedir [87–89]. Analizler %95 güven aralığında yapılmıştır. Varyans analizinde birden fazla giriş parametresi incelendiği için R-Sq (adj) değeri dikkate alınmıştır. Regresyon analizinde normal dağılım ve histogram grafikleri analiz edilmiştir.

## 5.5.GÖRSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ

Sürtünmeye maruz kalan yüzeylerde meydana gelen aşınma mekanizmaları SEM (CARL ZEISS GEMINI FESEM) ile incelenmiş, elemental analizler için EDX görüntüleri dikkate alınmıştır. Yüzey formundaki değişimin nicel analizi için yüzey pürüzlüğü değerleri elde edilmiş, görsel analizi için 3D topoğrafya (Phase View Optical Profilometer) görüntüleri incelenmiştir.

## 5.6.KOROZYON DENEYİ

Fren diskleri nem ve yağmur suyuna maruz kalan parçalardır ve bu sebeple malzeme yüzeyinde oluşan oksit tabakası korozyona bağlı aşınma mekanizmasına sebebiyet vermektedir.

Bu durum fren diskinin tribolojik performansını etkileyen faktörlerden biri olup fren sisteminin verimini olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple disk yüzeyinde meydana gelebilecek korozyon mekanizması oluşumunun minimum seviyeye indirgenmesi büyük önem taşımaktadır. Korozyon mekanizmasının disk üzerindeki etkileri dikkate alınarak mevcut çalışmada WC kaplamanın fren diskinin korozyon direncine etkisi analiz edilmiştir. WC kaplamanın gri dökme demir malzemeden imal edilen fren diskinin korozyon performansına etkisi potansiyodinamik polarizasyon testleri ile test edilmiş ve anodik-katodik polarizasyon eğrileri Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi korozyon hızı ve korozyon potansiyelinin kısa sürede ve kolay şekilde analiz edilebilmesi, hassas korozyon hızlarının (çok düşük korozyon hızları) ölçümüne imkân sağlaması, korozyon hızlarının belirlenmesinde geleneksel ağırlık kaybı metodu sonuçlarına kıyasla daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi ve farklı korozyon sistemlerine uygulanabilirliği sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [89]. Bu sebeple mevcut çalışmada korozyon hızı ve korozyon potansiyelinin analizi için Tafel ekstrapolasyon yöntemi tercih edilmiştir.

Deneylerde çalışma elektrodu, referans elektrot ve yardımcı elektrodun bulunduğu üç elektrotlu elektrokimyasal sistem ve potansiyostat (Parstat 4000) kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak test edilmesi istenilen malzeme, referans elektrot ve yardımcı

elektrot olarak sırasıyla Ag/AgCl ve doymuş kalomel elektrot kullanılmıştır. Testler, oda sıcaklığı ve ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi ortam koşullarında, 1 mV/s tarama hızında,  $\pm 250$  mV potansiyel aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda Tafel polarizasyon diyagramı elde edilmiş, ek olarak korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri hesaplanmıştır.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

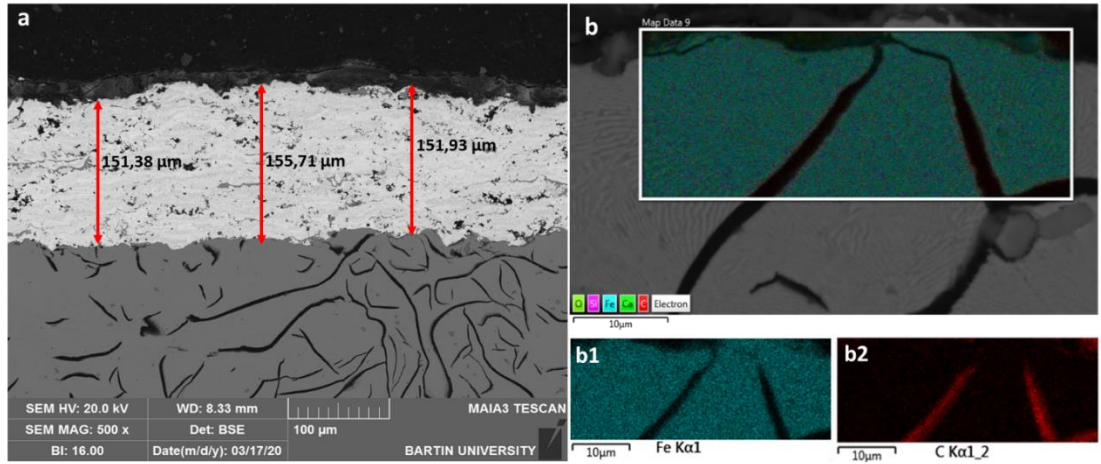
Lamel grafitli dökme demir malzemesine WC kaplama işlemi sonrasında metalografik ve mekanik karakterizasyon uygulanmıştır. Metalografik işlemde kalınlık, yapışma, homojen yüzey oluşumu faktörleri göz önünde bulundurularak kaplama stabilitesi belirlenmeye çalışılmıştır. Elemental analizler ile kaplama kalitesine ilişkin sonuçlar desteklenmeye çalışılmış ve literatür ile uyumluluk incelenmiştir. Sertlik ölçümü hem metalografik hem de mekanik karakterizasyon olarak değerlendirilebilir. Aşınma deneyleri ile kaplama tabakasının tribolojik performansı ölçülerek mekanik karakterizasyon tamamlanmıştır. İleri görüntüleme (SEM, 2D-3D morfoloji) ile mekanik performans sonuçları analiz edilmiştir. Korozyon deneyleri ile kaplamanın oksit tabakası oluşumuna karşı direnci incelenmiştir.

#### 6.1. WC KAPLAMANIN KARAKTERİZASYONU

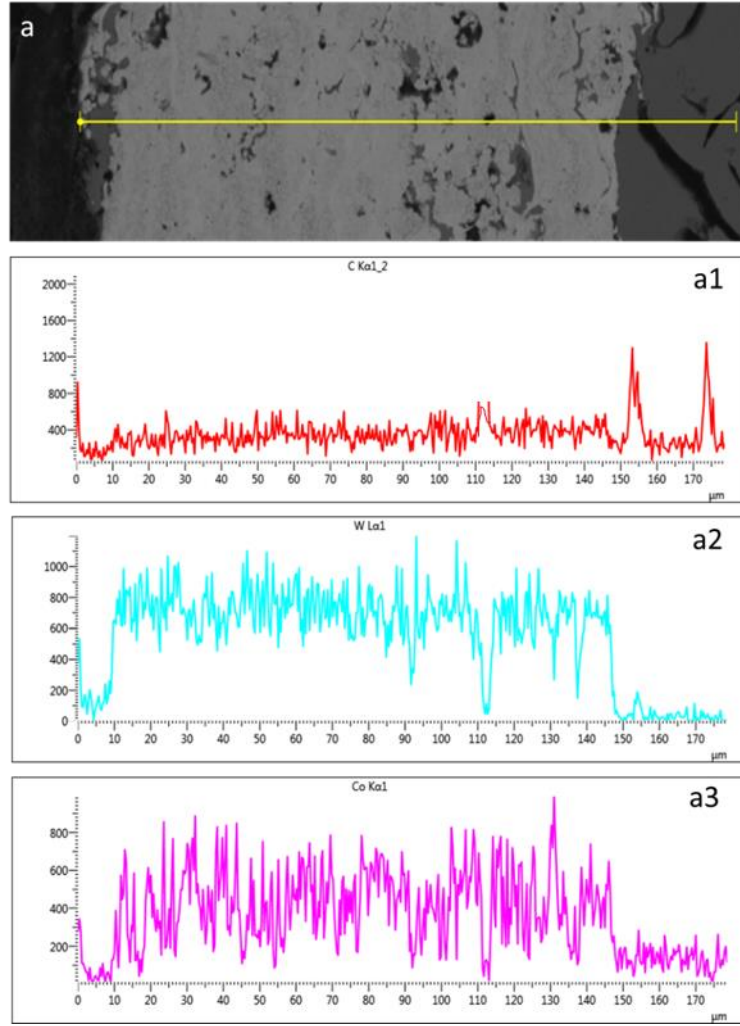
Lamel grafitli dökme demirler titreşim sönümlenme özelliklerinin yüksek olması, yüksek dayanımları ve yüksek tribolojik performansları (yağlama etkisi) sebebiyle fren malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Şekil 6.1.b'de matris malzeme olarak kullanılan dökme demir malzemesi (Şekil 6.1-b1) ve lamel yapılı grafitler görülmektedir. Lamel yapısı Şekil 6.1-b2'de haritalama yöntemi ile renklendirilerek verilmiştir. Lamellerin iç yapıda çizgisel olarak ilerleyerek dağılması titreşim kaynaklı kuvvet akışı esnasında engeller oluşturarak titreşim şiddetinin azaltılmasını ve kuvvetlerin sönümlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca çizgisel grafit yapısı sayesinde malzeme yüzeyinde homojen ve sürekli bir yağlayıcı filmi tabakası oluşturulabilmektedir. Kararlı yapıya sahip film tabakası sayesinde sürtünme katsayısı değerindeki değişkenliğin minimum seviyede olacağı ve yüzeyin morfolojik açıdan düzenli bir aşınma oluşumuna maruz kalacağı iddia edilebilir. Yüzey aşınmasını geciktirmek için uygulanan WC kaplama işlemiyle oluşan morfolojik yapı Şekil 6.1.a ve 6.2.a'da verilmiştir.



Şekil 6.1.a’da verilen SEM görüntüsüne göre kesit boyunca ortalama 153  $\mu\text{m}$  WC kaplama tabakası olduğu görülmektedir.  $\sim 1 \mu\text{m}$  standart sapma değeri ile kaplama kalınlığı değişiminin olduğu söylenebilir. Kaplama kalınlığı ve sapma değerlerinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir [91–93]. SEM görüntülerine göre kaplama sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü ile matris malzemenin yüzey pürüzlülük yapısının benzer olduğu ve bu sebeple kaplama işlemi kaynaklı yüzey kalitesinde azalma olmadığı söylenebilir. Şekil 6.2.a’da verilen çizgi EDX analiz görüntüsüne göre karbon (Şekil 6.2-a1), volfram (Şekil 6.2-a2) ve kobalt (Şekil 6.2-a3) elementlerinin kaplama kalınlığı boyunca homojen dağıldığı görülmektedir. Karbon ve volfram elementlerinin dağılımı esnasında oluşan aşırı yüksek veya aşırı düşük pikler kaplama esnasında oluşan boşluk ve ara yer atomu kaynaklı malzeme kusurları ile ifade edilebilir. Fakat düzensiz piklerin ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir.



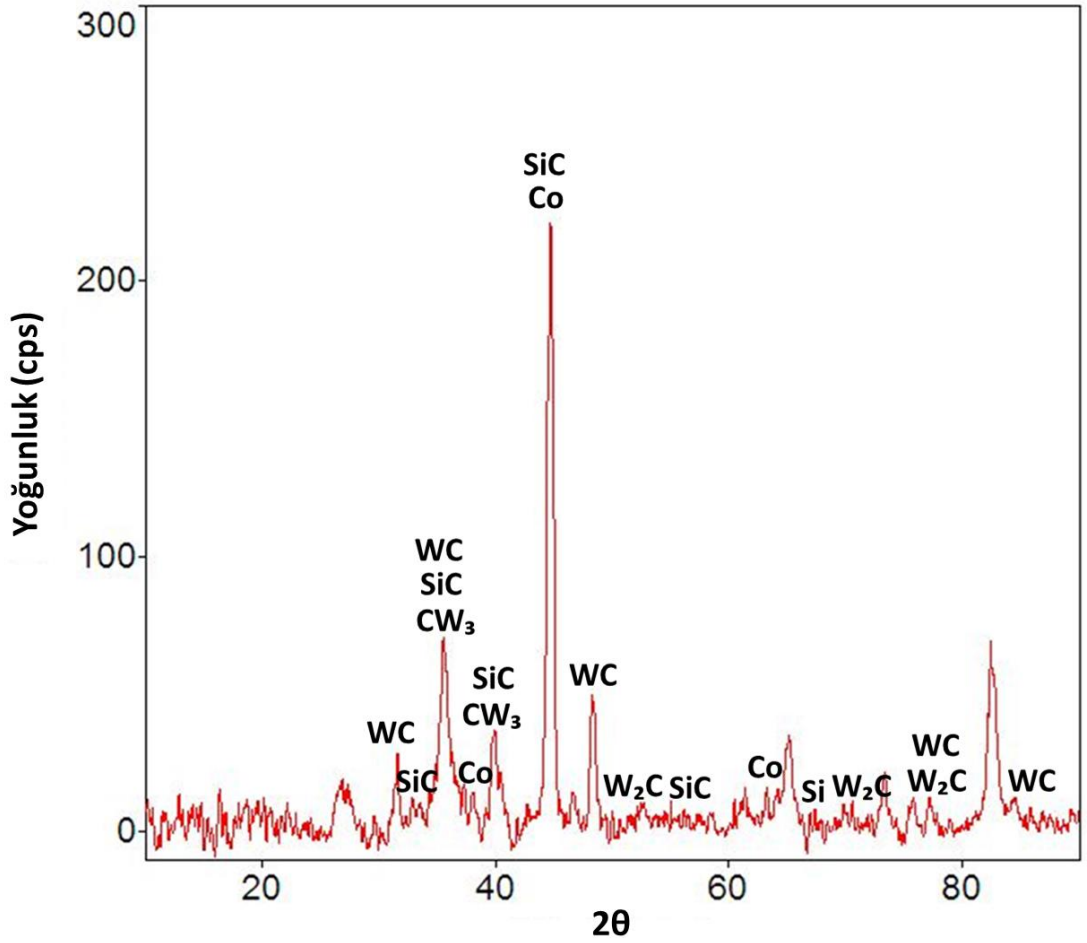
Şekil 6.1. WC kaplama tabakası kesit görünümü



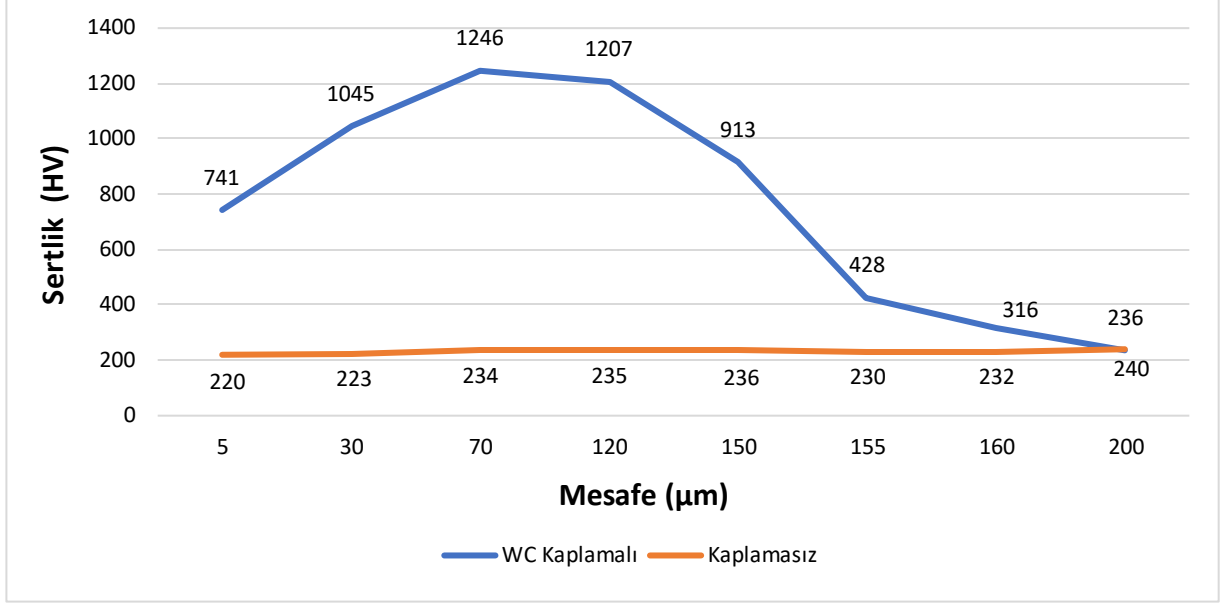
Şekil 6.2. Kaplama tabakası için EDX çizgi analizi

Kaplama tabakasına uygulanan XRD analizinden elde edilen grafik Şekil 6.3'te verilmiştir. XRD sonuçlarına göre WC, W<sub>2</sub>C ve SiC alaşımlarının kaplama tabakasında yoğun konsantrasyonlarda mevcut olduğu görülmektedir. Kaplama tabakasında, ara faz niteliğinde iyonik bağlı üç farklı karbür oluşumu meydana gelmiştir. İyonik bağlı bileşiklerde ~350 kcal/mol atomlar arası bağ enerjisi bulunmaktadır. Diğer bağ yapılarına göre yüksek enerjiye sahip olması nedeniyle iyonik bağlı bileşiklerde yüksek sertlik oluşumu beklenen bir özelliktir. Şekil 6.4'te verilen sertlik grafiği bu yaklaşımı doğrular niteliktedir. WC kaplanmış yüzeyde maksimum 1250 HV değerine ulaşılmıştır. Demir esaslı metallerde ulaşılabilecek maksimum sertlik seviyesi ~750 HV değeridir. Kır dökme demirde ise genellikle 300 HV değerinde sertlik oluşmaktadır. Bu sebeple, kaplama tabakası sayesinde yüzeyde oluşan sertlik, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından dikkat çekici seviyededir.

Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur [94-96]. Ayrıca Şekil 6.4'de sertlik değerinin kaplama tabakası boyunca en dış yüzeyden içeri doğru önce arttığı, maksimum bir değerden sonra ise matris malzemeye doğru azaldığı görülmektedir. Bu durum  $W_2C$  ve WC fazlarının varlığı ile açıklanabilir. Matris malzeme üzerinde dekarbürizasyon etkisine bağlı olarak öncelikle sert  $W_2C$  ara fazı oluşmuş, dekarbürizasyon etkisinin azalmasıyla da daha yumuşak WC ara fazı oluşumu gerçekleşmiştir. Sertlik dağılım grafiği literatürle uyumludur [91].



Şekil 6.3. Kaplama tabakası için XRD grafiği



Şekil 6.4. Sertlik (HV) dağılımı

## 6.2. PARAMETRE OPTİMİZASYONU

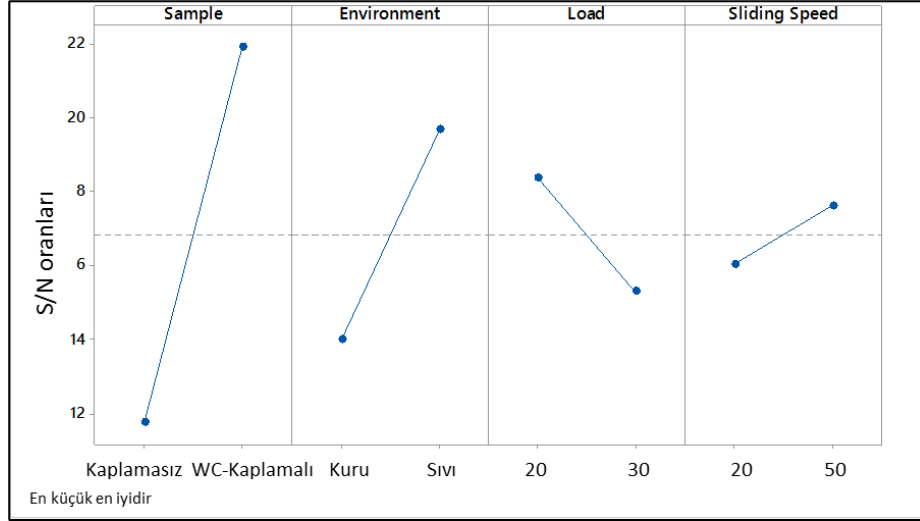
Sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin minimum değerlerin elde edildiği (optimum), orta seviyeli ve en kötü deney kombinasyonları TOPSIS yöntemi ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1’te verilmiştir. Çizelge 6.1’e göre 14. deney kombinasyonu (WC kaplamalı, saf su ortamı, 20 N yük, 50 dev/dk hız) optimum, 7. deney kombinasyonu (WC kaplamalı, kuru ortam, 30N yük, 20 dev/dk hız) orta seviye ve 3. deney kombinasyonu (kaplamasız, kuru ortam, 30N yük, 20 dev/dk hız) en kötü deney kombinasyonu olarak elde edilmiştir. En kötü ve orta seviyeli deney kombinasyonları kıyaslandığında tek değişkenin kaplama parametresi olduğu görülmektedir. En kötü deney koşulunda numunenin kaplamasız olmasının çıkış parametrelerini olumsuz etkilediği görülmektedir. Bu durum WC kaplamanın tribolojik performansa olumlu etkisini göstermektedir. Optimum ve orta seviyeli deney koşulları kıyaslandığında ise saf su ortamının sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini azalttığı görülmektedir. İlaveten daha düşük yük ve daha yüksek hız koşulunda optimum çıkış parametrelerinin elde edildiği belirlenmiştir. Saf su ortamı ve düşük yük, aşındırıcı malzemenin hareketini kolaylaştırmakta ve bu durum fren diski malzemesine daha az basınç etki etmesini sağlamaktadır. Bu sayede fren diski malzemesi-aşındırıcı malzeme arasındaki sürtünme azalmakta ve fren diski daha az deforme olmaktadır.

Bu sebeple WC kaplamamın koruyucu etkisinin yanı sıra saf su ve düşük yük koşullarının optimum koşulların elde edilmesine katkı sağladığı öngörülmektedir.

Çizelge 6.1. TOPSIS optimizasyon tablosu.

Deney No	$S_i^+$	$S_i^-$	$C_i$	Rank
1	0,17955	0,11315	0,38656	14
2	0,15557	0,13903	0,47192	13
<b>3</b>	<b>0,28268</b>	<b>0,00000</b>	<b>0,00000</b>	<b>16</b>
4	0,22178	0,06530	0,22747	15
5	0,05575	0,22713	0,80292	6
6	0,04036	0,24592	0,85903	5
<b>7</b>	<b>0,08641</b>	<b>0,19920</b>	<b>0,69746</b>	<b>8</b>
8	0,07235	0,21094	0,74461	7
9	0,11072	0,17792	0,61641	10
10	0,09518	0,19741	0,67471	9
11	0,12923	0,16016	0,55345	12
12	0,12284	0,16592	0,57461	11
13	0,01134	0,27288	0,96010	2
<b>14</b>	<b>0,00000</b>	<b>0,28268</b>	<b>1,00000</b>	<b>1</b>
15	0,03572	0,25057	0,87523	4
16	0,02078	0,26354	0,92691	3

TOPSIS ile elde edilen optimizasyon sonuçlarının doğruluğunun teyit edilmesi amacıyla Taguchi'nin S/N metodu ile optimum parametreler belirlenmiş ve analiz sonuçları Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekil 6.5'e göre çıkış parametrelerinin optimizasyonu saf su ortamında, 20 N yük ve 50 dev/dk hız parametrelerinde WC kaplamalı malzeme kullanımıyla elde edilmektedir. En kötü koşullar ise kuru ortamda, 30 N yük ve 20 dev/dk hız parametrelerinde, kaplamasız numune kullanımı sonucu meydana gelmektedir. Analiz sonuçları TOPSIS sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 6.5. Taguchi analizine göre optimum sonuç grafiği

### 6.3. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL VE GÖRSEL ANALİZİ

#### 6.3.1. Sürtünme Katsayısı

Fren mekanizmasının temel görevini sağlaması için en önemli etken sürtünme katsayısıdır. Fren pedalına uygulanan kuvvet balataları sıkıştırarak disk-balata arasında basınç oluşturmaktadır. Bu sayede hareket halindeki aracın kinetik enerjisi mekanik enerji formuna dönüşmektedir. Disk-balata arasında oluşan basınç sürtünme katsayısını artırarak frenleme momentini arttırmaktadır [97]. Oluşan frenleme momenti tekerleklerin yavaşlamasını ve durmasını sağlamaktadır. Frenleme performansı için gerekli asgari sürtünme katsayısının yanı sıra aşınmanın ve gürültünün azaltılması için sürtünme katsayısının minimize edilmesi gereklidir. Bu sebeple çalışmada WC kaplamanın gri dökme demirden imal edilen fren diskinin tribolojik performansına etkisi analiz edilmiştir.

#### 6.3.1.1. Kuru ve sıvı koşullarda elde edilen sürtünme katsayısı için ANOVA

Çalışmada WC kaplama, yük ve hız parametrelerinin kuru ve saf su ortamlarında sürtünme katsayısına etki oranları ANOVA ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'e göre

numune türünün (WC kaplamalı-kaplamasız) kuru (84,64) ve saf su ortamında (94,5) sürtünme katsayısı üzerinde en etkili parametrenin olduğu belirlenmiştir.

Bu durum WC kaplamanın malzeme sertliğini arttırması ile açıklanabilir. Kaplamasız fren diski malzemesinin sertliği ortalama 230 HV iken WC ile kaplanmış olan numunelerin sertliği ortalama 760 HV değerine kadar artış göstermektedir (Şekil 6.4). Sertlik artışıyla fren diski malzemesinin plastik şekil değiştirme direnci artmaktadır ve bu durum aşındırıcı malzemenin hareketini kolaylaştırmaktadır. Bu sayede kaplamanın varlığının sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı öngörülmektedir. Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'e göre yük parametresinin sürtünme katsayısını kuru ve saf su ortamında sırasıyla %9,60 ve %3,80 oranında etkilediği görülmektedir. Yük arttıkça aşındırıcı malzemeye etki eden kuvvet arttığı için fren diski malzemesine etki eden basınç artmaktadır. Basıncın artması temas derinliğini arttırdığı için aşındırıcı malzemenin hareket kolaylığı azalmakta ve sürtünme katsayısı artmaktadır. Kayma hızının sürtünme katsayısını kuru ve saf su ortamında sırasıyla %2,98 ve %0,81 oranında etkilediği görülmektedir. Kayma hızı için elde edilen etki oranları ihmal edilebilir seviyededir. Giriş parametrelerinin çıkış parametreleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi için "p" değerinin 0.05 değerinden düşük olması gerekmektedir [98]. Numune türü, yük ve kayma hızı parametrelerinin "p" değerleri incelendiğinde numune türü ve yük parametrelerinin "p" değerlerinin 0,05'ten düşük olduğu fakat hız parametresinin 0,05'ten yüksek olduğu görülmektedir. Elde edilen "p" değerleri hız parametresinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını ve ihmal edilebilir seviyede etkili olduğunu destekler niteliktedir.

Giriş parametrelerinin sürtünme katsayısına etkisine ek olarak belirlenen parametrelerin proses için anlamlılığı ANOVA ile elde edilen R-Sq(adj) değerleri ile analiz edilmiştir. Giriş parametrelerinin çıkış parametrelerini açıklayabilme kabiliyeti R-Sq(adj) değeri ile belirlenmekte ve bu değer %80 değerinden yüksek olması beklenmektedir [99,100]. Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'e göre kuru ve saf su ortamları için R-Sq(adj) değerleri sırasıyla %95,14 ve %98,45 olarak elde edilmiştir. Elde edilen R-Sq(adj) değerleri sürtünme katsayısının analizi için uygun parametrelerin seçildiğini göstermektedir.

Çizelge 6.2. Sürtünme katsayısı için ANOVA- kuru koşullar.

	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı ( $\alpha=5\%$ )	P Değeri	Etki Oranı (%)
Numune	1	0,066357	0,066357	121,97	0,000	<b>84,64</b>
Yük	1	0,007528	0,007528	13,84	0,020	<b>9,60</b>
Kayma Hızı	1	0,002339	0,002339	4,30	0,107	<b>2,98</b>
Hata	4	0,002176	0,000544			<b>2,78</b>
Toplam	7	0,078400				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-Sq = %97,22</b>			<b>R-Sq (adj) = %95,14</b>		

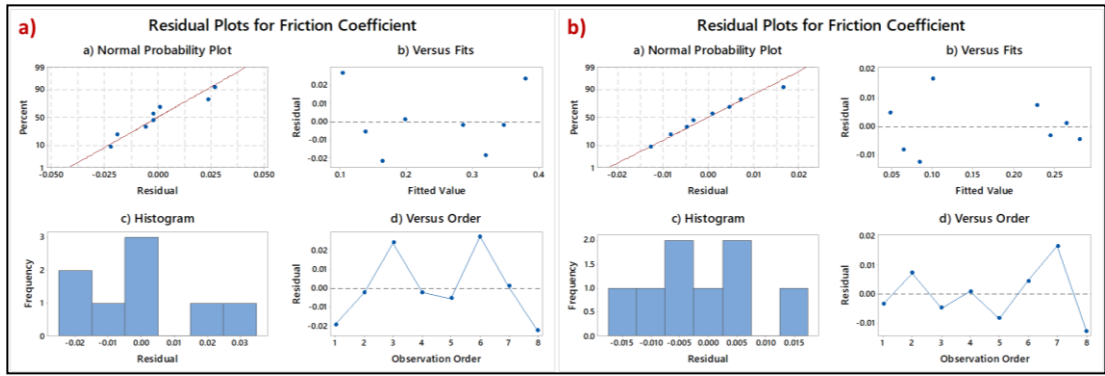
Çizelge 6.3. Sürtünme katsayısı için ANOVA- ıslak koşullar.

	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı ( $\alpha=5\%$ )	P Değeri	Etki Oranı (%)
Numune	1	0,065016	0,065016	427,05	0,000	<b>94,5</b>
Yük	1	0,002606	0,002606	17,12	0,014	<b>3,80</b>
Kayma Hızı	1	0,000554	0,000554	3,64	0,129	<b>0,81</b>
Hata	4	0,000609	0,000152			<b>0,89</b>
Toplam	7	0,068786				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-Sq = %99,11</b>			<b>R-Sq (adj) = %98,45</b>		

Numune türü (WC kaplamalı-kaplamasız), yük ve hız parametrelerinin sürtünme katsayısı ile arasındaki ilişkiyi incelemek için regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon modeliyle elde edilen değerler ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen değerlerin uyumluluğunu değerlendirmek için saçılım grafikleri ve histogram grafiği elde edilmiştir. Kuru (Şekil 6.6-a) ve saf su ortamı (Şekil 6.6-b) için elde edilen grafikler Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 6.6'a göre normal olasılık grafikleri incelendiğinde kuru ve saf su ortamında giriş parametreleri ile sürtünme katsayısı arasında pozitif korelasyon olduğu görülmektedir. Verilerin lineer doğru çevresinde yoğunlaşmış olması da verilerin anlamlılığını desteklemektedir. Dağılım grafiklerinde verilerin genel itibarıyla "0" çizgisine yakın olduğu görülmektedir. Grafiklerde birkaç aykırı değer de mevcuttur.



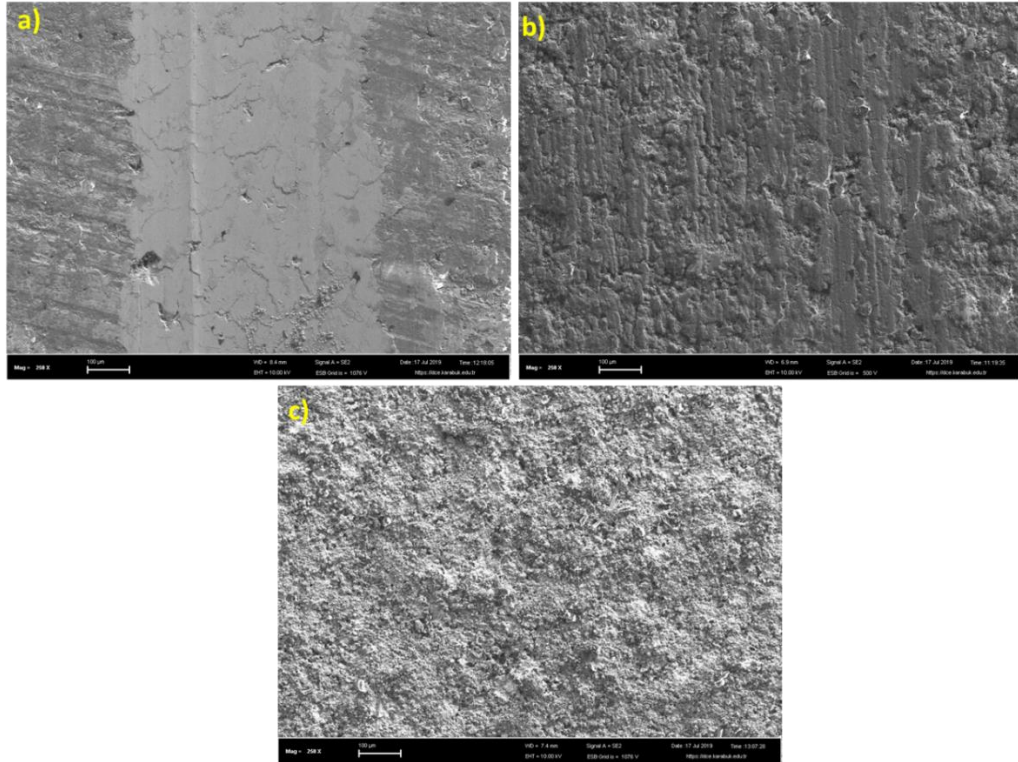
Bu aykırı değerlerin aşınma cihazının titreşimi, ortam sıcaklığı vb. nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aykırı değer sayısının az olması sebebiyle verilerin regresyondan elde edilen modele uyumlu olduğu sonucuna varılmaktadır. Normal olasılık grafiği ve dağılım grafiklerine ek olarak veri dağılımları sütun grafiği şeklinde oluşturularak histogram grafikleri elde edilmiştir. Histogram grafiklerinde eğrinin simetrik olduğu (çan eğrisi şekli) görülmektedir. Bu durum verilerin normal dağılıma uygun olduğunu ve homojen dağıldığını göstermektedir [101].



Şekil 6.6. Sürtünme katsayısı verilerinin a) kuru ve b) saf su ortamında normal dağılım grafikleri

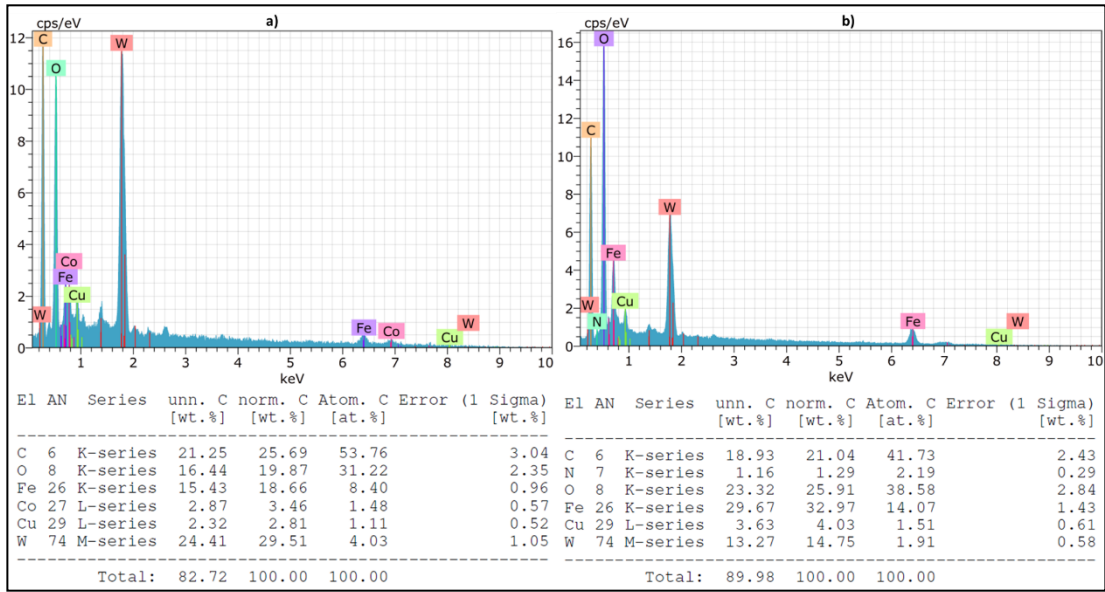
Frenleme esnasında disk-balata arasındaki sürtünme sebebiyle meydana gelen ısı, disk malzemesinin yüzey deformasyonunun temel sebeplerinden biridir [60]. Bu sebeple istatistiksel analizlerle belirlenen optimum, orta seviye ve en kötü deney koşullarında malzeme yüzeylerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarının incelenmesi için SEM görüntüleri elde edilmiş ve Şekil 6.7’de verilmiştir. Şekil 6.7’a göre kaplamasız malzeme yüzeyinin kuru ortam ve 30 N yükün etkisiyle (Şekil 6.7-a) malzeme yüzeyinin büyük oranda deformasyona uğradığı görülmektedir. Malzemenin kaplamasız olması sebebiyle aşınma dayanımının düşük olmasının yanı sıra 30 N yük ve kuru ortam koşulunda sürtünme katsayısının yüksek olması sebebiyle disk malzemesi ve aşındırıcı arasında oluşan ısı malzemelerin yapışmasına sebebiyet vermektedir. Doğrusal hareketin sürekliliği dolayısıyla yapışan malzeme disk malzemesinden parçacıkların kopmasına neden olmakta ve yüzeyde boşluklar oluşturarak malzeme yüzeyinde adhesiv aşınma mekanizmasını meydana getirmektedir. Literatürde çelikten imal edilen aşındırıcı malzeme ile grafit içeren dökme demir malzemesi arasında sürtünme mekanizması oluştuğunda grafit miktarı

artıkça sürtünme katsayısı arttığı belirtilmiştir [6]. Dolayısıyla mevcut çalışmada yüksek oranda grafit içeren gri dökme demirin adhesiv aşınma mekanizması oluşacak seviyede deforme olması literatürle uyumluluk göstermektedir. Orta seviye olarak belirlenen deney koşulunda aşınmaya maruz kalan yüzey görüntüsü Şekil 6.7-b'de verilmiştir. Orta seviye deney kombinasyonu ile en kötü deney koşulları arasındaki tek fark orta seviye deney koşullarında malzemenin WC kaplamalı olmasıdır. Şekil 6.7-b'de Şekil 6.7-a'ya göre adhesiv aşınma mekanizmasının daha yüzeysel olduğu ve buna bağlı olarak yüzeyin daha az deforme olduğu görülmektedir. Bu durum WC kaplamanın aşınma mekanizması oluşumunun azaltılmasındaki önemini göstermektedir. WC kaplamalı malzemenin saf su ortamı, 20 N yük ve 50 dev/dk hız koşullarında (Şekil 6.7-c-optimum koşul) yapılan deney sonucunda elde edilen yüzey görüntüsü incelendiğinde yüzey deformasyonunun minimum seviyede olduğu görülmektedir. Şekil 6.7-c'de kaplama etkisine ek olarak saf su kullanımı ve yükün azaltılması sonucu aşındırıcı malzemenin kaplama malzemesi engelini aşamayarak matris malzemeye etki edemediği iddia edilebilir. Belirtilen deney koşullarının malzemenin aşınma direncini arttırmış olması sebebiyle yüzeyde iki cisimli abrasiv aşınma mekanizması (yüzeysel abrasiv aşınma) meydana gelmiştir.



Şekil 6.7. Optimum koşullar için SEM resimleri, a) en kötü, b) orta seviye, c) en iyi.

Optimum ve orta seviye koşullarda WC kaplamalı malzemelere deney yapıldıktan sonra elemental analiz yapılmış ve analiz sonucunda elde edilen EDX görüntüleri Şekil 6.8’de verilmiştir. Şekil 6.8 incelendiğinde her iki görüntüde de tungsten elementinin yüksek oranda olduğu görülmektedir. Bu durum kobalt elementinin bağlayıcılığının ve WC kaplamanın matris malzemeye penetrasyon (yapışma) kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir. Orta seviye koşulunda elde edilen EDX görüntüsünde optimum koşula nazaran tungsten elementi oranının daha az miktarda olduğu görülmektedir. Orta seviye deney koşulunda deneyin kuru ortamda ve optimum koşula göre daha ağır yük koşullarında gerçekleştirilmesi sebebiyle, aşındırıcı malzemenin kaplama tabakasını bölgesel olarak deforme ettiği ve bu sebeple tungsten elementi oranının azaldığı öngörülmektedir. Bu durum Şekil 6.7-b ve Şekil 6.7-c’de verilen SEM görüntülerini destekler niteliktedir.



Şekil 6.8. Aşınma sonrası EDX analizleri a) kuru ortam, b) sıvı ortam.

### 6.3.2. Aşınma Hacmi

Fren sistemini etkileyen önemli faktörlerden biri de partikül madde emisyonudur [102]. Partikül madde emisyonu solunum hastalıklarına sebebiyet vererek insan sağlığına zarar vermesinin yanı sıra hava kirliliğini de arttırarak uzun vadede ekolojik dengeyi olumsuz etkileyen faktörlerden biridir [103,104]. Ayrıca fren sistemindeki parçalarının çalışma performansını olumsuz etkilemekte ve daha hızlı deforme

olmalarını neden olarak servis ömürlerini kısaltmaktadır. Partikül emisyonlarının endüstriyel, biyolojik ve çevresel olarak olumsuz etkileri göz önüne alınarak gerçekleştirilen literatür çalışmalarında fren aşınmalarından kaynaklanan partikül madde emisyonlarının toplam emisyona etkisinin %21 olduğu belirlenmiştir [105,106]. Fren disklerinden kopan partiküller sebebiyle oluşan partikül madde emisyonunun yarısı havaya, yarısı ise yol yüzeyinde birikerek tekrar araç içerisine çekilmektedir [107,108]. Kısa vadede düşük bir oran gibi görülen %21 oranı, partikül emisyonunun sirkülasyonu sebebiyle uzun vadede çevresel ve endüstriyel açıdan büyük zararlar vermektedir. Bu sebeple fren disklerinde meydana gelen aşınmanın azaltılması ve aşınmadan kaynaklı kopan partiküllerin minimizasyonu önem taşımaktadır.

Partikül emisyonunun olumsuz etkileri dikkate alınarak mevcut çalışmada fren diskinin aşınmasından kaynaklı oluşan aşınma hacimleri analiz edilmiştir.

#### **6.3.2.1.Kuru ve sıvı koşullarda elde edilen hacim kaybı için ANOVA**

Fren diski aşınmasının azaltılması için aşınmaya etki eden parametrelerin etki oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Numune türü (WC kaplamalı- kaplamasız), yük ve hız parametrelerinin fren diskinin aşınma hacmine etkisi ANOVA ile analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4'te verilmiştir. Çizelge 6.4'e göre aşınma hacmi üzerinde en etkili parametrenin numune türü (%91,03) olduğu görülmektedir. WC kaplamanın malzemenin sertliğini ve aşınma direncini arttırması sayesinde azalan sürtünme katsayısıyla birlikte fren diskinin aşınma hacmi azalmaktadır. Aşınma hacmi için etkili parametrelerden biri de yük (%5,54) faktörüdür. Yükün azalması ile fren diski malzemesi aşındırıcı malzemeye karşı daha dirençli hale gelerek daha az deforme olmaktadır. Numune türü ve yük parametrelerinin p değerlerinin 0,05'ten düşük olması aşınma hacmi açısından anlamlı parametreler olduklarını göstermektedir. Saf su koşulları için de benzer durum söz konusudur (Çizelge 6.5). Çizelge 6.5'te verilen analiz sonuçlarına göre numune türü, yük ve hız parametrelerinin etki oranları sırasıyla %97,18, %1,65 ve %0,66 olarak belirlenmiştir. Kuru ortama kıyasla saf su ortamında yük parametresinin etki oranının azaldığı görülmektedir. Saf su ortamında yüzeyde

oluşan tribofilm tabakası nedeniyle aşındırıcı ile fren diski malzemesinin temas alanında yarı-sıvı sürtünme oluşmaktadır.

Kuru ortama kıyasla daha düşük sürtünme katsayısının oluşması ve tribofilm tabakası sayesinde fren diski malzemesine etki eden yükün etkisi azalmaktadır. Kuru ( $p = 0,078 > 0,05$ ) ve saf su ( $p = 0,086 > 0,05$ ) ortamda kayma hızının etkisinin aşınma hacmi açısından istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Belirlenen giriş parametrelerinin aşınma hacmini açıklayabilme yeteneğinin değerlendirilebilmesi için R-Sq(adj) değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre kuru ve saf su ortamında elde edilen R-Sq(adj) değerleri sırasıyla %97,48 ve %99,11 olarak belirlenmiştir. Bu durum belirlenen parametrelerin aşınma hacmini açıklayabilme yeteneğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

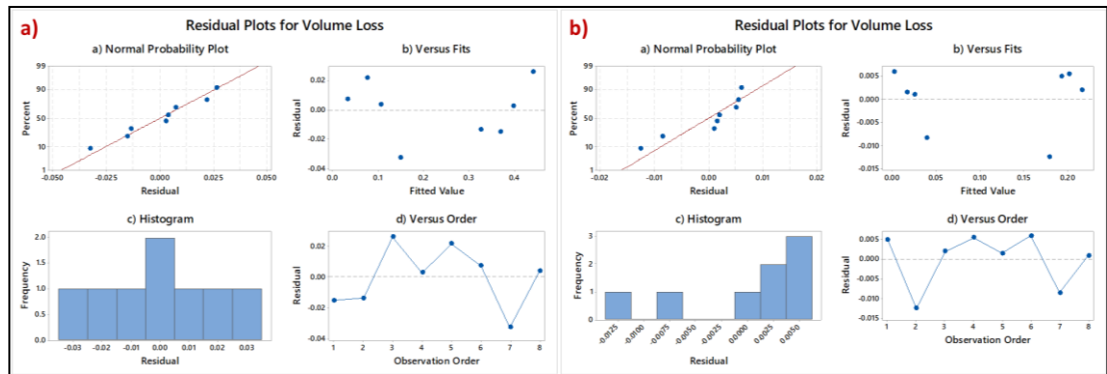
Çizelge 6.4. Hacim kaybı için ANOVA- kuru koşullar.

	<b>Serbestlik Derecesi (DF)</b>	<b>Kareler Toplamı (SS)</b>	<b>Kareler Ortalaması (MS)</b>	<b>F Oranı (<math>\alpha</math>=%5)</b>	<b>P Değeri</b>	<b>Etki Oranı (%)</b>
Numune	1	0,172872	0,172872	253,25	0,000	<b>91,03</b>
Yük	1	0,010513	0,010513	15,40	0,017	<b>5,54</b>
Kayma Hızı	1	0,003784	0,003784	5,54	0,078	<b>1,99</b>
Hata	4	0,002730	0,000683			<b>1,44</b>
Toplam	7	0,189899				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-Sq = %98,56</b>			<b>R-Sq (adj) = %97,48</b>		

Çizelge 6.5. Hacim kaybı için ANOVA-ıslak koşullar.

	<b>Serbestlik Derecesi (DF)</b>	<b>Kareler Toplamı (SS)</b>	<b>Kareler Ortalaması (MS)</b>	<b>F Oranı (<math>\alpha</math>=%5)</b>	<b>P Değeri</b>	<b>Etki Oranı (%)</b>
Numune	1	0,062305	0,062305	762,13	0,000	<b>97,18</b>
Yük	1	0,001058	0,001058	12,94	0,023	<b>1,65</b>
Kayma Hızı	1	0,000421	0,000421	5,14	0,086	<b>0,66</b>
Hata	4	0,000327	0,000082			<b>0,51</b>
Toplam	7	0,064110				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-Sq = %99,49</b>			<b>R-Sq (adj) = %99,11</b>		

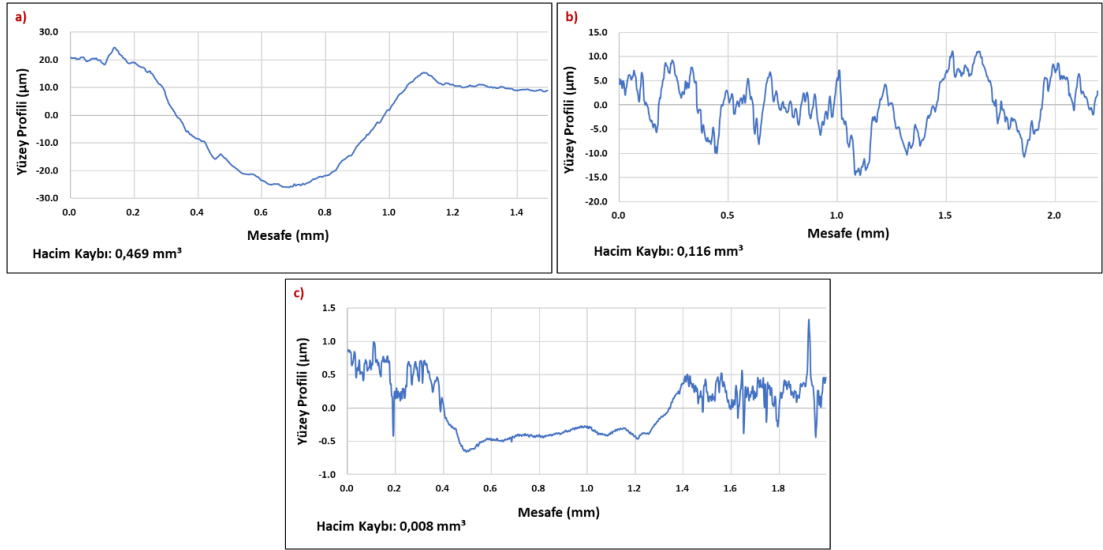
ANOVA ile elde edilen R-Sq(adj) değerinin güvenilirliğinin doğrulanması için çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Çoklu regresyon analiziyle elde edilen model ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin belirlendiği grafikler Şekil 6.9’da verilmiştir. Şekil 6.9’a göre normal olasılık grafiklerinde kuru ve saf su ortam koşulunda giriş parametreleri ile aşınma hacmi arasında pozitif korelasyon olduğu görülmektedir. Fakat saf su ortamında gerçekleştirilen deneylerde lineer doğru ile veriler arasındaki sapma miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Dağılım grafikleri de normal olasılık grafiklerini destekler niteliktedir. Saf su koşullarında “0” çizgisinden sapma miktarı fazla olan veri sayısı kuru koşullardaki sapma miktarı fazla olan veri sayısına kıyasla daha fazladır. Veri dağılımının analizi için elde edilen histogram grafikleri incelendiğinde kuru ortamdaki deneysel verilerin homojen dağıldığı ve normal dağılım eğrisine uygun olduğu görülmektedir. Saf su ortamında elde edilen deneysel verilerin histogram grafiğinin sağa yatık davranış sergilediği görülmektedir. Saf su ortamında verilerin normal dağılıma uygun olmaması normal olasılık grafiği ve dağılım grafiklerinden elde edilen sonuçlar ile uyumluluk göstermektedir.



Şekil 6.9. Hacim kaybı verilerinin a) kuru ve b) saf su ortamında normal dağılım grafikleri

Giriş parametrelerinin aşınma hacmine etkisinin görsel analizi için istatistiksel analizlerle belirlenmiş olan en kötü, orta seviye ve optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonrasında numunelerin aşınma bölgesinden 2D topoğrafya görüntüleri elde edilmiş ve görüntüler Şekil 6.10’da verilmiştir. Şekil 6.10’a göre orta seviye deney koşullarında (Şekil 6.10-b) en kötü deney koşullarına (Şekil 6.10-a) kıyasla aşınma hacminin %75,26 oranında azaldığı belirlenmiştir. En kötü deney koşulunda malzemenin kaplamasız olmasına bağlı olarak yüzey deformasyonu artmıştır.

Adhesiv aşınma mekanizması oluşumuna bağlı olarak malzemedan kopan parçacıklar aşındırıcı ile fren diski malzeme arasında yuvarlanma hareketi yaparak deformasyonu hızlandırmıştır. Bu duruma bağlı olarak aşınma hacminin arttığı söylenebilir. Kaplamalı malzemenin kullanıldığı orta seviye deney koşulunda ise daha yüzeysel deformasyonların oluşması sebebiyle yüzeyden kopan malzemenin daha küçük boyutlarda olmasına bağlı olarak aşınma hacmi azalmıştır. WC kaplamanın etkisiyle aşınma hacminde büyük orandaki azalma kaplama tabakasının aşınma direncine olumlu etkisini göstermektedir. Orta seviye deney koşulu (Şekil 6.10-b) ile optimum deney koşulunda (Şekil 6.10-c) gerçekleştirilen deneyler sonucunda meydana gelen aşınma hacimleri kıyaslandığında ise optimum deney koşulunda orta seviye deney koşuluna kıyasla %93,10 oranında aşınma hacminin azaldığı belirlenmiştir. Optimum deney koşulunda saf su kullanımıyla oluşan tribofilm tabakası ve yükün daha az olması sebebiyle aşındırıcı malzemenin hareket kolaylığının sağlanması sebebiyle aşınma hacminin önemli oranda azaldığı öngörülmektedir.



Şekil 6.10. 2d topografya görüntüleri a) en kötü, b) orta seviye, c) en iyi.

SEM görüntülerinde görülen yüzey deformasyonları ve 2D topoğrafya görüntülerinde aşınma izindeki düzensizliklere bağlı olarak malzeme yüzeyinde pürüzlülükler oluşmaktadır. Malzeme yüzeylerinde meydana gelen yüzeysel deformasyonlar sonucunda artan pürüzlülükler doğrusal hareketin sürekliliğine bağlı olarak aşınma hızını artırarak fren diskinin tribolojik performansını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple çalışmada yüzey pürüzlülüğü istatistiksel ve görsel olarak analiz edilmiştir.

### 6.3.3. Yüzey pürüzlülüğü

#### Kuru ve sıvı koşullarda yüzey pürüzlülüğü için ANOVA

Kuru ortamda gerçekleştirilen deneylerde numune türü, yük ve hız parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi ANOVA ile analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6'da verilmiştir. Çizelge 6.6'ya göre numune türü, yük ve hız parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki oranları sırasıyla %56,69, %26,41 ve %4,67 olarak belirlenmiştir. Yük ve hız parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etki oranlarının sürtünme katsayısı ve aşınma hacmine etki oranlarına kıyasla arttığı görülmektedir. Aşınma deneylerinde aşındırıcı malzeme tekrarlı olarak "stick-slip" hareketi yaparak ilerlemektedir [109]. Bu harekete bağlı olarak başlangıçta kısa sürede yüksek sürtünme katsayısı değerlerine ulaşılmaktadır. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır. Fakat hareketin sürekliliği sebebiyle belirli bir tekrardan sonra yüzeydeki aşınma partiküllerinin uzaklaştırılmasına bağlı olarak "stick-slip" hareketi kolaylaşmaktadır. Bu aşınma sürecinden sonra düşük değerlerde kararlı sürtünme katsayısı değerleri elde edilmektedir. Yük azaldığında yapışma (stick) hareketinde aşındırıcı malzemenin fren diski malzemesine batma derinliği daha az olduğu için yapışarak kaldırdığı malzeme miktarı daha az olmaktadır. Fren diski malzemesinden daha küçük boyutlarda malzeme koparılması sebebiyle yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Kayma hızı arttığında ise sürtünme katsayısının kararlı olduğu duruma daha hızlı geleceği için sürtünme katsayısı daha düşük değerlerde kararlı duruma gelecektir. Sürtünme katsayısındaki düşüşe bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Yük ve hız parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne için etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olmasının "stick-slip" hareketine etkilerine bağlı olduğu söylenebilir. Benzer durum saf su ortamı için de geçerli olup ANOVA ile elde edilen sonuçlar Çizelge 6.7'de verilmiştir. Saf su ortamında kuru ortama kıyasla yük ve hız parametrelerinin etki oranlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum saf suyun "stick-slip" hareketini kolaylaştırmasına bağlı olarak kayma hızı ve yükün etkisinin azalması ile açıklanabilir. Kuru ve saf su ortamları için gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen R-Sq(adj) değerleri sırasıyla %78,60 ve %97,87 olarak belirlenmiştir. Regresyon katsayısı değerlerinin %70'ten yüksek olması giriş



parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü yeterli seviyede açıklayabildiğini göstermektedir.

Çizelge 6.6. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA-kuru koşullar.

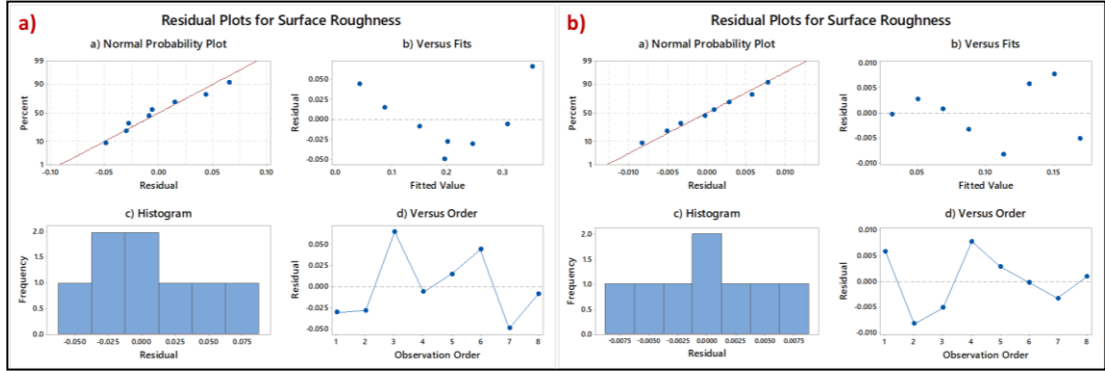
	<b>Serbestlik Derecesi (DF)</b>	<b>Kareler Toplamı (SS)</b>	<b>Kareler Ortalaması (MS)</b>	<b>F Oranı (<math>\alpha=5\%</math>)</b>	<b>P Değeri</b>	<b>Etki Oranı (%)</b>
Numune	1	0,049709	0,049709	18,54	0,013	<b>56,69</b>
Yük	1	0,023157	0,023157	8,64	0,042	<b>26,41</b>
Kayma Hızı	1	0,004096	0,004096	1,53	0,284	<b>4,67</b>
Hata	4	0,010724	0,002681			<b>12,23</b>
Toplam	7	0,087685				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-Sq = %87,77</b>			<b>R-Sq (adj) = %78,60</b>		

Çizelge 6.7. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA- ıslak koşullar.

	<b>Serbestlik Derecesi (DF)</b>	<b>Kareler Toplamı (SS)</b>	<b>Kareler Ortalaması (MS)</b>	<b>F Oranı (<math>\alpha=5\%</math>)</b>	<b>P Değeri</b>	<b>Etki Oranı (%)</b>
Numune	1	0,013508	0,013508	258,25	0,000	<b>78,47</b>
Yük	1	0,002774	0,002774	53,03	0,002	<b>16,11</b>
Kayma Hızı	1	0,000723	0,000723	13,83	0,020	<b>4,2</b>
Hata	4	0,000209	0,000052			<b>1,22</b>
Toplam	7	0,017214				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-Sq = %98,78</b>			<b>R-Sq (adj) = %97,87</b>		

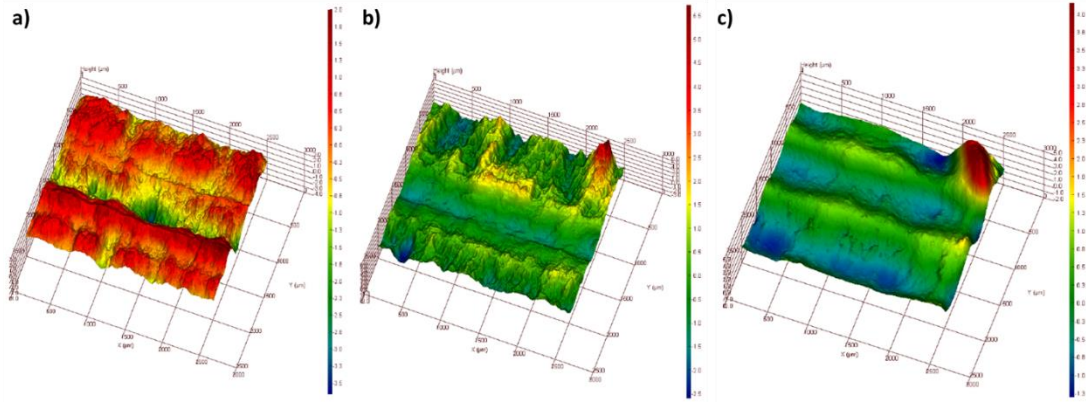
ANOVA ile belirlenen regresyon katsayısının görsel analizi için kuru ve saf su ortamları çoklu regresyon analizi ile elde edilen normal olasılık grafiği, dağılım grafikleri ve histogram grafiği elde edilmiştir (Şekil 6.11). Normal olasılık grafiklerinde deneysel verilerin lineer doğru üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum regresyon modeli ile deney sonuçlarının uyumlu olduğunu ve sapma miktarının düşük seviyede olmasına bağlı olarak hata oranının minimum seviyede olduğunu göstermektedir [110]. Dağılım grafiklerinde de uyumsuz veri (artık veri) sayısının

ihmal edilecek seviyede olması da normal olasılık grafiklerini destekler niteliktedir. Veri dağılımının analizi için elde edilen histogram grafiklerinde verilerin homojen dağıldığı ve normal dağılıma uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 6.11. Sürtünme katsayısı verilerinin a) kuru ve b) saf su ortamında normal dağılım grafikleri

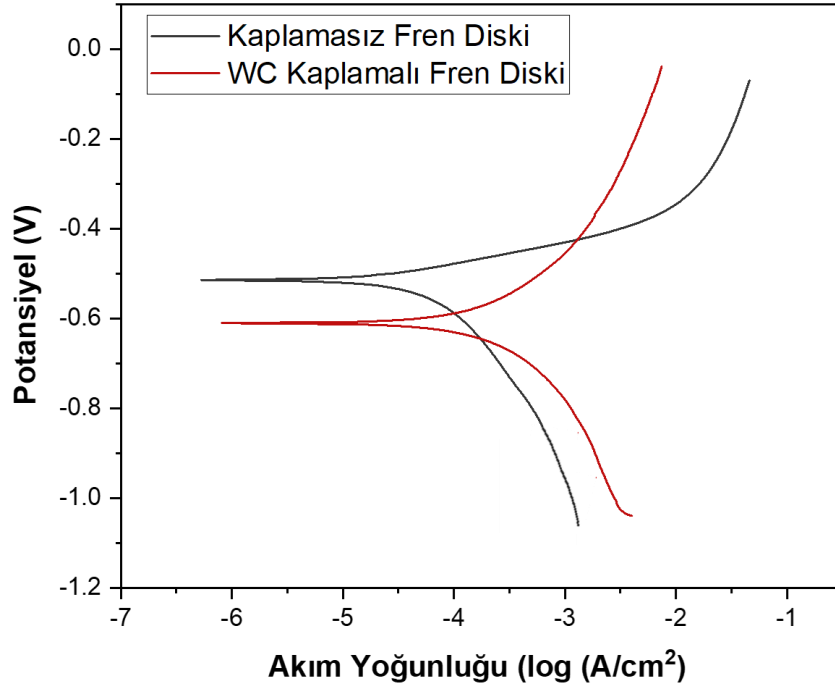
Giriş parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin görsel analizi için en kötü, orta seviye ve optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda aşınma yüzeyinden 3D topoğrafya görüntüleri elde edilmiş ve görüntüler Şekil 6.12'te verilmiştir. Topoğrafya görüntülerinde kırmızı renk pürüzlülüklerin yoğun olduğunu, mavi renk pürüzlülüklerin derinliğini, sarı ve yeşil renk tonları ise pürüzlülüğün az olduğunu ifade etmektedir. Şekil 6.12-a'da kırmızı renk tonlarının yoğun olduğu görülmektedir. Kaplamasız numunenin kuru ortam koşullarında (en kötü deney koşulu) aşınma miktarının fazla olması sebebiyle yüzey pürüzlülüğü fazladır. Şekil 15b'de yeşil renk tonlarının yoğun olduğu görülmektedir. Orta seviye deney koşulunda WC kaplamanın etkisiyle pürüzlülük miktarının azaldığı söylenebilir. Fakat pürüzlülük yoğunluğu en kötü koşula kıyasla daha az olsa da yüzey formundaki düzensizlik en kötü koşulda elde edilen aşınma yüzeyi ile benzerlik göstermektedir. Bu durum orta seviye deney koşulunda da testlerin kuru ortamda gerçekleşmesi sebebiyle aşındırıcı malzemenin 30N yükün etkisiyle bölgesel olarak WC kaplama tabakasını yırtarak gri dökme demiri deforme etmesi ile açıklanabilir. Optimum deney koşulunda elde edilen aşınma yüzeyinde (Şekil 6.12-c) yeşil renk tonlarının yoğun olduğu görülmektedir. WC kaplama tabakası ve saf su kullanımının etkisiyle pürüzlülüğün ciddi oranda azaldığı ve yüzey formunun en kötü ve orta seviye deney koşulundaki aşınma yüzeylerine kıyasla düzlemsel ve kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. En kötü (a), orta seviye (b) ve optimum (c) koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda aşınma yüzeyinden elde edilen 3D topoğrafya görüntüleri.

#### 6.4. WC KAPLANMIŞ FREN DİSKLERİNİN KOROZYON PERFORMANSI

Gri dökme demirin düşük korozyon direnci dikkate alınarak WC kaplamanın korozyon direncine etkisi analiz edilmiştir. WC kaplamalı ve kaplamasız numunelere potansiyodinamik polarizasyon korozyon testi yapılmış ve deney sonucunda Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile potansiyel- akım yoğunluğu (Tafel grafiği) elde edilmiştir (Şekil 6.13). Şekil 6.13'te kaplanmamış malzeme ve WC kaplanmış malzemenin benzer polarizasyon davranışı gösterdiği görülmektedir. Şekil 6.13'te verilen polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon akım yoğunluğu ( $i_{corr}$ ), ve korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) değerleri Çizelge 6.8'de verilmiştir. Çizelge 6.8'e göre WC kaplamalı malzemenin kaplamasız malzemeye kıyasla  $i_{corr}$  değerinin düşük olduğu,  $E_{corr}$  değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Korozyon akım yoğunluğunun düşük, korozyon potansiyeli değerinin yüksek olması korozyon direncinin yüksek olduğunu ifade etmektedir [111,112]. Çizelge 6.8'deki değerlere göre WC kaplamanın gri dökme demirin korozyon direncini arttırdığını göstermektedir. WC-Co kaplamasındaki karbür partiküllerinin homojen dağılımının korozyon direncini arttırdığı literatürde çalışmalarıyla belirlenmiştir [113]. Mevcut çalışmada WC kaplama tabakasının gri dökme demirin korozyon dayanımını arttırmış olması literatürle uyumluluk göstermektedir.



Şekil 6.13. Tafel eğrileri

Çizelge 6.8. Korozyon testi sonuçları.

Malzemeler	$E_{corr}$ (mV)	Korozyon Oranı (mm / yıl)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )
Kaplamasız Fren Diski	-610,1	2,18	258,91
WC Kaplamalı Fren Diski	-514,2	0,62	73,41

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışmada WC kaplamının gri dökme demirden imal edilmiş fren diski malzemesinin aşınma ve korozyon direncine etkisi araştırılmıştır. HVOF yöntemiyle WC kaplanan numunenin kaplama kalınlığı, XRD analizi ve sertlik ölçümü ile kaplama karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Aşınma direncinin istatistiksel analizinde ilk olarak TOPSIS ve S/N analizi ile sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonu için numune türü (WC kaplamalı-kaplamasız), ortam (kuru ve saf su), yük ve hız parametrelerinden oluşan deney koşullarından en kötü, orta seviye ve optimum deney koşulları belirlenmiştir. Giriş parametrelerinin çıkış parametrelerine etkisi ve giriş parametrelerinin belirlenen deney tasarımı için anlamlılığı ANOVA ve regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Ek olarak 2D profilometre, SEM, EDX ve 3D topoğrafya görüntüleri ile görsel analiz gerçekleştirilmiştir. Korozyon direnci, deneyler sonucu oluşturulan Tafel grafiğinden elde edilen korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu değerleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Kaplama karakterizasyonu için elde edilen SEM görüntülerine göre yaklaşık 153  $\mu\text{m}$  kalınlığında kaplama tabakası elde edildiği, WC kaplama tabakasının gri dökme demirin sertliğini 1250 HV değerine kadar attırdığı belirlenmiştir. XRD görüntüleri incelendiğinde WC ve dekarbürizasyona bağlı olarak oluşan  $\text{W}_2\text{C}$  fazlarının yoğunlukta olduğu görülmektedir.  $\text{W}_2\text{C}$  tabakasının sert bir faz olması elde edilen sertlik değerini destekler niteliktedir.
2. Sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin minimizasyonu için yapılan TOPSIS ve S/N analizlerinden elde edilen sonuçlara göre WC kaplamalı numune, saf su ortamı, 20 N yük ve 50 dev/dk hız parametreleri optimum koşul olarak, WC kaplamalı numune, kuru ortam, 30N yük, 20 dev/dk hız parametreleri orta seviye olarak, kaplamasız numune, kuru ortam, 30N yük, 20 dev/dk hız parametreleri en kötü deney koşulu olarak belirlenmiştir.
3. Giriş parametrelerinin çıkış parametrelerine etki oranları ANOVA ile belirlenmiştir. ANOVA ile edilen sonuçlara göre WC kaplamının kuru ve saf su

ortamları için sürtünme katsayısı (%84,64-%94,5), aşınma hacmi (%91.03-%97,18), yüzey pürüzlülüğü (%56,59-%78,47) için en etkili parametre olduğu belirlenmiştir.

4. Regresyon analizi ile elde edilen normal olasılık grafiği, dağılım grafikleri ve histogram grafiklerine göre deneysel verilerle matematiksel model ile elde edilen veriler arasında sapma miktarının ihmal edilebilir seviyede olduğu ve uyumluluk gösterdiği, veri dağılımının normal dağılıma uygun olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ANOVA ile elde edilen yüksek (> %70) R-Sq(adj) değerleri ile uyumluluk göstermektedir.
5. Görsel analiz için en kötü, orta seviye ve optimum deney koşulunda gerçekleştirilen deneyler sonrasında elde edilen görüntüler incelendiğinde 2D profilometre görüntülerinde optimum koşulda diğer koşullara kıyasla daha az hacim kaybı olduğu, SEM görüntülerinde en kötü koşulda adhesiv optimum koşulda yüzeysel abrasiv aşınma mekanizmasının olduğu, 3D topoğrafya görüntülerinde ise en kötü koşulda pürüzlülük yoğunluğuna bağlı olarak yüzey formunun düzensiz olduğu fakat en iyi koşulda pürüzlülüklerin minimum seviyede olduğu düzlemsel yüzey formu olduğu sonucuna varılmıştır.
6. Potansiyodinamik polarizasyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre WC kaplamalı malzemenin kaplamasız malzemeye kıyasla  $i_{corr}$  değerinin düşük olduğu,  $E_{corr}$  değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum WC kaplamalı numunenin korozyon direncinin kaplamasız numuneye kıyasla yüksek olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKLAR

1. Kang, B., Choe, K., and Kim, H., "Braking Performance of Ceramic Coated Discs", 8531: 1–13 (1998).
2. Zhao, Y., Ren, L. quan, Tong, X., Zhou, H., and Chen, L., "Frictional Wear and Thermal Fatigue Behaviours of Biomimetic Coupling Materials for Brake Drums", *Journal Of Bionic Engineering*, 5 (SUPPL.): 20–27 (2008).
3. Rashid, A., "Overview of disc brakes and related phenomena - A review", *International Journal Of Vehicle Noise And Vibration*, 10 (4): 257–301 (2014).
4. Cueva, G., Sinatora, A., Guesser, W. L., and Tschiptschin, A. P., "Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors", *Wear*, 255 (7–12): 1256–1260 (2003).
5. Thornton, R., Slatter, T., Jones, A. H., and Lewis, R., "The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs", *Wear*, 271 (9–10): 2386–2395 (2011).
6. Cho, M. H., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W., and Jang, H., "Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure", *Tribology International*, 36 (7): 537–545 (2003).
7. Güney, B. and Mutlu, I., "Tribological properties of brake discs coated with Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> by plasma spraying", *Surface Review And Letters*, 26 (10): (2019).
8. Shin, M. W., Cho, K. H., Kim, S. J., and Jang, H., "Friction instability induced by corrosion of gray iron brake discs", *Tribology Letters*, 37 (2): 149–157 (2010).
9. Stanford, M. K. and Jain, V. K., "Friction and wear characteristics of hard coatings", *Wear*, 250–251: 990–996 (2001).
10. Maleque, M. A., Dyuti, S., and Rahman, M. M., "Material selection method in design of automotive brake disc", *WCE 2010 - World Congress On Engineering 2010*, 3: 2322–2326 (2010).
11. Hjortenkrans, D. S. T., Bergbäck, B. G., and Hæggerud, A. V., "Metal emissions from brake linings and tires: Case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005", *Environmental Science And Technology*, 41 (15): 5224–5230 (2007).
12. Iijima, A., Sato, K., Yano, K., Kato, M., Kozawa, K., and Furuta, N., "Emission factor for antimony in brake abrasion dusts as one of the major atmospheric antimony sources", *Environmental Science And Technology*, 42 (8): 2937–2942 (2008).

13. Adebisi, A. A., Maleque, M. A., and Rahman, M. M., "Metal matrix composite brake rotor: Historical development and product life cycle analysis", *International Journal Of Automotive And Mechanical Engineering (IJAME)*, 4: 1471–480 (20011).
14. Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Lu, L., and Feng, X., "Review on the friction and wear of brake materials", *Advances In Mechanical Engineering*, 8 (5): 1–10 (2016).
15. Polak, A. and Grzybek, J., "The mechanism of changes in the surface layer of grey cast iron automotive brake disc", *Materials Research*, 8 (4): 475–479 (2005).
16. Blau, P. J. and Meyer, H. M., "Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials", *Wear*, 255 (7–12): 1261–1269 (2003).
17. Natarajan, N., Vijayarangan, S., and Rajendran, I., "Wear behaviour of A356/25SiCp aluminium matrix composites sliding against automobile friction material", *Wear*, 261 (7–8): 812–822 (2006).
18. Shivamurthy, R. C. and Surappa, M. K., "Tribological characteristics of A356 Al alloy-SiCP composite discs", *Wear*, 271 (9–10): 1946–1950 (2011).
19. Djafri, M., Bouchetara, M., Busch, C., and Weber, S., "Effects of humidity and corrosion on the tribological behaviour of the brake disc materials", *Wear*, 321: 8–15 (2014).
20. Krenkel, W., Renz, R., and Henke, T., "Ultralight and Wear Resistant Ceramic Brakes", *Materials For Transportation Technology*, 89–94 (2005).
21. Renz, R., Seifert, G., and Krenkel, W., "Integration of CMC brake disks in automotive brake systems", *International Journal Of Applied Ceramic Technology*, 9 (4): 712–724 (2012).
22. Nakanishi, H., Kakihara, K., Nakayama, A., and Murayama, T., "Development of aluminum metal matrix composites (Al-MMC) brake rotor and pad", *JSAE Review*, 23 (3): 365–370 (2002).
23. Kim, S. W., Park, K., Lee, S. H., Kang, K. H., and Lim, K. T., "Thermophysical properties of automotive metallic brake disk materials", *International Journal Of Thermophysics*, 29 (6): 2179–2188 (2008).
24. Çakmakkaya, M., "Wear Resistance and Brake Performance of Brake Discs Coated with Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25%NiCr and WC-12%Co using the HVOF method",



- International Journal Of Automotive Science And Technology*, 1 (3): 1–7 (2017).
25. Öz, A., Gürbüz, H., Yakut, A. K., and Sağıroğlu, S., "Braking performance and noise in excessive worn brake discs coated with HVOF thermal spray process", *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 31 (2): 535–543 (2017).
26. Demir, A., Samur, R., and Kiliçaslan, I., "Investigation of the coatings applied onto brake discs on disc-brake pad pair", *Metallurgija*, 48 (3): 161–166 (2009).
27. Bartys, H., Guerin, J. D., Watremez, M., and Bricout, J. P., "A comparative study of plasma sprayed coatings on railway brake discs", *Surface Engineering*, 17 (2): 127–130 (2001).
28. Aranke, O., Algenaid, W., Awe, S., and Joshi, S., "Coatings for automotive gray cast iron brake discs: A review", *Coatings*, 9 (9): (2019).
29. Sugözü, İ., Mutlu, İ., "Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme ve Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (4) 33-40 (2008)
30. Kılıç, H., "Metalik Kaplama Tozlarıyla Kaplanan Otomobil Fren Diskinin Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması", *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2020)
31. İnternet: <https://www.autoresource.co.uk/resources/products/blue-print-brake-discs-uncompromised-precision/> (2021)
32. Toptan, F., Kilicarslan, A., Karaaslan, A., Cigdem, M., Kerti, I., "Processing and microstructural characterisation of AA 1070 and AA 6063 matrix B4Cp reinforced composites", *Materials and Design*, (31) 87-91: (2010)
33. Öztürk, S., Dökme Demirler, Ders Notu, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği*, Trabzon (2013)
34. Akgül B., "Gri Dökme Demirde Kalayın (Sn) Mikroyapıya ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması", Selçuk Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 68s, Konya (2018)
35. Öncel, Y., "Fren Diskinin Fea(Sea) Analizi", *İstanbul Gelişim Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, (2020)
36. İnternet: Makine Eğitimi, <https://www.makinaegitimi.com/beyaz-dokme-demirler/>

37. Tekin, H., “Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Katkili Zirkonya (8YSZ) Seramiklerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, (2015)
38. İçten, B., “Statik Ders Notları”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İzmir, (2014)
39. Shorowordi, K.M., “Velocity Effects On The Wear, Friction And Tribochemistry Of Aluminum MMC Sliding Against Phenolic Brake Pad”, *Wear*, (257) 1176-1181: (2004)
40. Ericksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., “On The Nature Of Tribological Contact In Automotive Brakes”, *Wear*, (252) 23-36: (2002)
41. Tahery, Ali, S., “Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (49-56) 1995
42. Tıgılı, G., “Demiryolu Araçlarında Kullanılan Dökme Demir Saboların Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine Bn İlavesinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (25-28) 2020
43. Büyükkelleci, Ü., “Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı Ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı*, Elazığ, 2008
44. Özdemir, K., “İlk Aşınma Bölgesinde Takım Aşınmasını Etkileyen Parametrelerin Deneysel Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 2008
45. Akdoğan, K., “Asbestsiz Bağlayıcı İle Üretilen Fren Balatalarında Demir Cürufu Kullanımının Frenleme Performansına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (22) 2020
46. Karanfil, S., “Fren Disklerinin Hvof Yöntemi İle Kaplanması Ve Taşıtlarda Fren Performansına Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (22) 2017
47. Öztürk, A., “Manyetik Sıçratma Tekniği İle Üretilmiş Mo<sub>2</sub>N Ve Nanokompozit Mo-N-Cu Kaplamaların Kazımalı Aşınma Davranışlarının Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (3-6) 2003

48. Saygılı, S.Y., Çakmak, B., “Surface Coating Applications on Active Parts of Tillage Machines”, *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, (8) 92-99 (2020)
49. İnçal, E., “PVD Yöntemi İle Kaplanan Hss Takim Çeliklerinin Karakterizasyonu Ve Aşınma Dayanımının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (9-10) 2007
50. Yılmaz,M., Sarı, Y.N., “Ni-Esaslı Kaplamaların Abrasif+ Eroziv Aşınma Direncine Isıl Püskürtme Yönteminin ve WC İlavesinin Etkisi” *Mühendis ve Makina*, Cilt 46, Sayı 541, Şubat 2005
51. Hajihashemi, M., Shamanian, M., Azimi, G., “Physical, Mechanical and Dry Sliding Wear Properties of Fe-Cr-WC Hardfacing Alloys Under Different Tungsten Addition” *Metallurgical and Materials Transactions*, 46 (2), 919-927, 2015
52. Güzel, K., “Termal Sprey Yöntemi İle Üretilen Oksit Esaslı Kaplamaların Katı Partikül Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (92-93) Şubat 2018
53. Islak, S., Buytoz, S., “Plazma Püskürtme Yöntemiyle AISI 304 Paslanmaz Çelik Yüzeyinde Elde Edilen ZrO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- % 13TiO<sub>2</sub> Kompozit Kaplamasının Mikroyapı Özellikleri” *6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ (2011)
54. Mutlu, İ., Güney, B., Ünal, C.O., Kartal, Ö., “55TiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kaplamanın Frenleme Performansına Etkisinin Araştırılması” *4. International Conference on Material Science and Technology*, Ankara, 2019
55. Pasinli, A., Köksal, S.N., “Alüminyum Kaplanan Çelik Malzemelerde Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi” *Mühendis ve Makina*, Cilt 45, Sayı 536, 2004
56. Aydın, Z., “Fırça Kaplama Yöntemi İle Biriktirilen Sert Krom Kaplamanın Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (15-24) Aralık 2013
57. Sarıca, B., “Farkli Kalite Çeliklere Uygulanan Yüzey Kaplama İşlemlerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (42-44) Mayıs 2005

58. Yang, Q., Senda, T., and Hirose, A., "Sliding Wear Behavior of WC-12% Co Coatings at Elevated Temperatures", *Surface And Coatings Technology*, 200: 4208–4212 (2006).
59. Bhosale, D. G., Rathod, W. S., and Rukhande, S. W., "Wear and oxidation behaviour of tungsten carbide based coatings : A review", (2018).
60. Rajinikanth, V. and Venkateswarlu, K., "An Investigation of Sliding Wear Behaviour of WC-Co Coating", *Tribology International*, 44 (12): 1711–1719 (2011).
61. Mateen, A., Saha, G. C., Khan, T. I., and Khalid, F. A., "Tribological behaviour of HVOF sprayed near-nanostructured and microstructured WC-17wt.%Co coatings", *Surface And Coatings Technology*, 206 (6): 1077–1084 (2011).
62. Salm, M., Shama, S., Mozumder, Y. H., Behera, R. K., L.P., S., Pattanaik, A., Mishra, S. C., and Sen, S., "Adhesive Wear Behavior of Heat Treated Spheroidal Graphite Cast Iron", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 75: 1–8 (2015).
63. Woodward, R. G., Toumpis, A., and Galloway, A., "The influence of cementite spheroidizing duration on the microstructure and sliding wear response of grey cast iron against AISI 4330", *Wear*, 488: 1–13 (2022).
64. Ahmaida, Y. A. A., Korkmaz, S., Kilincarslan, S. K., and Sirvan, O. C., "Investigation of interaction of extreme pressure additive , load and sliding speed parameters with silver nano-particles in wear environment", *Surface Topography: Metrology And Properties*, 9 (4): 45020 (2021).
65. Divya, C., Raju, L. S., and Singaravel, B., "A Review of TOPSIS Method for Multi Criteria Optimization in Manufacturing Environment", *Intelligent in Science and Applications Techniques and Technology*, Switzerland, 719–727 (2020).
66. Pangsri, P., "Application of the Multi Criteria Decision Making Methods for Project Selection", *Universal Journal Of Management*, 3 (1): 15–20 (2015).
67. Kabir, G. and Hasin, M. A. A., "Comparative Analysis of TOPSIS and Fuzzy TOPSIS For The Evaluation of Travel Website Service Quality", *International Journal For Quality Research*, 3: 657–676 (2012).
68. Pavić, Z. and Novoselac, V., "Notes on TOPSIS Method", *International Journal Of Research In Engineering And Science (IJRES)*, 1 (2): 5–12 (2013).
69. Panda, M. and Jagadev, A. K., "TOPSIS in Multi-Criteria Decision Making: A

- Survey", (2018).
70. Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F. H., and Izadikhah, M., "An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data", *Applied Mathematics And Computation*, 175: 1375–1384 (2006).
  71. Kumar, R., Jagadish, and Ray, A., "Selection of Material for Optimal Design using Multi-Criteria Decision Making", (2014).
  72. Gavade, R. K., "Multi-Criteria Decision Making: An overview of different selection problems and methods", *International Journal Of Computer Science And Information Technologies*, 5 (4): 5643–5646 (2014).
  73. Shih, H., Shyur, H., and Lee, E. S., "An extension of TOPSIS for group decision making", *Mathematical And Computer Modelling*, 45: 801–813 (2007).
  74. Yang, T. and Chou, P., "Solving a multiresponse simulation-optimization problem with discrete variables using a multiple-attribute decision-making method", *Mathematics And Computers In Simulation*, 68 (1): 9–21 (2005).
  75. Janic, M., "Multicriteria Evaluation of High-speed Rail , Transrapid Maglev and Air Passenger Transport in Europe", *Transportation Planning And Technology ISSN:*, 26 (6): 491–512 (2003).
  76. Kwong, C. K. and Tam, S. M., "Case-based reasoning approach to concurrent design of low power transformers", *Journal Of Materials Processing Technology*, 128: 136–141 (2002).
  77. Chen, M. F. and Tzeng, G. H., "Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country", *Mathematical And Computer Modelling*, 40 (13): 1473–1490 (2004).
  78. Srdjevic, B., Medeiros, Y. D. P., and Faria, A. S., "An objective multi-criteria evaluation of water management scenarios", *Water Resources Management*, 18 (1): 35–54 (2004).
  79. Milani, A. S., Shanian, A., Madoliat, R., and Nemes, J. A., "The effect of normalization norms in multiple attribute decision making models: A case study in gear material selection", *Structural And Multidisciplinary Optimization*, 29 (4): 312–318 (2005).
  80. Shanian, A. and Savadogo, O., "TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell", *Journal Of Power Sources*, 159: 1095–1104 (2006).

81. Tsaur, R.-C., "Decision risk analysis for an interval TOPSIS method", *Applied Mathematics And Computation*, 218 (8): 4295–4304 (2011).
82. Vafaei, N., Ribeiro, R. A., and Camarinha-matos, L. M., "Data normalisation techniques in decision making: case study with TOPSIS method", *Int. J. Information And Decision Sciences*, 10 (1): 19–38 (2018).
83. Triantaphyllou, E., "Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study", U.S.A., 18 (2000).
84. Ceballos, B., Lamata, T. M., and Pelta, D. A., "A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods", *Progress In Artificial Intelligence*, 5 (4): 315–322 (2016).
85. Papathanasiou, J. and Ploskas, N., "Multiple Criteria Decision Aid", Belgium, 2 (2017).
86. Alagarsamy, S. V, Ravichandran, M., Meignanamoorthy, M., Sakthivelu, S., and Dineshkumar, S., "Prediction of surface roughness and tool wear in milling process on brass ( C26130 ) alloy by Taguchi technique", *Materials Today: Proceedings*, 21: 189–193 (2020).
87. Serrao, P., Prabhu, R., Chiranth, B. P., and Mohammed, Y., "Application of Taguchi Method to Predict the Abrasive Wear Behavior of CP Titanium", *Journal Of Mechanical Engineering And Automation*, 6: 13–17 (2016).
88. Shanmughasundaram, P., "Statistical Analysis on Influence of Hear Treatment, Load and Velocity on the Dry Sliding Wear Behavior of Aluminium Alloy 7075", *Materials Physics And Mechanics*, 22: 118–124 (2015).
89. Mia, M., Dey, P. R., Hossain, M. S., Arafat, T., Ullah, S., and Zobaer, S. M. T., "Taguchi S/N based optimization of machining parameters for surface roughness , tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition", *Measurement*, 122: 380–391 (2018).
90. Popov, B. N., "Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems", Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems, *Elsevier*, South Carolina, 202–203 (2015).
91. Korkmaz, S., Pehlivanoglu, M., Orak, A., and Cetin, M. H., "Investigation of Wear Behavior of Carbide Based Coated Rolling Roll Materials Under Dry and Lubricated Conditions", *Surface Topography: Metrology And Properties*, 9 (1): 1–19 (2021).

92. Santana, Y. Y., Renault, P. O., Sebastiani, M., Barbera, J. G. La, Lesage, J., Bemporad, E., Le Bourhis, E., Puchi-Cabrera, E. S., and Staia, M. H., "Characterization and residual stresses of WC – Co thermally sprayed coatings", *Surface & Coatings Technology*, 202: 4560–4565 (2008).
93. Prasad, D. S., Tualsi, P., Shoba, C., and Rao, P. S., "Dynamic mechanical behavior of WC-Co coated A356.2 aluminum alloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 767: 988–993 (2018).
94. Mi, P., Zhao, H., Wang, T., and Ye, F., "Sliding wear behavior of HVOF sprayed WC- ( nano-WC-Co ) coating at elevated temperatures", *Materials Chemistry And Physics*, 206: 1–6 (2018).
95. Chivavibul, P., Watanabe, M., Kuroda, S., and Shinoda, K., "Effects of Carbide Size and Co Content on the Microstructure and Mechanical Properties of HVOF-Sprayed WC-Co Coatings", *Surface And Coatings Technology*, 202 (3): 509–521 (2007).
96. Sahraoui, T., Guessasma, S., Ali Jeridane, M., and Hadji, M., "HVOF Sprayed WC-Co Coatings: Microstructure, Mechanical Properties and Friction Moment Prediction", *Materials And Design*, 31 (3): 1431–1437 (2010).
97. Bayrakçeken, H. and Düzgün, M., "Taşıtlarda Fren Verimi ve Frenleme Mesafesi Analizi", *Poit teknik Dergisi*, 8 (2): 153–160 (2005).
98. Kuram, E. and Ozcelik, B., "Optimization of machining parameters during micro-milling of Ti6Al4V titanium alloy and Inconel 718 materials using Taguchi method", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 231 (2): 228–242 (2017).
99. Quiza, R., Figueira, L., and Davim, J. P., "Comparing statistical models and artificial neural networks on predicting the tool wear in hard machining D2 AISI steel", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 37: 641–648 (2008).
100. Kuram, E., Tasci, E., Altan, A. I., Medar, M. M., Yilmaz, F., and Ozcelik, B., "Investigating the effects of recycling number and injection parameters on the mechanical properties of glass-fibre reinforced nylon 6 using Taguchi method", *Materials And Design*, 49: 139–150 (2013)
101. Das, K. R. and Imon, A. H. M. R., "A Brief Review of Tests for Normality", *American Journal Of Theoretical And Applied Statistics*, 5 (1): 5–12 (2016).

102. Verma, P. C., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S., and Straffelini, G., "Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments", *Wear*, 322: 251–258 (2015).
103. Cai, R., Zhang, J., Nie, X., Tjong, J., and Matthews, D. T. A., "Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions", *Wear*, 452–453: 1–9 (2020).
104. Schwartz, J., Laden, F., and Zanobetti, A., "The Concentration – Response Relation between PM 2.5 and Daily Deaths", *Environmental Health Perspectives*, 110 (10): 1025–1029 (2002).
105. Alemani, M., Wahlström, J., and Olofsson, U., "On the influence of car brake system parameters on particulate matter emissions", *Wear*, 396–397: 67–74 (2018).
106. Grigoratos, T. and Martini, G., "Brake wear particle emissions: a review", *Environmental Science And Pollution Research*, 22: 2491–2504 (2015).
107. Farwick, F. H., Mathissen, M., Grabiec, T., Hennicke, T., Rettig, M., Grochowicz, J., Vogt, R., and Benter, T., "Study of Brake Wear Particle Emissions: Impact of Braking and Cruising Conditions", *Environmental Science & Technology*, 53: 5143–5150 (2019).
108. Cai, R., Zhang, J., Nie, X., Tjong, J., and Matthews, D. T. A., "Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions", *Wear*, 452–453 (203283): 1–9 (2020).
109. Özmen, Y. and Jahanmır, S., "Sulu Ortamda Silisyum Nitrür Üzerindeki Nanoyapılı Yüzeylerin Çok Düşük Sürtünme Özellikleri", *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences*, 21 (8): 337–343 (2015).
110. Başak, H. and Baday, Ş., "Küreselleştirilmiş orta karbonlu bir çeliğin işlenmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin regresyon analizi ile modellenmesi", *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences*, 22 (4): 253–258 (2016).
111. Guney, B., "Corrosion and wear behaviour of HVOF spraying WC-12 % Ni coating on gray cast-iron", *Indian Journal Of Engineering & Materials Sciences*, 28: 73–81 (2021).
112. Priyan, M. S. and Hariharan, P., "Wear and Corrosion Resistance of Fe Based Coatings by HVOF Sprayed on Gray Cast-Iron for Automotive Application",



*Tribology In Industry*, 36 (4): 394–405 (2014).

113. Reyes-Mojena, Miguel Ángel Sagaro-Zamora, Roberto Carvajal Fals, Hipólito Domingo Ferraresi, V. A. and Lima, C. R. C., "Tribocorrosion Behaviour of Cemented Carbide Coatings Obtained by High Velocity Oxygen Fuel Spraying", *International Journal Of Surface Science And Engineering*, 9 (6): 561–573 (2015).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Huriye BURKUCU 1995 yılında Kastamonu'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başladı. 2018 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. 2019 yılında Kastamonu'da Zincir Fabrikasında Kalite Kontrol Mühendisi olarak çalışmıştı.