

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**OTOMOTİV SAC ŞEKİLLENDİRME KALIPLARINDA  
KULLANILAN MALZEMELERİN TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İMREN ÖZTÜRK YILMAZ**

**BALIKESİR, OCAK - 2012**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**OTOMOTİV SAC ŞEKİLLENDİRME KALIPLARINDA  
KULLANILAN MALZEMELERİN TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İMREN ÖZTÜRK YILMAZ**

**BALIKESİR, OCAK - 2012**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**İmren ÖZTÜRK YILMAZ** tarafından hazırlanan “**OTOMOTİV SAC ŞEKİLLENDİRME KALIPLARINDA KULLANILAN MALZEMELERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 23.01.2012 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

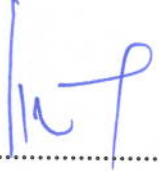
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ

  
.....

Üye  
Prof. Dr. İrfan AY

  
.....

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Arın YILMAZ

  
.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Hilmi NAMLI

.....

**Bu tez çalışması FAİK ÇELİK HOLDİNG AŞ. tarafından desteklenmiştir.**

## ÖZET

**OTOMOTİV SAC ŞEKİLLENDİRME KALIPLARINDA KULLANILAN  
MALZEMELERİN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMREN ÖZTÜRK YILMAZ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. GÜLCAN TOKTAŞ)**

**BALIKESİR, OCAK - 2012**

Bu çalışmada, otomotiv sektöründeki sac şekillendirme kalıplarında sürtünme plakası olarak kullanılan grafitli SAE430B mangan bronzu (aşınan malzeme) ve bu malzeme ile birlikte çalışan Fe esaslı aşındıran malzemelerin (DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği, DIN GG25 lamel grafitli dökme demir ve DIN GGG70 küresel grafitli dökme demir) tribolojik özellikleri ayrı ayrı incelenmiştir. Aşınan ve aşındıran malzemelerin kimyasal bileşimleri, iç yapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Pin-on disk aşınma deneylerinde, malzemelerdeki aşınma miktarları sabit kayma hızında (60mm/s) ve sabit yük altında (15 N) farklı kayma mesafelerine (5000, 10000 ve 15000 metre) bağlı olarak ağırlık kaybı metodu kullanılarak ölçülmüştür. Grafitin aşınmaya olan olumlu etkisini incelemek için aynı şartlardaki aşınma deneyleri aşınan malzeme olarak SAE 430B mangan bronzu kullanılarak da ayrıca yapılmıştır. Aşınma deneyleri sırasında aşınma çiftleri arasındaki sürtünme katsayıları tespit edilmiştir. Ayrıca kayma mesafesine bağlı olarak malzemelerin yüzey görüntüleri de elde edilmiştir.

Sürtünme plakaları ile birlikte çalıştıklarında; DIN GGG70 küresel grafitli dökme demir en fazla aşındıran, DIN GG25 lamel grafitli dökme demir en az aşındıran malzeme olarak tespit edilmiştir. Grafitli ve grafitsiz disklerle yapılan deneylerde oluşan ağırlık kayıpları karşılaştırılmış, grafitin yağlayıcı etkisinden dolayı aşındıran malzemelere bağlı olarak grafitin 8 ile 91 kat oranında aşınmayı azalttığı görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER:** Triboloji, SAE430B, sürtünme plakaları, otomotiv sac şekillendirme kalıpları.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MATERIALS USED IN AUTOMOTIVE SHEET FORMING DIES**

**MSc THESIS**

**İMREN ÖZTÜRK YILMAZ**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. GÜLCAN TOKTAŞ )**

**BALIKESİR, JANUARY 2012**

In this study, the tribological properties of SAE430B manganese bronze with graphite (the worn material), used as a friction plate in metal sheet forming dies in automotive industry, and Fe based abrasive materials (DIN 1.2379 cold work tool steel, DIN GG25 lamellee graphite cast iron and DIN GGG70 spheroidal graphite cast iron) which work with the friction plate were investigated separately. The chemical composition, the microstructures and the mechanical properties of the worn and the abrasive materials were examined. Pin-on disc wear tests were performed under the constant load (15 N) and sliding velocity ( 60mm/s ). The wear amounts of the materials (both the worn and the abrasive) were measured by the loss of weight method depending on the various sliding distances (5000, 10000 and 15000 meters). In order to investigate the effect of graphite, the wear tests were also performed using SAE430B manganese bronze for the same wear conditions. During the wear tests, the friction coefficients between the wear pairs were determined. Besides, the worn surface images of materials were also obtained depending on the sliding distances.

While working together with the friction plates; spheroidal graphite cast iron DIN GGG70 was found the most abrasive material, DIN GG25 lamellar graphite cast iron had been determined the least abrasive material as experimentally. The lubricating effect of graphite was investigated and it is observed that the friction plate with graptite reduced the wear 8 to 91 times according to the abrasive material.

**KEYWORDS:** Tribology, SAE430B, friction plates, automotive sheet metal forming dies.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TRİBOLOJİ</b> .....	<b>4</b>
2.1 Sürtünme .....	5
<b>3. AŞINMA</b> .....	<b>8</b>
3.1 Aşınma Zaman İlişkisi.....	10
3.2 Aşınma Türleri .....	11
3.2.1 Adhezif Aşınma .....	12
3.2.2 Abrasif Aşınma .....	12
3.2.3 Yorulma Aşınması .....	14
3.2.4 Korozif Aşınma.....	14
3.2.5 Erozyon Aşınması.....	15
3.2.6 Tabaka Aşınması.....	16
3.3 Aşınmaya Etki Eden Faktörler .....	17
3.3.1 Esas Sürtünme Elemanına Bağlı Olanlar:.....	17
3.3.2 Karşı Elemana Bağlı Olanlar: .....	17
3.3.3 Ortama Bağlı Olanlar: .....	18
3.4 Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri .....	18
3.4.1 Ağırlık Farkı Metodu .....	19
3.4.2 Kalınlık Ölçme Metodu .....	20
3.4.3 İz Değişiminin İzlenmesi Metodu.....	20
3.4.4 Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu.....	20
<b>4. GENEL BİLGİLER</b> .....	<b>21</b>
4.1 Sürtünme Plakaları .....	21
4.2 Dökme demirler .....	23
4.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD).....	26
4.2.2 Lamel Grafitli Dökme Demirler .....	29
4.3 Takım Çelikleri.....	31
<b>5. YÖNTEM</b> .....	<b>33</b>
5.1 Deneysel Malzemeler ve Kimyasal Bileşim.....	33
5.2 Çekme Deneyleri .....	34
5.3 Yüzey Kalitesi ve Sertlik Deneyleri .....	36
5.4 Metalografik İncelemeler .....	38
5.5 Aşınma Deneyleri.....	40
<b>6. BULGULAR</b> .....	<b>42</b>
6.1 Kimyasal Analiz Sonuçları.....	42
6.2 Çekme Deney Sonuçları .....	42
6.3 Yüzey Kalitesi ve Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	43

6.4	Metalografik İnceleme Sonuçları .....	44
6.5	Aşınma Deney Sonuçları .....	49
6.5.1	Ağırlık Kayıplarının İncelenmesi .....	49
6.5.2	Sürtünme Katsayıları .....	55
6.5.3	Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	56
<b>7.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>66</b>
<b>8.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>68</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı [13].....	4
Şekil 2.2 : Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi [14].....	5
Şekil 2.3 : Statik sürtünme ölçümü için bir tasarım [24]. ....	7
Şekil 3.1 : Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri [26] .....	10
Şekil 3.2 : Aşınmanın zamana bağlı değişimi [5].....	11
Şekil 3.3 : Abrasiv aşınma şeması [34].....	13
Şekil 3.4 : Korozif aşınma şeması [34].....	15
Şekil 4.1 : Örnek kalıp resmi .....	21
Şekil 4.2 : Sürtünme plakasının kalıp içerisindeki konumu. ....	22
Şekil 4.3 : Grafitli sürtünme plakası. ....	23
Şekil 4.4 : Dökme demirlerin mikroyapılarına göre sınıflandırılması [45] .....	24
Şekil 4.5 : KGDD'in mikroyapısı. ....	28
Şekil 4.6 : Lamel grafitli dökme demirin yapısında grafit dağılımı. ....	30
Şekil 5.1 : Spektral analiz cihazı.....	34
Şekil 5.2 : Çekme deneyi cihazı.....	35
Şekil 5.3 : Çekme numunesi şekil ve boyutları.....	35
Şekil 5.4 : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı. ....	36
Şekil 5.5 : Vikers sertlik ölçüm cihazı. ....	37
Şekil 5.6 : Optik mikroskop. ....	39
Şekil 5.7 : Aşınma test cihazı.....	40
Şekil 5.8 : a) I.Grup deneylerde kullanılan kendinden yağlamayı sağlayan grafitli SAE430B mangan bronz disk ve pim aşınma çifti b)II.Grup deneylerde kullanılan SAE430B mangan bronz disk ve pim aşınma çifti. ....	41
Şekil 6.1 : Genel yüzey pürüzlülük profili.....	43
Şekil 6.2 : 1,2379 malzemesinin sırası ile x50, x100 ve x500 büyütmelelerdeki iç yapıları.....	45
Şekil 6.3 : GGG70 malzemesinin sırası ile x50, x100 ve x500 büyütmelelerdeki iç yapıları.....	45
Şekil 6.4 : GG25 malzemesinin sırası ile x50, x100 ve x500 büyütmelelerdeki iç yapıları.....	46
Şekil 6.5 : SAE430B malzemesinin sırası ile x50, x200 ve x500 büyütmelelerdeki iç yapıları.....	46
Şekil 6.6 : Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış SAE430B mangan bronzunun yüzey görüntüsü. ....	47
Şekil 6.7 : Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış 1,2379 soğuk iş takım çeliğinin yüzey görüntüsü. ....	48
Şekil 6.8 : Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış GGG70 küresel grafitli dökme demirin yüzey görüntüsü. ....	48
Şekil 6.9 : Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış GG25 lamel grafitli dökme demirin yüzey görüntüsü.....	49
Şekil 6.10 : I.Grup deneylerde diskte oluşan aşınma kayıpları. ....	51
Şekil 6.11 : II.Grup deneylerde diskte oluşan aşınma kayıpları. ....	52
Şekil 6.12 : I.Grup deneylerde kullanılan pimlerdeki ağırlık kaybı değişimi .....	55

<b>Şekil 6.13</b> : I. ve II. Grup deneylerde ortalama sürtünme katsayısı değişimi ...	56
<b>Şekil 6.14</b> : Grafitli SAE430B disk-1.2379 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a), 10000m (b), 15000m (c) kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri (x50 büyütme).....	57
<b>Şekil 6.15</b> : Grafitli SAE430B disk-1.2379 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a) ,10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde pim yüzeyinde aşınma izleri ( x100 büyütme).....	58
<b>Şekil 6.16</b> : Grafitli SAE430B disk-GG25 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a) ,10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri (x50 büyütme).....	59
<b>Şekil 6.17</b> : Grafitli SAE430B disk-GG25 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a) ,10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde pim yüzeyinde aşınma izleri ( x100 büyütme).....	59
<b>Şekil 6.18</b> : Grafitli SAE430B disk-GGG70 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a) ,10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri ( x50 büyütme).....	60
<b>Şekil 6.19</b> : Grafitli SAE430B disk-GGG70 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a) ,10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde pim yüzeyinde aşınma izleri ( x50 büyütme).....	61
<b>Şekil 6.20</b> : Grafitli SAE430B-1,2379 pim aşınma çifti 15000m kayma mesafesi sonrası numunelerin görüntüsü .....	62
<b>Şekil 6.21</b> : Grafitli SAE430B-GG25 pim aşınma çifti 15000m kayma mesafesi sonrası numunelerin görüntüsü. ....	62
<b>Şekil 6.22</b> : Grafitli SAE430B disk-GGG70 pim aşınma çifti 15000m kayma mesafesi sonrası numunelerin görüntüsü. ....	63
<b>Şekil 6.23</b> : SAE430B disk-1.2379 pim aşınma çifti 5000m ve 10000m kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri .....	64
<b>Şekil 6.24</b> : SAE430B disk-GG25 pim aşınma çifti 5000m ve 10000m kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri .....	64
<b>Şekil 6.25</b> : SAE430B disk-GGG70 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m ve 10000m kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri.....	65

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 4. 1:</b> Mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması [46] .....	25
<b>Tablo 4. 2:</b> Değişik tipteki dökme demirlerin kimyasal bileşimleri .....	26
<b>Tablo 4. 3:</b> Değişik alaşım elementlerinin çeliğin özelliklerine etkileri .....	32
<b>Tablo 4. 2:</b> Değişik alaşım elementlerinin çeliğin özelliklerine etkileri .....	32
<b>Tablo 6. 1:</b> Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları ....	42
<b>Tablo 6. 2:</b> Deneylerde kullanılan malzemelerin akma, çekme dayanımları ve % uzamaları .....	42
<b>Tablo 6. 3:</b> I.Grup deneylerde kullanılan aşınan ve aşındıran malzemelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri .....	44
<b>Tablo 6. 4:</b> II.Grup deneylerde kullanılan aşınan ve aşındıran malzemelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri .....	44
<b>Tablo 6. 5:</b> I.ve II.Grup deneyler sonucunda farklı kayma mesafelerinde aşınan malzemelerde ortaya çıkan ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayıları .....	50
<b>Tablo 6. 6:</b> I.Grup deneylerde farklı kayma mesafelerinde, aşındıran malzemelerde oluşan ağırlık kayıpları .....	54

## SEMBOL LİSTESİ

- F** : Kuvvet  
**W** : Ağırlık  
**F<sub>s</sub>** : Statik Sürtünme Kuvveti  
**μ<sub>s</sub>** : Statik Sürtünme Katsayısı  
**μ<sub>k</sub>** : Kinetik Sürtünme Katsayısı  
**F<sub>k</sub>** : Kinetik Sürtünme Kuvveti  
**μm** : Mikrometre

## KISALTMALAR LİSTESİ

- ASLE** : American Society Of Lubrication Engineers  
**TSE** :Türk Standartları Enstitüsü  
**DIN** : Alman Standartları Enstitüsü

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince yardım ve fedakarlıklarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Bedri YÜKSEL ve Yrd. Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ'a, deney numunelerinin temininde ve deneylerin gerçekleştirilmesinde yeterli imkanı sağlayan, Beyçelik-Gestamp Kalıp Oto Yan Sanayi Pazarlama ve Ticaret A.Ş Ar-Ge Müdürü Sayın Necip CEYLAN'a, her zaman yanımda ve yardımcım olan sevgili eşim Halil İbrahim YILMAZ'a, hayatım boyunca bana güvenen ve desteklerini esirgemeyen başta babam Yazdan ÖZTÜRK olmak üzere , anneme kardeşlerime ve büyükbabama, çalışmalarım da dolaylı ve dolaysız katkıları olan herkese sonsuz saygı ve şükranlarımı sunar, teşekkür ederim.

## 1. GİRİŞ

Aşınma, hareket halinde olan ve sürtünen makine parçalarında sıklıkla karşılaşılan problemler arasındadır. Temasta olan ve birbirlerine göre relatif harekette bulunan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünmeyle hareketi engelleyici özelliğe sahip şiddeti sınırlı olan sürtünme kuvveti ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık artışıyla enerji kaybı meydana getirir. Hareket sonucu sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında oluşan aşınma karmaşık bir özelliğe sahiptir ve günümüzde önemi gittikçe artmaktadır.

Tasarım ve imalat uygulamalarında sürtünme ve aşınma malzeme seçimi açısından önemli bir rol oynarlar. Sürtünen malzemeler çoğunlukla sertlik özelliklerine göre optimize edilirler. Oysa ki sertlik tek başına aşınma için güvenilir bir tercih değildir. Sürtünme esnasında malzemede yüzey ve yüzey altı çatlakları oluşur, bu çatlaklar birleşir ve malzemeden küçük parçacıklar ayrılır. Aşınma esnasında oluşan partiküllerin sürtünmesi sonucu ince tozlar oluşur. Bunun için metaller kırılmadan önce yüksek temas gerilmelerini azaltmak için plastik olarak deforme olurlar.

Kayma çiftlerinin tribolojik davranışı, uygulanan yüke, çevre şartlarına ve mikroyapı gibi parametrelere bağlıdır. Bu demektir ki; kayma hızı, uygulanan yük, ortamın ısısı, kayma yüzeyinin son durumu, tane boyutu, tane şekli ve gözenek gibi birçok etken sürtünme ve aşınmada etkili olabilmektedir.

Otomotiv endüstrisi günümüz rekabet ortamında yer edinebilmek ve mevcut yerini koruyabilmek için kendini sürekli olarak geliştirmek ve değiştirmek zorundadır. Günlük hayatta kullanılan bir binek aracın ortalama 4000 kadar mekanik elemandan oluştuğu dikkate alındığında [1], otomotiv üreticileri için çok karmaşık üretim ve montaj süreçleri ortaya çıkar. Otomotiv endüstrisi döküm, dövme, haddeleme, sac şekillendirme, ekstrüzyon vb. çok çeşitli imalat yöntemlerini kullanarak üretilen parçaların kontrollü bir şekilde montajını yapar.

Sac şekillendirme işlemleri otomotiv endüstrisinde kullanılan önemli plastik şekil verme yöntemlerinden biridir. Otomotiv parçalarının şekillendirildiği sac metal şekillendirme kalıplarında en sık rastlanan ve istenmeyen bir durum vardır ki; bu da kalıp elemanlarının aşınmasıdır. Bu durum şekillendirme sonrası parça boyutlarının toleranslar dışında kalması ve hurdaya atılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, sac şekillendirme kalıplarında aşınmayı en aza indirebilmek için sürtünme plakaları kullanılmaktadır. Genel olarak bu plakalar, birlikte çalıştığı malzemenin sertliğinden daha düşük sertliğe sahip, ucuz ve kolay değiştirilebilir olmaları nedeniyle tercih edilirler. Ayrıca, bunların aşınmanın etkisini azaltmak için kendinden yağlamayı sağlayan özel grafitli çeşitleri de mevcuttur.

Özel grafitli SAE430B mangan bronzu otomotiv endüstrisindeki sac şekillendirme kalıplarında kullanılan bir sürtünme plakası malzemesidir. Yağlama etkisi sağlayan grafit bulunduran bu malzemede kullanım esnasında aşınma meydana geldiği zaman yenisi ile değiştirilir. Sürtünme plakaları gibi kullanılan yatak malzemelerinin, düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, iyi korozyon dayanımı, düşük ısıl genleşme gibi özelliklere sahip olması gerekir [2, 3]. Bu yönde birçok çalışmada kaymalı yatak malzemelerinin aşınma direncini geliştirme yönünde araştırmalar yapılmaktadır [4-5]. Kaymalı yatak malzemelerinin yüksek yükleme kapasitesi, iyi ısıl iletkenlik, düşük ısıl genleşme ve yabancı partikülleri gömme gibi özelliklere de sahip olması gerekir [6, 7]. Bronz esaslı alaşımlar yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, kendi kendini yağlayabilme ve iyi aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı uzun zamandan beri yatak malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [8, 9]. Literatürde ve kataloglarda grafitli SAE 430B mangan bronzunun farklı farklı malzemelerle çalışması durumunda aşınmasına dair yeterli mevcut bilgi bulunmamaktadır.

Kalıp içerisinde aşınmaya maruz kalan malzemelerin aşınma özelliklerinin yanında karşıt malzemelerin aşındırma etkileri de önemlidir. Herhangi bir malzemenin aşınma miktarı karşıdaki aşındırıcıya göre değişiklik gösterir. Bu nedenle, aşınma bir malzeme özelliği değildir ve sabit bir değeri yoktur. Bu yüzden aşınan bir malzeme incelenirken nerede kullanıldığı, hangi yüklere maruz kaldığı, hangi karşıt malzemelerle temasta olduğu, nem ve sıcaklık açısından nasıl bir ortamda çalıştığı vs. dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada Beyçelik-Gestamp A.Ş'deki otomotiv sac şekillendirme kalıplarında kullanılan grafitli SAE 430B mangan bronzunun tribolojik özellikleri kalıp içerisinde birlikte çalıştığı üç ayrı Fe esaslı malzeme (DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği, DIN GGG 70 küresel grafitli dökme demir ve DIN GG25 lamel grafitli) ile ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca, aynı şartlardaki aşınma deneyleri grafitsiz SAE 430B mangan bronzunu kullanarak yeniden yapılmış ve bu sayede aşınma çiftlerinde aşınan malzemedeki yağlamayı sağlayan grafitin aşınmaya etkisi incelenmiştir.

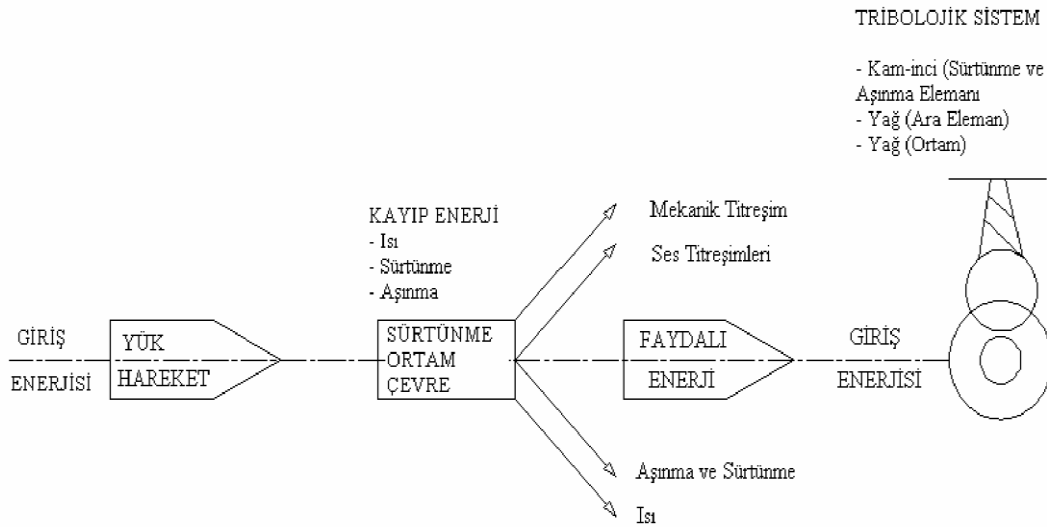
Her ne kadar aşınma olayında malzeme çiftleri aşınan ve aşındıran malzemeler olarak adlandırılırsalar da, bu tamamen kavramsal karmaşayı önlemek içindir. Çünkü aşınma olayında aşınan malzemeye göre çok az da olsa aşındırıcı malzeme de aşınma meydana gelmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada aşınan malzemelerdeki (DIN 1.2379, DIN GGG70 ve DIN GG 25) aşınma miktarları da incelenmiştir. Herbir aşınma çifti için sürtünme katsayıları kaydedilmiş, yüzey aşınma izleri görüntülenmiştir.



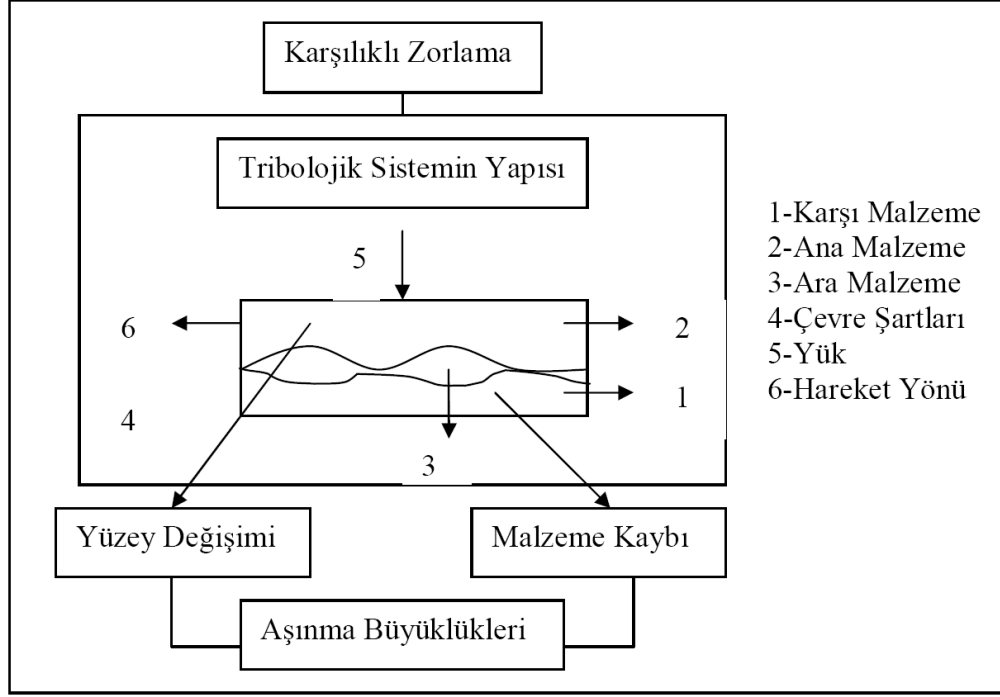
## 2. TRIBOLOJİ

Triboloji, ‘bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği’ olarak tanımlanmaktadır. Yunanca sürtünme anlamına gelen ‘tribos’ kelimesinden türetilen triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir [10].

İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır [11, 12]. Şekil 2.1’de bir tribolojik sisteme giren enerji dağılımı, Şekil 2.2’de ise tribolojik sistemin elemanları görülmektedir.



Şekil 2.1: Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı [13].



Şekil 2.2: Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi [14].

## 2.1 Sürtünme

Bir katı cismin kendisiyle temas eden başka bir katı cismin bağıl hareketine veya hareket ihtimaline karşı gösterdiği dirençtir. Birbiri ile temasta olan yüzeyler arasındaki sürtünme hareketi kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin bileşimi şeklindedir [13, 15, 16, 17, 18, 19].

Mekanik sürtünme teorisinde temel sürtünme konuları şunlardır [19]:

1. Katı cisimler arasındaki sürtünme, görünen temas alanından, yani sürtünme kuvveti sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanından bağımsızdır.

2. Sürtünme kuvveti, cisimlere gelen normal kuvvet ile doğru orantılıdır ve aralarında sürtünme katsayısı olarak bilinen sabit bir oran mevcuttur.

3. Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır.

Sürtünme katsayısının, kayma mesafesi ve süresine, sertliğe, temas yüzeyinin ortalama tane büyüklüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu çeşitli deneylerle

gösterilmiştir. Bu katsayı, artan kayma mesafesi ve süresi, yüzey tabakasının artan tane büyüklüğü ile belirli bir değere kadar artar ve daha sonra yaklaşık sabit bir değerde devam eder [13, 20].

Sürtünme, temasta olan yüzeylerin durumuna da bağlıdır. Gerçekte, temas eden yüzeyler görünen geometrik yüzeyden daha küçüktür. Bu nedenle de sürtünme görünen yüzeyden bağımsız, fakat gerçek temas alanını oluşturan pürüzlere bağlıdır. Temas eden parçalarda oluşan basınç, birbirine değen pürüz noktalarında malzemenin akma sınırını aşabilmekte ve böylece de gerçek değme yüzeylerindeki pürüzler normal kuvvetin etkisi ile sıkışarak deforme olurlar ve bunun sonucunda temas yüzeyleri de büyür. Temas eden yüzeylerin büyümesi ile birbirlerine yaptıkları basınç da o oranda büyür [15].

Birbiriyle temas halindeki iki cismin arasında meydana gelen bağıl hareket ile cisimlerin yüzeylerinin birbirini etkilemesi sonucu aşınma meydana gelir [19].

Metaller arasındaki sürtünme olayları, basit görünmekle beraber, aslında çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu olayları, izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde, birçok teori ileri sürülmüştür [21].

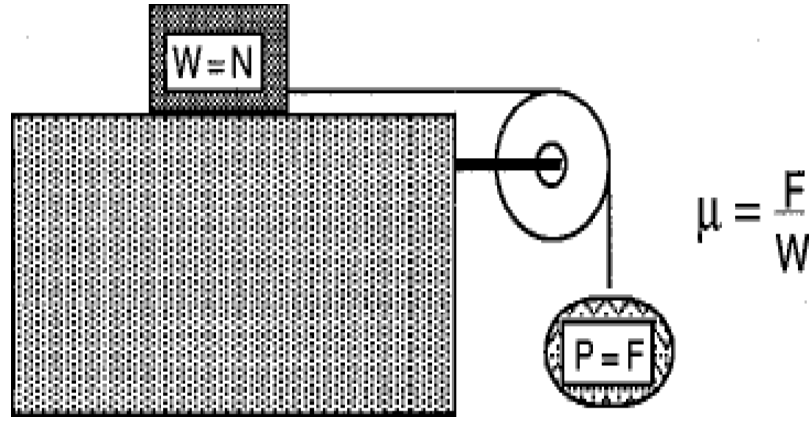
Amontons (1699), cisimleri rijit kabul ederek, sürtünmenin izahını, “Kayma esnasında parçaları, yüzey pürüzleri yüksekliğince kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısını 1/3 olarak vermiştir [22].

Coulomb (1875), Amontons’un bulduğu sonuçları doğrulamış ve ayrıca sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu da gözlemlemiştir. Bunlara ilaveten Coulomb, statik sürtünme katsayısını kaymaya başlatma kuvveti ile kinetik sürtünme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. “Coulomb Kanunu” adı verilen bu teoriye göre [23]:

- a) Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır,
- b) Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir,
- c) Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir,
- d) Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür.

Bu değerlendirmeler sonucunda asağıdaki matematiksel ifade çıkarılmıştır:

Sürtünme katsayısının ölçümünde kaymayı başlatmak için F sürtünme kuvveti ve N normal kuvvet olarak iki büyüklük bulunur. Sürtünme katsayısının ilk ölçümlerinin bazıları Şekil 2.3’de görülen ağırlıklar ve makaralı sistem düzenlenerek yapılmıştır.



Şekil 2.3: Statik sürtünme ölçümü için bir tasarım [24].

Kayma başlayıncaya kadar, yük (F) artırılır ve kayma başladığı andaki uygulanan yük sürtünme kuvveti ( $F_s$ ) olarak belirlenir. Normal kuvvet ağırlığa eşit ( $W=N$ ) olarak Kabul edilir. Statik sürtünme katsayısı ( $\mu_s$ );

$$\mu_s = \frac{F_s}{N} \quad (2.1)$$

Kinetik sürtünme katsayısı ( $\mu_k$ ) ölçümü için ise, makaralı ipe bir ağırlık ilave edilir ve salıverilir. Eğer kayma durursa, sabit kayma hızı elde edilinceye kadar yeni bir deneme için daha fazla ağırlık uygulanır. Bu durumda son yük kinetik sürtünme kuvvetidir ( $F_k$ ). Kinetik sürtünme katsayısı ( $\mu_k$ );

$$\mu_k = \frac{F_k}{N} \quad (2.2)$$

### 3. AŞINMA

Aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki değişmelerin sonucudur [19]. Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartların mevcut olması gerekmektedir.

- 1) Mekanik bir etken olması,
- 2) Sürtünmenin (bağlı hareketin) olması,
- 3) Yavaş ve devamlı olması,
- 4) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- 5) İsteğimiz dışında meydana gelmesidir.

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde mekanik etkenler ile istenilmediği halde kopan malzeme kaybıdır. Bu şekilde, yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez [19].

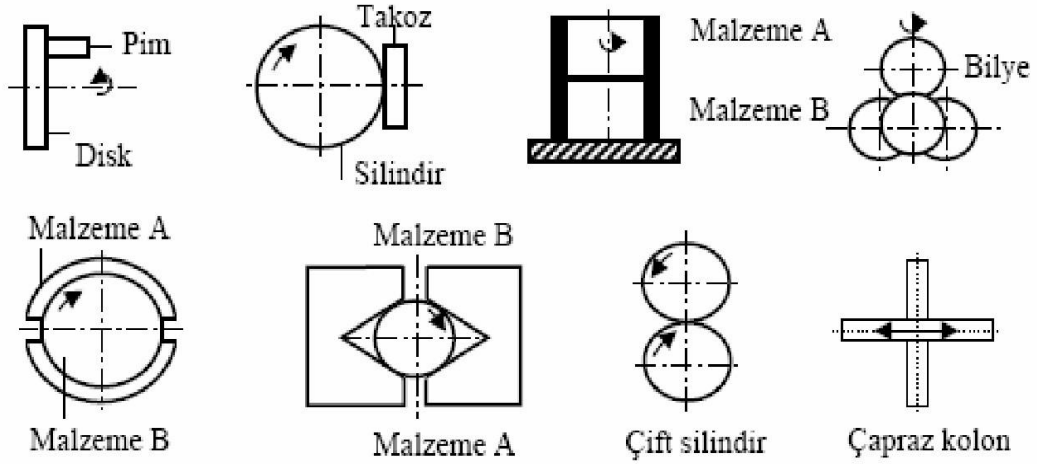
Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan ve kompleks bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide bir çok tribolojik sistemlerde görülen korozyonun ve yorulmanın yanı sıra üçüncü büyük problemdir. Bu nedenden günümüz teknik sistemlerindeki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti saklanırken enerji israfı da önlenmiş olur [23].

Aşınma, ne bir malzeme ve ne de bir malzemenin yüzey özelliğidir. Bilakis bir sistem özelliğidir. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın sürekli incelenmesi gerekir.

Aşınmanın başlaması ve devam edebilmesi için sürtünme olmalıdır. Sürtünen iki cismin temas alanı, görünen temas alanından küçüktür. En hassas işleme yöntemleriyle bile işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiçbir zaman düz değildir [17].

Çünkü imalat tekniğinde tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi imkansızdır. Yüzeyi elde etmede kullanılan kesici ve yontucu araçlar ne kadar itinayla hazırlanırsa hazırlansın, işlem sonucu elde edilen yüzey üzerinde mutlaka belirli büyüklükte pürüzlülük, yani yüzeyde birkaç mikron yüksekliğinde mikroskobik pürüzler bulunur [24]. Yüzeylerin temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki karşılıklı pürüzler etkilenir. İlk temas birkaç pürüz tepeleri arasında oluşur. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmezler. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar, yani ezilir ve bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yüklemin temas etmesi ile de pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görülen temas alanına yaklaşır [13, 18, 20]. Yüzey pürüzlüğünün artışı ile aşınma direnci azalır [25]. Temasta olan cisimlere bağlı hareket yaptırabilmek için sisteme bir enerji girer. Bu enerji yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşür [13, 18, 20].

Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribo sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması, sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen özelliklerdir. Kayma sürtünme ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilmiştir [26].



Şekil 3.1: Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri [26]

Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle şöyle sıralanabilir;

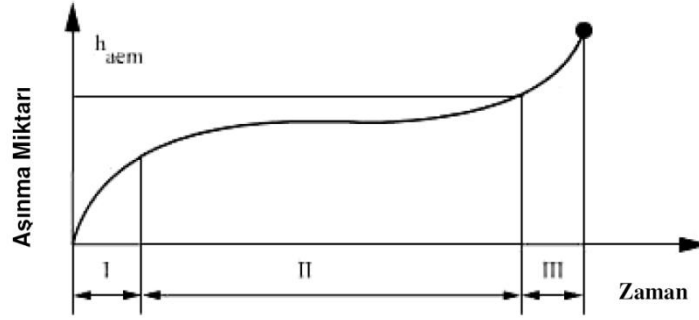
- Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılıp yapılmaması gerektiğini belirlemek, kalite kontrolünü yapmak,
- Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek,
- Malzeme kayıplarını araştırmak,
- Yeni malzeme veya sürtünme ve aşınma azaltıcı yöntemleri geliştirmektir.

### 3.1 Aşınma Zaman İlişkisi

Aşınma zaman bağlantısı Şekil 3.2’de görüldüğü gibi üç safhadan ibarettir; I. Safhada makinelerin ilk çalıştırılmaları esnada parçaların birbiri üzerinde hareketiyle şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj adı verilen bu safhada parçalar birbirine alıştırılır. Burada meydana gelen aşınma parçaların sonraki aşınma safhalarını da etkilemesi nedeniyle rodaj işleminin iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleşmesi önemli bir unsurdur.

II. Safhada çalışma devam etmektedir ve temas bölgelerinde aşınma oluşmaktadır. Bu aşınma makine elemanlarının ömürlerinin tespitinde önemli bir etkidir. Rodajdan başlayarak III. safhaya kadar aşınma doğal olarak devam eder.

III. Safha ise aşınma hızının oldukça arttığı ve parçaların kullanılmaz hale geldiği safhadır. Bu safhaya şiddetli aşınma bölgesi denilmektedir.



Şekil 3.2: Aşınmanın zamana bağlı değişimi [5].

### 3.2 Aşınma Türleri

Birçok araştırmacı, malzemelerin aşınması üzerine yaptıkları araştırmalar sonucu aşınmayı farklı farklı sınıflandırmışlardır [13, 20]. En genel olarak bilinenleri;

- 1) Adhesiv aşınma
- 2) Abrasiv aşınma
- 3) Yorulma aşınma
- 4) Korozif aşınma
- 5) Erozyon aşınma
- 6) Tabaka aşınma

En genel olarak bilinenleridir.



### 3.2.1 Adhezif Aşınma

Adhesiv aşınma, moleküler kuvvetlerin etkisi altındaki temas yüzeylerinde oluşan bölgesel kaynak bağlarının kırılması suretiyle meydana gelir. Kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkileyen bir kuvvet, temasta olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, yani bu noktalardaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklanmalarına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesiv temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur [13, 20, 28, 29].

Adhesiv aşınma sırasındaki oksitlenme olayını, korozif aşınma ile karıştırmamak gerekir. Yukarıda bahsedilen parçalanma malzeme moleküllerinin direk temasa geçmelerine imkan verir. Bunun neticesinde de bölgesel kaynak bağları oluşur (soğuk kaynama); Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir ve ergime noktasına kadar ulaşabilir. Böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parça kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest parçacıklar halinde kalabilecekleri gibi metallerden birine bağlı şekilde de bulunabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur [30].

### 3.2.2 Abrasif Aşınma

Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tarif, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasif aşınmayı kapsar [31, 32].

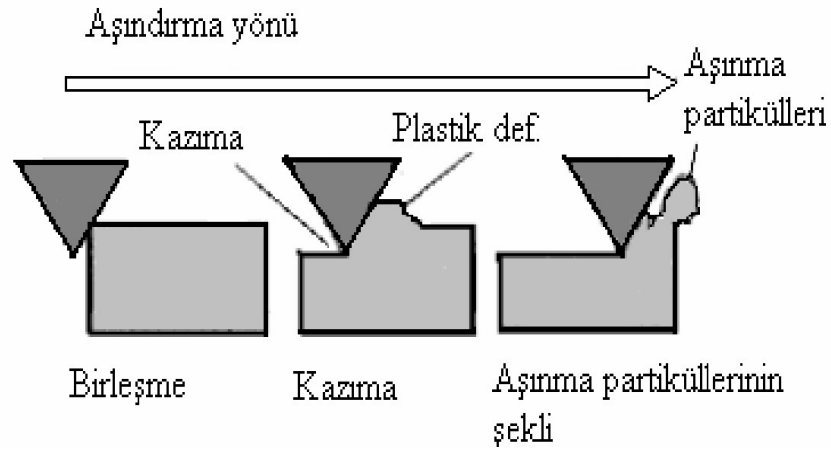
Sürtünen cisimlerin, direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasiv aşınma, ‘İki Cisimli Abrasiv Aşınma’ dır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa bu tür aşınmaya ‘Üç Cisimli Aşınma’ denir. Bu tanecikler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi aşınma enkazları da olabilirler [32].

Khrushov ve Babichev, aşındırıcı tanelerle temas eden yüzeyde iki prosesin meydana geldiğini tespit etmişlerdir [33].

1) Basıncın etkisiyle plastik şekil değiştirme sonucu çiziklerin oluşması (Metal kalkmadan, yüzeyin plastik değişmesi).

2) Mikro talaş şeklinde metal parçacıkların ayrılması (Yüzeyden mikro talaşların ayrılması).

Abrasiv aşınma, kesilme, kazınma, tek veya tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelir. Abrasiv aşınma şeması Şekil 3.3’te görülmektedir. Abrasiv aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, aşındırıcı sertliğinin aşınana malzeme sertliğinden daha fazla olması gerekir [33].



Şekil 3.3: Abrasiv aşınma şeması [34].

İki cisimli abrasiv aşınmayı göstermektedir. Daha sert olan cismin pürüzleri yumuşak olan malzemeyi çizerek mikro talaş kaldırmaktadır [33].

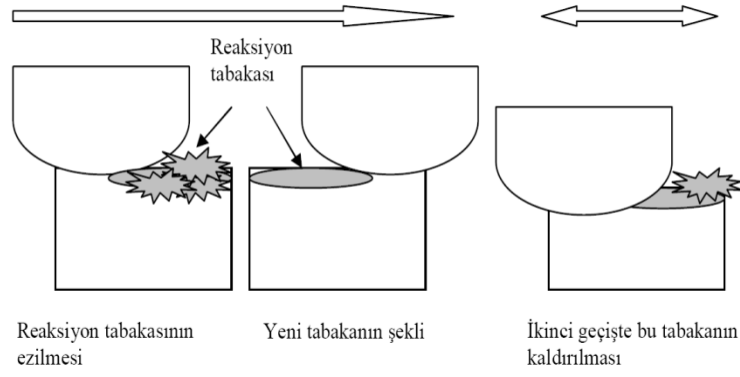
### 3.2.3 Yorulma Aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma olayı, tekrarlanan zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelir. Bu olay daima yüzeyden başlar. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanmaya maruz kaldığında veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilimlerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin sebep oldukları mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması dediğimiz pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmaları meydana gelir. Bu olay esnasında iç yapıda parçalanmalar ve yırtılmalar meydana gelerek yüzeyden kısmi çözümler olur [35].

Maksimum kopma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelir [36].

### 3.2.4 Korozyif Aşınma

Temas yapısı farklı tabakaların oluşması ve sürtünme hareketi ile bu tabakaların parçalanıp yüzeylerinde oluşan mekanik yıpranmaların yanı sıra kimyasal ve elektro kimyasal tahribatların oluşmasına korozyon denir. Metal veya metal alaşımlarının çevreleri ile (katı, sıvı ve gaz ortamlar) kimyasal veya metalurjik ilişkiden dolayı yüzeylerinde aşınma sonucu meydana gelen hasara korozyif aşınma denir. Bu aşınma için gerekli şart, korozyonun ve sürtünme hareketinin olmasıdır. Korozyif aşınma, abrasiv ve adhesiv aşınmalar ile birlikte oluşabilir. Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü sert parçacıklar halinde koparsa aşınma şiddetlenir [37]. Korozyif aşınma şeması Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4: Korozyif aşınma şeması [34].

Korozyonlu aşınmayı önlemek amacıyla;

- a) Malzeme seçimine dikkat etmek,
- b) Yüksek sertliğe ve korozyon direncine sahip kaplama malzemeleriyle yüzeyi kaplamak,
- c) Ortamın hava ile temasını kesmek,
- d) Kromat ve nitratlar gibi önleyici kullanmak, katodik koruma gibi yöntemler uygulanabilir [34].

### 3.2.5 Erozyon Aşınması

Malzeme yüzeyi ile temas ortamı arasındaki bağıl hızın yüksek değerlere ulaştığı sistemlerde malzeme yüzeylerinde görülen bozulma şekline erozyon denir. Erozyon, içinde katı tanecikler ihtiva eden bir sıvının katı cismin yüzeyine çarpması ile meydana gelir. Erozyon, (yıkama veya hidro abrasiv aşınma) akıcı maddelerin oluşturduğu aşınmadır. Sıvılar ve gazlar akış sırasında yüzeyden parçacıklar kopmasına ve girdaplar etkisiyle dalgalı bir yüzeyin meydana gelmesine neden olur. Özellikle doğrusal akımın saptırıldığı ve bozulduğu yerlerde aşınma yüksek olmaktadır. Akışkanın birlikte sürüklediği maddeler, mesela, hava içerisindeki tozlar, su içindeki kumlar ve bunlar içindeki oksitler özellikle aşındırmayı artırıcı yönde etki

yaparak malzemenin iç yapısını gevşetip, yüzeyden parçacıkların ayrılmasına neden olur [13, 18, 38].

### **3.2.6 Tabaka Aşınması**

Temas eden iki cismin izafi hareketi sırasında, hareketin başlatılması ve devamı için gerekli kuvvet farklıdır. Bu iki sürtünme hali arasındaki direnç farkı özellikle küçük kayma hızlarında sürtünme titreşimlerinin doğmasına sebep olur. Bu titreşimler, tribolojik zorlanmaların işaretidir. Tribolojik zorlanmalar sırasında bir takım olaylar meydana gelir. Temas yüzeyleri arasındaki küçük genlikli titreşimlerin sebep olduğu bir oksit filmi oluşur. Bu oluşum sürtünme ile hızlanır. Yüzeyde absorbe edilmiş bazı maddelerin reaksiyonu sonunda meydana gelen oksit tabakası da tribo oksidasyon olarak ifade edilir. Gaz veya sıvı bir atmosferdeki oksijenin kısmi basıncı oksit oluşma hızına, mukavemetine ve oksit şekline etki eder [37].

Malzeme yüzeyinde mevcut olan ve sürtünme olayı esnasında meydana gelen tabaka, ana malzemenin aşınmaya karşı olan direncini önemli ölçüde değiştirir. Bir çok hallerde çok zararlı olabilen adhesiv aşınmaya, reaksiyon tabakası oluşturmak suretiyle engel olma yoluna gidilir. Fakat genel olarak yüzeyde bu şekilde oluşan tribo oksidasyon tabakası, sürtünme ile parçalanarak aşındırıcı etkisi gösterir. Dolayısıyla aşınmayı hızlandırıcı rol oynar. Parçalanarak serbest hale geçen oksit parçacıklarının kalktığı bölgede tekrar oksitleme görülür ve olay süreklilik kazanır [13, 39].

Malzemenin bölgesel olarak aşırı zorlanan yerlerinde, fiziksel veya kimyasal değişimler sonucunda meydana gelen bir aşınmadır. Genelde uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı kabuğunda ve fren balatalarında görülür [38, 39].

### **3.3 Aşınmaya Etki Eden Faktörler**

Yapılan çeşitli çalışmalar ile aşınmaya etki eden faktörler belirlenmiştir. Ancak aralarındaki ilişki tam olarak tespit edilememiştir. Aşınmaya etki eden değişkenler ise şunlardır;

#### **3.3.1 Esas Sürtünme Elemanına Bağlı Olanlar:**

- 1) Malzemenin Cinsi
- 2) Kimyasal Bileşimi
- 3) Mikro Yapısı
- 4) Hacimsel ve Yüzeysel Sertliği
- 5) Elastiklik Modülü
- 6) Akma ve Kırılma Özellikleri
- 7) Yüzeyin Pürüzlülük Durumu
- 8) Şekli ve Boyutları
- 9) Soğuk Şekillendirme Durumu
- 10) Gördüğü Isıl İşlem

#### **3.3.2 Karşı Elemana Bağlı Olanlar:**

- 1) Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
- 2) Tane Şekli
- 3) Tane Dağılımı

### 3.3.3 Ortama Bağlı Olanlar:

1) Nem

2) Sıcaklık

Farklı yüksek basınç ve çalışma hızlarında yapılan deneyler neticesinde sürtünen yüzeyin artması ile aşınmanın hızlandığı, aynı yükte çalışma hızının artması ile aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Basınç artışına paralel olarak çalışma hızının da artması aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi artıran yük aşınmanın artmasına neden olmaktadır [31, 36].

Metal-metal sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana ve kayma yoluna bağlı olarak belirtilir. Aşınma miktarları aşınan parçanın şekil ve ağırlık değişimine ait sayısal bir büyüklük olup aşınma (olay) ve aşınma miktarı (sonuç) olarak birbirinden ayırt edilmesi gerekir. Buna göre aşınma miktarı parçanın ağırlık kaybı (gravimetrik aşınma) ve hacimsel (volumetrik) aşınma veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı olarak ifade edilir [28, 40].

### 3.4 Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Gelişen ve değişen endüstri ve sanayi alanlarında kullanılan alet ve makinelerde istenilen en önemli özellik kullanım ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini arttırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde aksamasına neden olmaktadır. Bu nedenle makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin tespiti içinde birçok laboratuvar testlerinin yapılıp daha sonra kullanılması gerekmektedir [41].

Bu malzemelerin tespiti için de bir çok laboratuvar deneylerinin yapılması gereklidir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışır. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme

işlemleri bunun üzerinde yapılabilir. Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür [41].

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür [41].

- a) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemelerinin adhesiv (metalmetal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler
- b) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler

ASLE (American Society Of Lubrication Engineers, 1978) tarafından yüz kadar test sistemi belirlenmiştir. Bu aşınma testlerinde, aşınma ölçüm yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyoizotop metotları gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu metotlar aşağıda sırayla açıklanmaktadır. Bir sürtünme sisteminde, aşınma miktarlarını ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Sürtünme elemanlarının malzeme özelliklerine ve sistemin yapısına bağlı olarak yöntem seçimi yapılmalı veya beklenenleri yerine getirecek şekilde yöntem kombinasyonu geliştirilmesi yoluna gidilmelidir. Bir ölçme yönteminde öncelikle yüksek hassasiyet, kolay ve seri uygulama ve son olarak ekonomik olması beklenen özelliklerdir [42].

### **3.4.1 Ağırlık Farkı Metodu**

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybının ölçülmesi için  $10^{-4}$  veya  $10^{-5}$  hassasiyetindeki teraziler kullanılır. Aşınma miktarı gram veya miligram olarak bulunur. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması gerekir, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması, bu yöntemin dezavantajıdır.



### **3.4.2 Kalınlık Ölçme Metodu**

Aşınma esnasında oluşacak boyut değışikliğinin ölçülmesi, baslangıç değerinin karşılaştırılması ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile  $\pm 1 \mu\text{m}$  duyarlıkta ölçülebilir.

### **3.4.3 İz Değişiminin İzlenmesi Metodu**

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değışimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değışme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir.

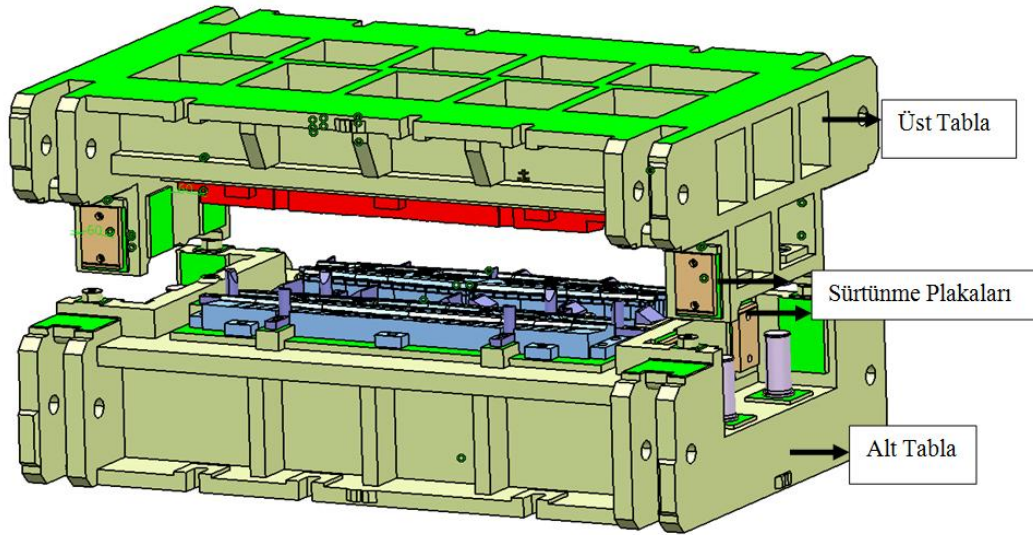
### **3.4.4 Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu**

Sürtünmenin yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü  $\alpha$  - parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınma miktarının yüksek derecede hassasiyetle ölçülmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değistirmeden ölçü alınabilmesi en büyük avantajıdır [43].

## 4. GENEL BİLGİLER

### 4.1 Sürtünme Plakaları

Sac metal parçaların şekillendirmesi için metal şekillendirme kalıpları kullanılmaktadır. Sac metal şekillendirme kalıpları alt ve üst tabla olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Kalıplarda alt tabla; alt grubun tüm diğer kalıp elemanları üzerine monte edildiği kısımdır. Üst tabla; üst grubun temel elemanıdır, fonksiyonel açıdan alt tablanın benzeridir. Örnek kalıp resim Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1: Örnek kalıp resmi

Kalıplarda merkezleme çok önemlidir. Merkezlemenin amacı kalıbın alt ve üst tablalarının tam örtüştürülmesi ile istenilen şekil verme işleminin tam gerçekleşmesini sağlamaktır. Merkezleme amacıyla, mil-burç ikilisinin yanında, döküm kızak ve sürtünme plakaları da kullanılabilir. Özellikle yanal kuvvetlerin oluşma ihtimalinin olduğu yerlerde döküm kızaklarla birlikte sürtünme plakaları tercih edilmektedir. Sürtünme plakaları yanal kuvvetlerin dengelenmesi, kalıbın merkezlemesinin sağlanmasının yanı sıra birçok yerde kullanılmaktadır. Kalıplarda kullanılan hareketli mekanizmaların içerisinde de kamlarla birlikte yataklama amaçlı

kullanılmaktadır. Sürtünme plakaları kesme, çekme, ütüleme, açınımlı kesme, kamlı bükme gibi çoğu kalıplarda farklı farklı işlevler amacı ile kullanılmaktadır, sürtünme plakalarının kalıp içerisindeki konumu; Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2: Sürtünme plakasının kalıp içerisindeki konumu

Üretim sektöründe kullanılan malzemeyi tanımak kaliteli ve istenilen ürünü elde etmek için önem teşkil etmektedir. Kalıplarda kullanılan malzemelerden en az kayıpla faydalanmak gerekmektedir. Özellikle kalıp içerisinde temas halinde sürtünen malzemelerin aynı olması fazla sürtünme, ısı oluşumu gibi sorunlar çıkarabilmektedir. Bu nedenle kalıp içerisinde birbirleri ile temas halinde çalışan yüzeylerde, sürtünme plakalarının olduğu kısımda bir yüzey çelik diğer yüzey çoğunlukla mangan içeren bronz kullanılmaktadır. Mangan elementi bronz içerisinde sürtünmeden kaynaklanan ısının atılmasında rol oynar. Genellikle malzemesi SAE 430B (CuZn25Al5) olan sürtünme plakaları, bronz plakalar halinde alındıktan sonra grafit yerleştirilmesi için homojen olarak işlenir, özel bir yapıştırıcı ile grafitler uygun yerlere montajlanır. Şekil 4.3’te görüldüğü gibi kullanıma hazır olarak son şeklini alır.

Sürtünme plakaları bronz ve kendinden yağlamayı sağlayan özel grafitli çeşiti kullanılır. Çünkü bronz malzeme özelliği itibari ile çelikden daha yumuşak bir malzeme yapısına sahiptir. Malzemeler birbirleriyle temas ederek çalıştıklarında genellikle sert malzeme yumuşak malzemeyi aşındırmaktadır. Dolayısıyla kalıp içerisinde sürtünme plakası ile temas halinde olan çeliğin değiştirilmesi daha maliyetli ve zor olduğundan, değiştirilebilen sürtünme plakaları kullanılmaktadır. Sürtünme plakalarının kendinden yağlama özelliği olduğundan aşınma dirençleri

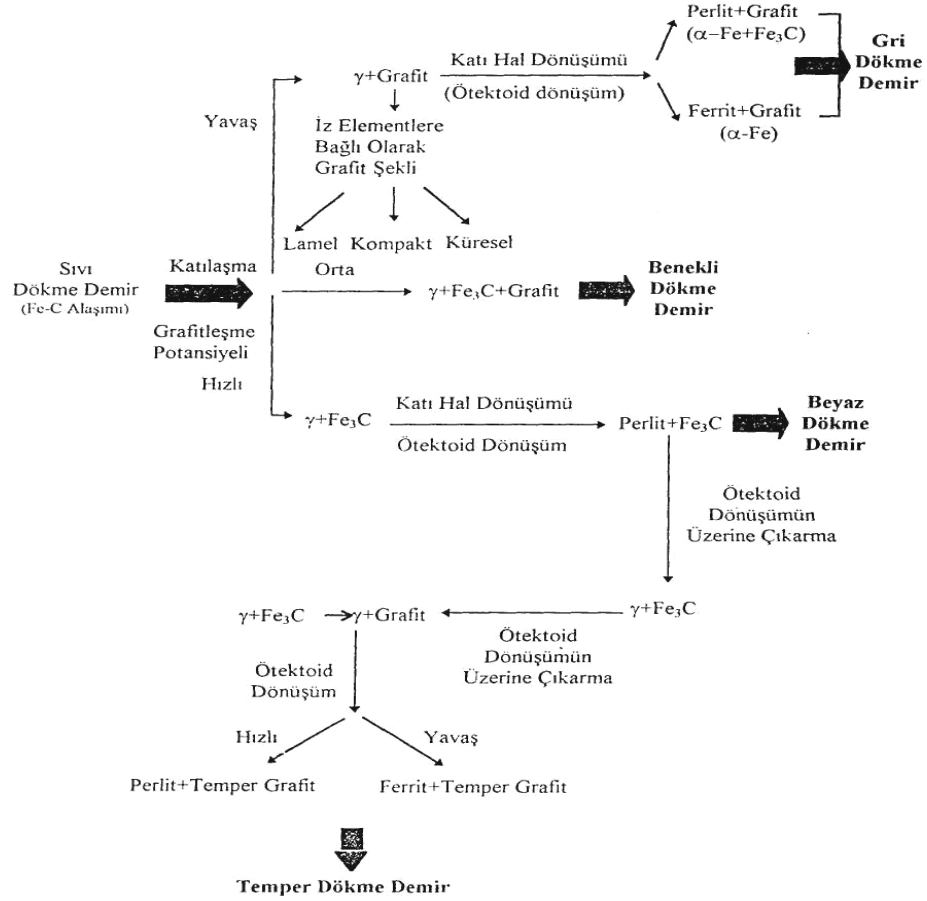
yüksektir. Ancak her malzemenin bir kullanım süresi bulunmaktadır. Kalıba tasarım sırasında eklenen sürtünme plakaları kalıp kullanımda olduğu süre boyunca (5-10 yıl) devrede kalmaktadır. Her malzemenin aşındırma ve aşınma oranları farklıdır. Dolayısı ile yapılan çalışmada sürtünme plakaları ile birlikte çalışan 1.2379 , GG25 ve GGG70 malzemelerinin aşınma deneylerinin gerçekleştirilerek aşınma kayıpları tespit edilmiştir. Bilimsel olarak ulaşılan değerler sonucunda ortaya çıkan bilgiler kalıpcılık alanında sürtünme plakalarının kullanım şartlarına ışık tutması amaçlanmıştır.



Şekil 4.3: Grafitli sürtünme plakası

## 4.2 Dökme demirler

Dökme demir, demir-karbon-silisyum alaşımıdır. Bileşimindeki karbon % 4,00 ve silisyum % 3.50'ye kadar olabilir. Bileşiminde karbon ve silisyumdan başka manganez, fosfor ve kükürt bulunur. Dökme demirlerin sınıflandırılması genellikle mikroyapıya göre yapılmaktadır. Dökme demirlerin mikroyapısını, bileşimindeki karbon miktarı, alaşım elementi veya empürite miktarı, katılaşma sırasında veya sonrasında soğuma hızı ve döküm sonrası ısıl işlem gibi dört faktör etkilemektedir. [44]. Bileşimindeki elementlere bağlı olarak özgül ağırlığı ortalama  $7,3 \text{ kg/dm}^3$ , ergime sıcaklığı  $1130-1200 \text{ }^\circ\text{C}$  ve döküm sıcaklığı  $1300-1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Dökme demir kırılgandır. Yüksek sıcaklığa kadar kızdırılarak dövülseler de bu kırılganlık kaybolmaz. Esnek değildir. Basınca dayanımı fazladır. Yaygın olarak kullanılan dökme demir türleri, yapıları ve üretimleri şematik olarak Sekil 4.4'de verilmektedir.



Şekil 4.4: Dökme demirlerin mikroyapılarına göre sınıflandırılması [45].

Dökme demirlerin sınıflandırılması ilk olarak kırılmalıklarına göre yapılmıştır. Bu sınıflandırmada dökme demirler; beyaz dökme demir ve gri dökme demir olarak ikiye ayrılmaktadır. Diğer bir sınıflandırma ise malzemenin mikroyapı ve kütleel özelliklerine göre yapılmaktadır. Dökme demirlerin mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre sınıflandırılması Tablo 4.1’de verilmektedir [46].

Tablo 4.1: Mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması [46].

Dökme Demir Sınıfları	Karbonca Zengin Faz	Matris <sup>(a)</sup>	Kırılma Rengi	Nihai Yapı Sebebi
Gri dökme demir	Lamel grafitli	P	Gri	Katılma
Küresel grafitli dökme demir	Küresel grafitli	F,P,O	Gümüş gri	Katılma + ısı işlem
Kompakt grafitli dökme demir	Kompakt vermiküler grafitli	F,P	Gri	Katılma
Beyaz dökme demir	Fe <sub>3</sub> C	P,M	Beyaz	Katılma + ısı işlem <sup>(b)</sup>
Vermiküler grafitli dökme demir	Lamel grafitli + Fe <sub>3</sub> C	P	Benekli	Katılma
Temper dökme demir	Temper grafitli	F,P	Gümüş gri	Isıl işlem
Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir.	Küresel grafitli	B	Gümüş gri	Isıl işlem

a) F; ferrit, P; perlit, O; ostenit, M; martenzit, B; beynit, b) Beyaz dökme demir genellikle ısı işlemisizdir, fakat kalıntı gerilmeleri gidermek ve ostenitik dönüşümü sağlamak için ısı işlem yapılabilir.

Grafit şekline göre dökme demirler; lamel grafitli, küresel grafitli ve temper grafitli olarak, matris yapısına göre ise; ferritik, perlitik, ferrit+perlitik, ostenitik, martensitik ve beynitik dökme demirler olarak sınıflandırılmaktadır [45, 46].

Ayrıca, dökme demirlerin farklı bir sınıflandırılması da; geleneksel dökme demirler ve özel dökme demirler şeklindedir. Geleneksel dökme demirler, genel uygulama amaçlı kullanılan alaşımsız veya düşük alaşımlı dökme demirlerdir. Alaşımsız dökme demirlerin kimyasal bileşim aralıkları yüzde ağırlık olarak Tablo 4.2’de verilmiştir. Özel dökme demirler ise, özel uygulamalar için kullanılan yüksek alaşımlı dökme demirlerdir [45, 46].

Tablo 4.2: Değişik tipteki dökme demirlerin kimyasal bileşimleri

Elementler	Lamel grafitli dökme demir %	[*] Beyaz Dökme Demir %	Yüksek Dayanımlı Esmer Dökme Demir %	[**] Küresel Grafitli Dökme Demir %	[***] Temper Dökme Demir %
Karbon	2,50–4,00	1,80–3,60	2,80–3,30	3,00–4,00	2,00–3,00
Silisyum	1,00–3,00	0,50–1,90	1,40–2,00	1,80–2,80	1,00–1,80
Manganez	0,40–1,00	0,25–0,80	0,50–0,80	0,15–0,90	0,20–0,50
Fosfor	0,05–1,00	0,06–0,18	0,15 Max.	0,10 Max.	0,01–0,10
Kükürt	0,05–0,25	0,06–0,20	0,12 Max.	0,03 Max.	0,02–0,17

[\*] Isıl işlem ile temper dökme demire dönüştürülür.

[\*\*] Bileşiminde 0,01–0,10 magnezyum bulunmaktadır.

[\*\*\*] Bileşiminde % 0,0005–0,0050 boron ve % 0,0005–0,0150 alüminyum bulunmaktadır.

#### 4.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD)

Küresel grafitli dökme demirler, % 3,5-3,9 oranında karbon ve % 1,8-2,8 oranında silisyum içeren üçlü Fe-C-Si alarımlarıdır. Lamel grafitli dökme demirden farklı olarak KGDD’de grafit küre şeklindedir [47].

1948 yılında dünyada kullanımı başlanan KGDD, bu tarihten yaklaşık 20 yıl sonra ülkemizde üretilmiştir. 1970’den itibaren üretimi artan KGDD, mühendislik açısından çeliğin birçok avantajını ve dökme demirlerin ekonomik talaşlı işlenebilme özelliğini bir araya getirmektedir. Bu üstün özellikleri sayesinde, kır dökme demir, temper dökme demir ve çelik döküm yerine kullanılır. Yüksek mukavemet ve iyi aşınma direnci istenilen birçok yerde geniş kullanım alanına sahiptir. Örneğin otomobillerde kam ve krank milleri, disliler ve fren disk kampanaları küresel grafitli dökme demirden üretildiğinde daha iyi sonuç vermektedir. Bunların KGDD ile üretilmesinin sebebi üstün işlenebilirlik özelliği ve elastisite modülünün yüksek

olmasıdır. Ayrıca çeliğe göre kıyaslandığında daha yüksek aşınma direnci göstermesidir [48].

Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanını genişleten bir başka sebep ise KGDD'in çeliğe uygulanan ısı işlemlere benzer işlemlerle istenilen mekanik özelliklere sahip olabilmesidir [49].

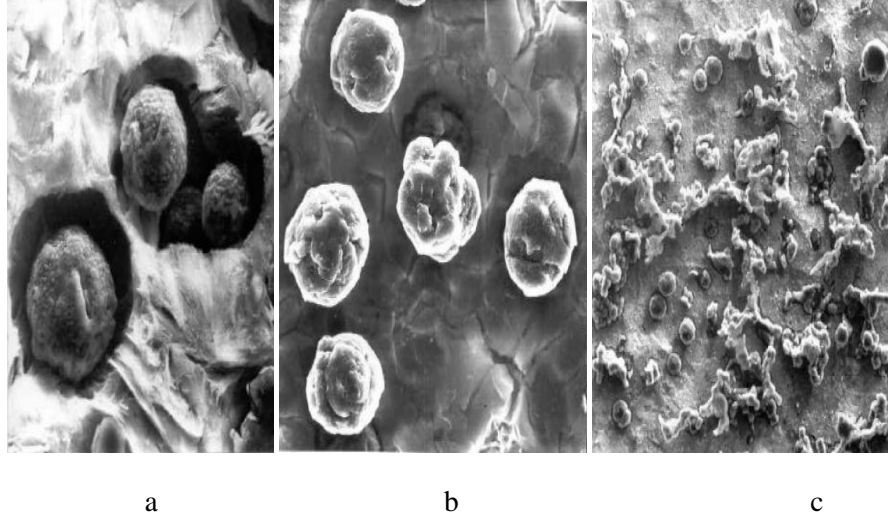
Dökme demirlerin plastik şekil alma kabiliyetleri çok düşüktür. Bu sebeple şekil değiştirme işlemine tabi tutulmazlar. Bununla beraber, dökme demirler kolayca ergitilebilirler ve çok karmaşık şekilli parçaların üretilmesine imkân tanırırlar. Bilinen dökme demirler, çeliklerden daha düşük mukavemet özellikleri sergilerken, çeliklere nazaran maliyetleri çok daha düşüktür [44, 45].

Aynı zamanda nodüler, sfero ve düktil demir gibi isimlerle de anılan bu tür dökme demirlerde karbon, grafit küreleri halindedir. Karbonun lamelden küre haline geçisini sağlamak için ergimiş demir, döküm öncesinde aşılama işlemine tabi tutulmaktadır. Küreler katılma sırasında oluşturulduğu için temper dökme demirden farklıdır. Ayrıca grafit şeklinin lamel yerine küre oluşu da, dökme demire süneklik ve mukavemet kazandırmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerde grafitlerin küresel olması, lamel yapıları grafitlerin keskin köşelerinde gerilim yükselmesi ve çatlak oluşmasını engellemektedir [50].

Mühendislik malzemeleri içerisinde KGDD'ler, demir esaslı malzemeler içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. İyi dökülebilirlik ve yüksek mukavemetin yanında, küre şekilli grafitler, yapıda yağlayıcı görevi görmektedir. Küresel grafitli dökme demirden yapılmış krank milleri, merdaneler ve dişliler aşınmaya dirençli karbon çeliğine alternatif olmuşlardır [51].

İç yapıda grafit küre halinde bulunur. Matris yapı ferritik, perlitik, ferlitik-perlitik veya beynitik olabilir. Şekil 4.5'de KGDD'in grafit ve matris yapısını gösteren örnek iç yapısı verilmiştir.





Şekil 4.5: KGDD'in mikro yapısı

a-) Sferoid yapı, Büyütme: x 600 (20  $\mu$ m), Dağlama % 2 nital b-) % 50 ferritik % 50 perlitik yapı, Büyütme: x 500 (20  $\mu$ m), Dağlama % 2 nital c-) Ferritik yapı, Büyütme: x 200 (50  $\mu$ m), Dağlama % 2 nital [52].

Küresel grafitli dökme demir içerisinde bakır, krom, nikel, vanadyum ve bor gibi alaşım elementleri bulunabilir. Malzemelerin oluşumunda içerisinde bulunan her bir alaşım elementi farklı özelliklerin oluşturulmasını sağlamaktadır. Küresel grafitli dökme demir içerisinde bulunan elementlerin etkisi aşağıdaki şekilde açıklanmıştır.

**Karbon:** KGDD bileşiminde % 3-4 karbon bulunmaktadır. Karbon miktarının artması grafit kürelerinin sayısının artmasına sebep olur. Ayrıca döküm kabiliyetinin artmasına neden olur [53].

**Silisyum:** KGDD içerisinde silisyum miktarı % 1,8-2,8 arasındadır. Silisyum ötektoid dönüşümde oluşan ferrit'in oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde de önemli artış meydana getirir. Bunun yanında sünek-gevrek geçiş sıcaklığını da yükseltir. Bu nedenle maksimum tokluğun ve sünekliğin sağlanması için silisyum oranı % 2'nin altında tutulmalıdır [54].

**Manganez:** Özellikle kalın kesitli dökümlerde manganez tane sınırı karbürlerinin oluşumunu teşvik eder. Bunun sonucunda ise süneklik ve tokluk düşer. Ferritik döküm yapısı istenen KGDD malzemelerde manganez oranının % 0,2 tutulması sonucunda maksimum süneklik elde edilmesi için gereklidir. Ayrıca perlitik döküm yapısı sağlamak için manganez oranı % 1'e kadar çıkabilir [54].

Fosfor: Yapıda steadit fazı oluşturarak kırılabilirliği artırır. Bu nedenle yapıda maksimum % 0,05 olarak sınırlandırılmalıdır [52].

Kükürt: Grafitleri küreşelleştirmek için kullanılan magnezyum miktarının daha fazla kullanımını gerektirdiği için bileşimi, magnezyum işlemi öncesinde % 0,02 veya daha az bir seviyeye indirilmelidir [53].

Bakır: Malzemede işlenebilirliği artırmak ve tokluğun yanı sıra yüksek mukavemet sağlar [53, 54].

#### **4.2.2 Lamel Grafitli Dökme Demirler**

Katılaştıktan sonra bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest grafit yaprakları (lamel-pul) halinde bulunan bir dökme demir çeşididir. Kırıldığı zaman yüzeyi isli gri görünüşlüdür. Grafitten dolayı rengi esmer olan bu dökme demire lamel grafitli dökme demir denir.

Bünyesinde %2 'nin üzerinde karbon ihtiva eder. Bu karbonun büyük bir kısmı lamel grafit halinde bulunur. Genel olarak ocaklarda ham demir ve hesaplanmış bir şekilde döküm hurdaları, yolluk ve çelik hurdasının ergitilmesiyle elde edilir. Ortalama döküm sıcaklığı 1200-1400 °C arası, çekme payı %1 civarındadır.

Lamel grafitli dökme demirin bileşiminde ana yapısı demirden başka karbon, silisyum, manganez, fosfor ve kükürt bulunur. Bileşiminde bulunan bu elementler genel olarak ham demir (pik)'den gelmektedir. Kükürt, Lamel grafitli dökme demirin içinde bulunması arzu edilmeyen bir elementtir. Fosforun ise pek az miktarı faydalıdır.



Şekil 4.6: Lamel grafitli dökme demirin yapısında grafit dağılımı

Lamel grafitli dökme demir mikroskopla incelendiğinde, yapısı içinde dağılmış grafit yaprakları görülür. Bu grafit yapraklar, kalın kesitli döküm parçaların yapısında gözle bile görülebilir özelliktedir. Lamel grafitli dökme demir mikroskopla incelendiğinde görülen yapı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Lamel grafitli dökme demirin kullanım sahası, dökümü yapılan diğer metal ve alaşımlardan daha geniştir. Bu dökme demirler ince şekillerdeki parçaların dökümlerine elverişlidir. Mekanik dayanımı iyi olan lamel grafitli dökme demirin dökülerek şekillendirilmesi de ucuzdur. İşlenmesi kolaydır. Bu nedenle otomotiv sanayinde, fırın ve ocak parçalarında, radyatörlerde ve makine gövdelerinde ve pek çok sanayi kolunda rahatlıkla kullanılır.

Lamel grafitli dökme demir, bütün dökme demirler arasında en akıcı olanıdır. Bunun için piston bilezikleri motor gövdeleri, radyatörler ve karmaşık şekilli parçaların dökümünde kullanılır. Lamel grafitli dökme demirin akıcılığı bileşiminde bulunan elementlerin miktarına ve döküm sıcaklığına bağlıdır. Lamel grafitli dökme demirin ergimiş haldeki sıcaklığı ne kadar yüksek olursa katılaşması da o kadar geç olur. Buna bağlı olarak da akıcı hale gelir. Bileşimindeki fosfor miktarı da akıcılığını artırır.

Sertlik, lamel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimine bağlıdır. Soğumanın hızlı olduğu zamanlarda bu dökme demirin sertliği artar. Soğumanın hızlı veya yavaş olması döküm parçanın kesit kalınlıklarına bağlıdır. Kesit kalınlıkların incelenmesine göre lamel grafitli dökme demirin sertliğinin pratik olarak kontrol etmek kolaydır. Normal lamel grafitli dökme demirin sertliği 120-200 Brinell, alaşımlı esmer dökme demirin sertliği ise 600 Brinell kadar olur.

### 4.3 Takım Çelikleri

Takım çeliklerinin bugünün modern endüstrisindeki yeri kolayca takdir edilebilmektedir. Takım çeliklerinin çok yüksek sertlikleri, aşınma ve oksitlenmeye dayanıklılıkları ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyabilmeleri en önemlileri arasında gelmektedir. Üretim aşamasının en kritik ve en önemli unsurlarından biri kullanılan takım ve kalıplardır. Bunlar üretim maliyetinden üretilen ürün kalitesine kadar birçok faktörü etkilerler. Yaptığı tasarımın ve işlemenin kalitesine güvenen üretici için tek bir bilinmez vardır, bu da kullandığı kalıp ve takım malzemesidir.

Takım çelikleri sahip oldukları 0,8-1,5% karbon içeriği ile Karbon Çeliği olarak ele alınır ve oldukça zor yöntemler ile üretilirler [55]. Takım çeliklerinin pek çoğu su verme ve temper ısı işlemi ile yüksek sertlik elde edilebilen yüksek karbonlu çeliklerdir.

Kullanım alanları talaş kaldırma işlemleri için kesme takımlarını, döküm kalıplarını, şekillendirme kalıplarını ve yüksek dayanım, sertlik, tokluk veya yüksek sıcaklık direnci gibi özellik kombinasyonları gerektiren diğer uygulamaları içerir [56]. Bu çelikler, metal veya metal olmayan malzemelerin değişik yöntemlerle (talaşlı, talaşsız) şekillendirilmesinde kullanılır [57].

Takım çelikleri,

- Yüksek Mukavemet,
- Yüksek Sertlik,
- Yüksek Aşınma Direnci,
- Yüksek Sertleşebilirlik,
- Yüksek Süneklik,
- Yüksek Tokluk,
- Yüksek Sıcaklık Özellikleri,
- Yüksek Isıl İletkenlik,
- Düşük Isıl Genleşme,
- Yüksek İşlenebilirlik,
- İyi Parlatılabilirlik özelliklerine sahip çeliklerdir.

Takım çelikleri, karbondan başka farklı oranlarda alaşım elementleri de içerirler. Çelikte alaşım elementleri, çeliğin dayanımını arttırmaya yardımcı olurlar. Bu, üretilen sıcaklıklar ve takımın rol oynayan gerilmelerin her ikisini de etkiler. Bununla beraber, metali kesmek için gereken kuvvet daha büyüktür. Takımda ortalama gerilme, her zaman alaşım elementlerinin eklenmesi ile daha yüksek olur [58].

Alaşım elementi ilavesiyle takım çeliklerinin özellikleri çok katlı olacak şekilde değiştirilebilir. Ya demir kafesinde çözülen ya da özel karbür teşekkülü için katılan alaşım elemanları çeliğin sertleşebilirliğini, meneviş dayanımını, sertliğini, sünekliğini ve aşınma direncini farklı ölçüde iyileştirilebilirler. Önemli alaşım elemanlarının herbirinin takım çeliklerindeki özel etkisi Tablo 4.3’ te görülmektedir [59].

Tablo 4.3: Değişik Alaşım Elementlerinin Çeliğin Özelliklerine Etkileri

ELEMENT	ÖZELLİK	SERTLEŞEBİLİRLİK	AŞINMA DAYANIMI	TOKLUK	MENEVİŞ KALICILIĞI	SICAK SERTLİK	BOYUT KALICILIĞI
		(+)	+++	---	+	(+)	o
	KARBON C	(+)	+++	---	+	(+)	o
Karbür Meydana Getirir.	Krom Cr	++	++	(-)	+	+	+
	Molibden Mo	+	++	-	++	++	+
	Vonadyum V	+	+++	-	++	++	+
	Volfram W	+	++	-	++	++	+
Karbür Meydana Getirmez.	Nikel Ni	+	o	++	o	o	+
	Kobalt Co	-	o	-	+	+	o
	Manganez Mn	+	o	+	o	o	+

## 5. YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimlerinin, mekanik özelliklerinin (çekme ve sertlik), yüzey kalitelerinin ve aşınma özelliklerinin hangi yöntemlerle, nasıl incelendiği anlatılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan makine, ölçü aleti ve cihazların teknik özellikleri anlatılmış daha sonra da deneylerin yapılış biçimleri ve işlem aşamaları açıklanmıştır.

### 5.1 Deneysel Malzemeler ve Kimyasal Bileşim

Aşınma deneylerinde aşındırıcı malzeme olarak üç ayrı Fe-C alaşımı kullanılmıştır. Bunlar; DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği, DIN GGG70 küresel grafitli dökme demir ve DIN GG25 lamel grafitli dökme demirdir. GGG70 ve GG25 dökme demirlere 650<sup>0</sup>C'de 4 saat gerilim giderme tavlama uygulanmıştır. 1.2379 çeliğine 800<sup>0</sup>C'de 3 saat yumuşatma tavlama uygulanmıştır. Aşınan malzeme ise SAE450B kendinden yağlamayı sağlayan grafitli mangan bronz ve grafitsiz SAE430B olarak seçilmiştir. Aşınan ve aşındıran bu malzemeler, otomotiv endüstrisinde sac şekillendirme kalıplarında (bkz. Şekil 4.1) yaygın olarak kullanıldığından tercih edilmişlerdir.

Malzemeler Beyçelik-Gestamp A.Ş tarafından tedarik edilmiştir. Malzemelerin kimyasal bileşim analizleri Beyçelik-Gestamp A.Ş kalite laboratuvarında yapılmıştır. Spektrel analiz için numuneler zımparalama işleminden sonra Spektromax marka spektrometre cihazı ile incelenmişlerdir (bkz. Şekil 5.1)



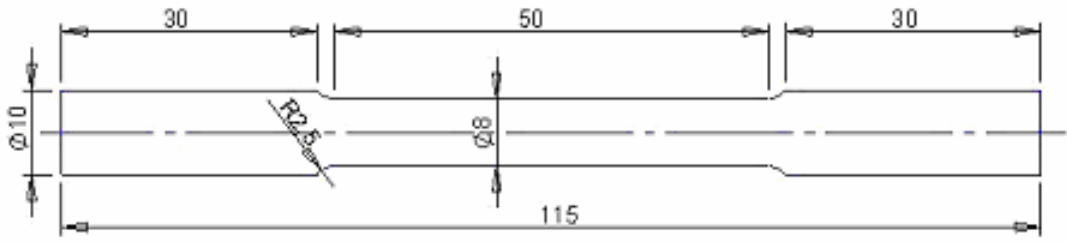
Şekil 5.1: Spektral analiz cihazı.

## 5.2 Çekme Deneyleri

Çekme deneyleri Beyçelik-Gestamp A.Ş kalite laboratuvarında bulunan 10 ton kapasiteli Zwick/Roel marka çekme cihazında 5 mm/dk. çekme hızı ile yapılmıştır. Çekme deney cihazı Şekil 5.2’de görülmektedir. Deneylerde TSE 138 standardına uygun olarak hazırlanan ve ölçüleri Şekil 5.3’te verilen çekme numuneleri kullanılarak her bir malzeme için 5 adet test yapılmış ve değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.2: Çekme deneyi cihazı

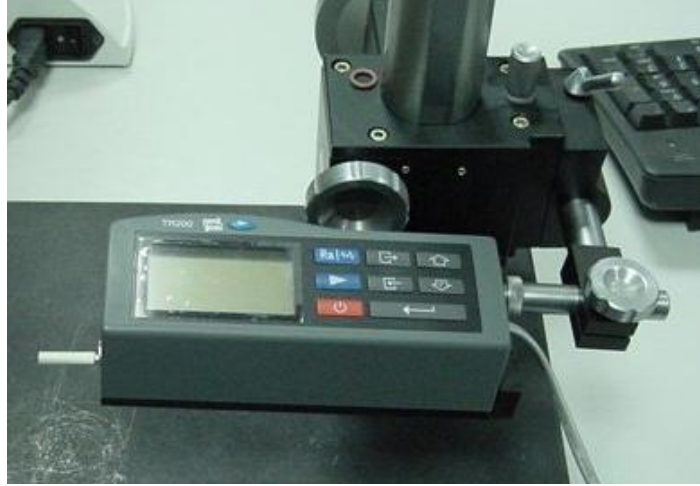


Şekil 5.3: Çekme numunesi şekil ve boyutları



### 5.3 Yüzey Kalitesi ve Sertlik Deneyleri

Malzemelerin yüzey kalitelerini belirlemek için Ermir Makine A.Ş' de TIME marka TR200 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazında ölçümler yapılmıştır. Kullanılan pürüzlülük ölçüm cihazı Şekil 5.4' de görülmektedir.



Şekil 5.4: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Aşınan ve aşındıran malzemelerin vikers sertlik deneyleri 1kg yükün tepe açıcı  $136^0$  olan elmas uç ile 20 saniye süreyle uygulanması sonucu Metkon MH3 sertlik ölçüm cihazında TS139 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir sertlik değeri için en az üç ölçüm yapıp, değerlerin ortalaması alınmıştır. Kullanılan sertlik cihazı Şekil 5.5' te verilmiştir.



Şekil 5.5: Vickers sertlik ölçüm cihazı

#### 5.4 Metalografik İncelemeler

Aşındıran Fe-C alaşımı malzemelerin ve aşınan SAE430B mangan bronzunun iç yapılarını incelemek için yüzeyler oda sıcaklığında (+25<sup>0</sup>C ) standart metalografik yöntemlerle (zımparalama+parlatma) hazırlandıktan sonra, Fe-C alaşımı malzemeler % 2 nital çözeltisi ile dağlanmışlardır. Aşınan SAE430B mangan bronzu ise NH<sub>4</sub>OH-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözeltisi ile dağlanmıştır.

İç yapı görüntüleri, Ermir Makine A.Ş' de Nikon marka Eclipse LV150 optik mikroskop yardımıyla 50x, 100x ve 500x büyütmelerde elde edilmişlerdir. Deneylerde kullanılan optik mikroskop Şekil 5.6'da verilmiştir.

Aşınma deneyleri esnasında belirli kayma mesafelerinden (5000m, 10000m, 15000m) sonra numunelerin aşınan yüzeyleri yine aynı mikroskop ile 50x ve 100x büyütmelerde incelenmiştir. İnceleme işleminden önce numunelerin yüzeylerine alkol ile temizleme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 5.6: Optik Mikroskop

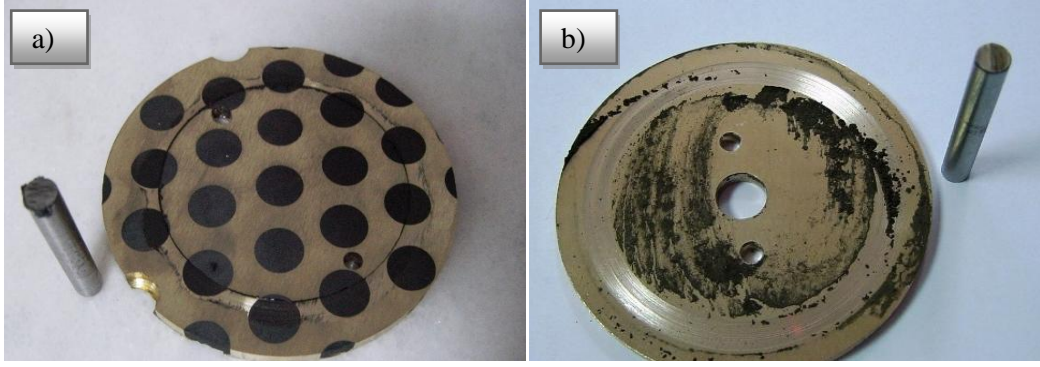
## 5.5 Aşınma Deneyleri

Malzemelerin tribolojik özelliklerini belirlemek için, Şekil 5.7’de gösterilen Er-mir A.Ş tarafından tasarlanan Pin-on-disk aşınma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.7: Aşınma test cihazı

Aşınma deneyleri kullanılan aşınan malzemeye göre iki farklı grup altında incelenmiştir. I. grup deneylerde aşınan malzeme olarak kendinden yağlamayı sağlayan özel grafitli SAE430B mangan bronzu, II. grup deneylerde ise SAE430B mangan bronzu kullanılmıştır. I. ve II. Grup deneylerde kullanılan aşınma çiftleri (pim+disk) Şekil 5.8’ de verilmiştir.



Şekil 5.8: a) I.Grup deneylerde kullanılan kendinden yağlamayı sağlayan grafitli SAE430B mangan bronz disk ve pim aşınma çifti. b) II.Grup deneylerde kullanılan SAE430B mangan bronz disk ve pim aşınma çifti.

Aşınma deneyleri, oda sıcaklığında, kuru ortamda 15 N normal yük altında ve 60 mm/sn kayma hızında 5000m, 10000m ve 15000m kayma mesafelerinde gerçekleştirilmiştir. Üç ayrı kayma mesafesinde cihaz durdurulup numuneler alkol ile temizlendikten sonra  $10^{-4}$  gram hassasiyetli terazide pin (Fe-C alaşımları) ve disk (mangan bronz) numunelerdeki ağırlık kayıpları ayrı ayrı ölçülmüştür. Aşınan (disk) ve aşındıran (pin) numune boyutları sırası ile Ø60mm x 10mm ve Ø6mm x 50mm olarak aşınma cihazına uygun hazırlanmışlardır.

Ağırlık kayıplarının ölçüldüğü kayma mesafelerinde aşınan ve aşındıran numune yüzeylerindeki aşınma izleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Ayrıca aşınma deneyleri esnasında sürtünme katsayısı değerleri de aşınma cihazı tarafından kaydedilmiştir. Sürtünme kuvveti ölçümleri yük hücresinden alınan sinyaller yine aynı ara yüz kartı ve yazılım aracılığıyla deney süresince monitörden izlenmiş ve bir bilgisayar programı aracılığı ile deney boyunca bilgisayara kayıt edilmiştir. Aşınma deneyi süresinde numunelerin sürtünme kuvveti ölçümleri eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde aşınma testinin hangi aşamasında sürtünme kuvvetinde nasıl bir değişimin meydana geldiği takip edilebilmektedir. Ölçülen sürtünme kuvveti değerlerinin ortalamaları alınarak sürtünme katsayısını çevrilmiştir.

## 6. BULGULAR

### 6.1 Kimyasal Analiz Sonuçları

Bölüm 5’de açıklanan yöntemle yapılan analizlerin sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1:Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları (%).

	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Zn	W	Sn	V	Al
SAE430B	0,133	0,143	0,001	0,001	2,8	1,1	0,06	0,002	66	20	0,09	0,15	0,001	2,4
1.2379	1,73	0,3	0,006	0,019	0,54	0,02	11	0,74	0,048	0,03	0,1	0,008	0,7	0,03
GG25	3,22	2,01	0,05	0,009	1	0,06	0,51	0,03	0,25	0,02	0,01	0,035	0,02	0,002
GGG70	3,5	2,02	0,02	0,06	0,58	0,81	0,1	0,42	0,63	0,01	0,01	0,068	0,01	0,01

### 6.2 Çekme Deney Sonuçları

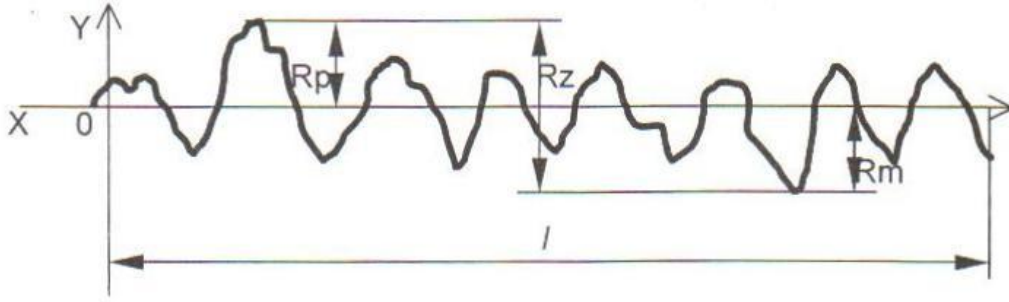
Deneylerde kullanılan malzemelerin çekme özellikleri (akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama ) Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2: Deneylerde kullanılan malzemelerin akma, çekme dayanımları ve % uzamaları.

	Akma Dayanımı (Mpa)	Çekme dayanımı (Mpa)	Uzama (%)
DIN 1.2379	550	738	17
DIN GG25	134	200	0.7
DIN GGG70	490	658	2,5

### 6.3 Yüzey Kalitesi ve Sertlik Ölçüm Sonuçları

Malzemelerin yüzey kaliteleri ve sertlikleri Bölüm 5’de belirtilen yöntemlerle ölçülmüştür. Malzemelerin yüzey kaliteleri, Şekil 6.1’de görüldüğü üzere genel yüzey pürüzlülük profilindeki değerler alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.1: Genel yüzey pürüzlülük profili.

Ra : Pürüzlülük profili aritmetik ortalaması( $\mu\text{m}$ )

Rq : Pürüzlülük profili geometrik ortalaması ( $\mu\text{m}$ )

Rz : Pürüzlülük profili max. yükseklik ( $\mu\text{m}$ )

Rp : Pürüzlülük profili max. tepe yüksekliği ( $\mu\text{m}$ )

Rm : Pürüzlülük profili max. vadi derinliği ( $\mu\text{m}$ )

olarak tanımlanır.

Malzemelerin ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve sertlikleri Tablo 6.3 ve Tablo 6.4’de verildiği şekildedir.



Tablo 6.3: I.Grup deneylerde kullanılan aşınan ve aşındıran malzemelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri.

	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rq( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Rp( $\mu\text{m}$ )	Rm( $\mu\text{m}$ )	Sertlik (HV1)
GGG70	0,81	1,014	4,471	2,001	2,47	311,4
GG25	0,804	1,032	5,265	2,406	2,859	283,1
1.2379	0,275	0,34	1,358	0,574	0,783	233,3
Grafitli SAE430B	0,284	0,339	1,241	0,553	0,688	241,5

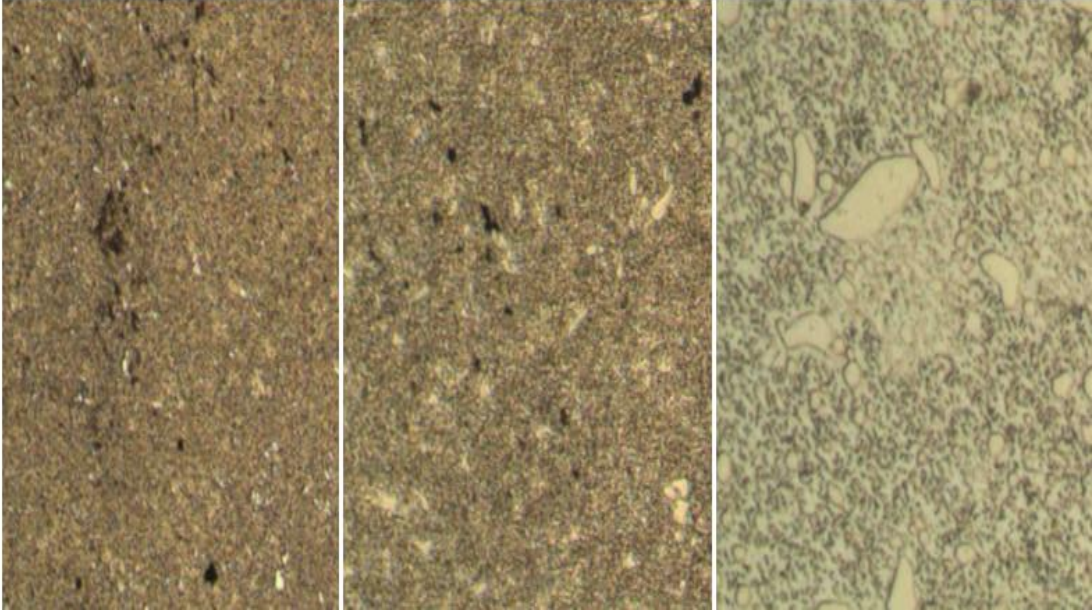
Tablo 6.4: II. Grup deneylerde kullanılan aşınan ve aşındıran malzemelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri.

	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rq( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Rp( $\mu\text{m}$ )	Rm( $\mu\text{m}$ )	Sertlik (HV1)
GGG70	0,365	0,466	2,56	1,13	1,43	311,4
GG25	0,607	0,771	3,71	1,63	2,07	283,1
1.2379	0,536	0,667	3,07	1,41	1,67	233,3
SAE430B	0,468	0,594	2,94	1,45	1,49	241,5

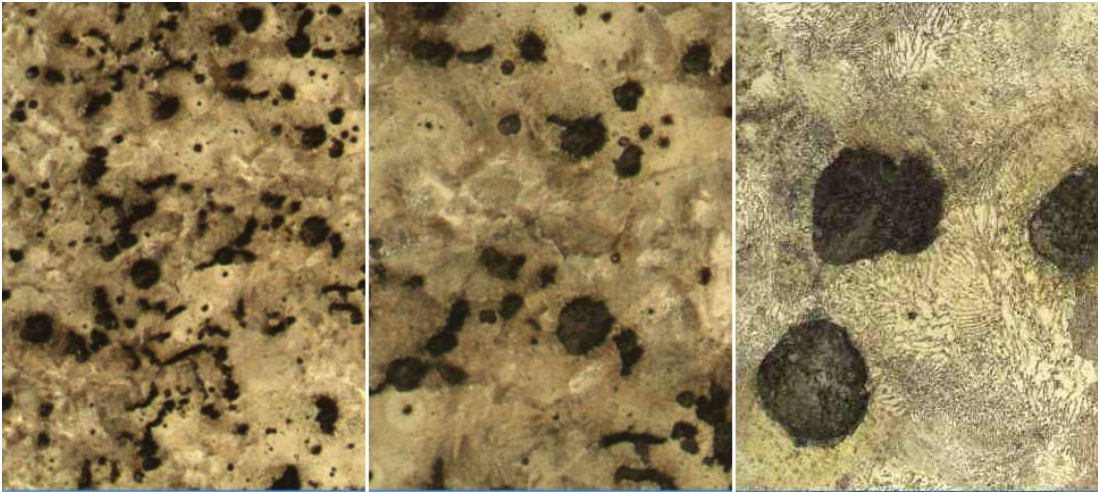
#### 6.4 Metalografik İnceleme Sonuçları

Aşınma deneylerinde aşındırıcı malzemeler olarak kullanılan 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin, GGG70 küresel grafitli dökme demirin ve GG25 lamel grafitli dökme demirin iç yapı görüntüleri 50x, 100x ve 500x büyütmelerde sırasıyla Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de verilmiştir.

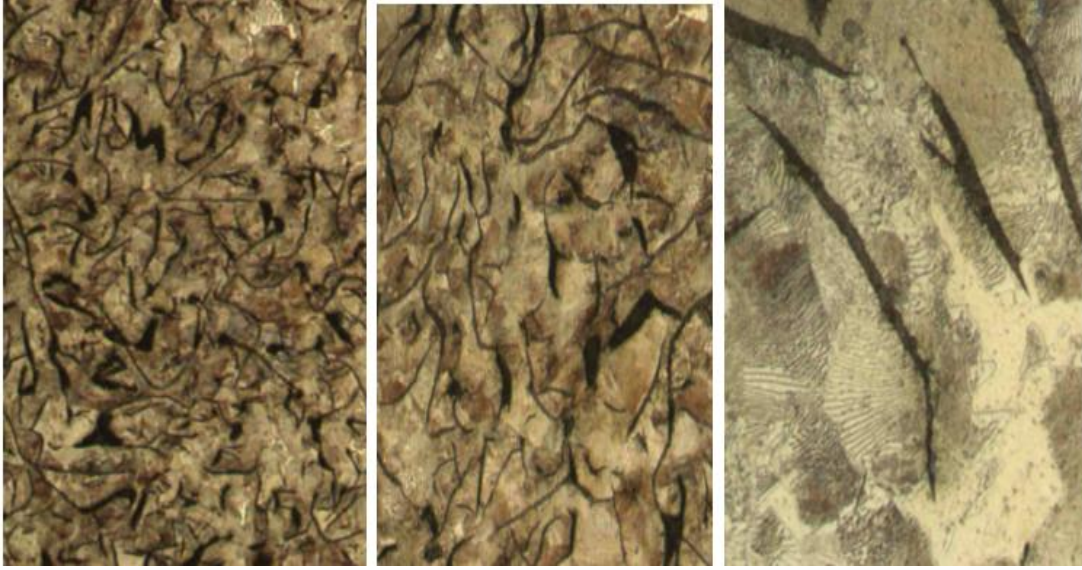
Soğuk iş takım çeliğinin iç yapısı incelendiğinde perlitik matris yapısına sahip olduğu ve bu matris de gelişigüzel dağılmış değişik boyutlardaki karbürler (açık renk alanlar) görülmektedir (bkz. Şekil 6.2). GGG70 KKDD’in iç yapı görüntülerinden matris yapının çoğunlukla perlitik olduğu ve bu perlit fazında grafit kürelerinin (siyah olanlar) dağıldığı gözlenmiştir (bkz. Şekil 6.3). GG25 lamel grafitli dökme demirin perlitik matris yapısı ile Tip A grafit şekil ve dağılımına sahip olduğu Şekil 6.4’de görülmektedir.



Şekil 6.2: 1.2379 malzemesinin sırası ile x50, x100 ve x500 büyütmelerdeki iç yapıları

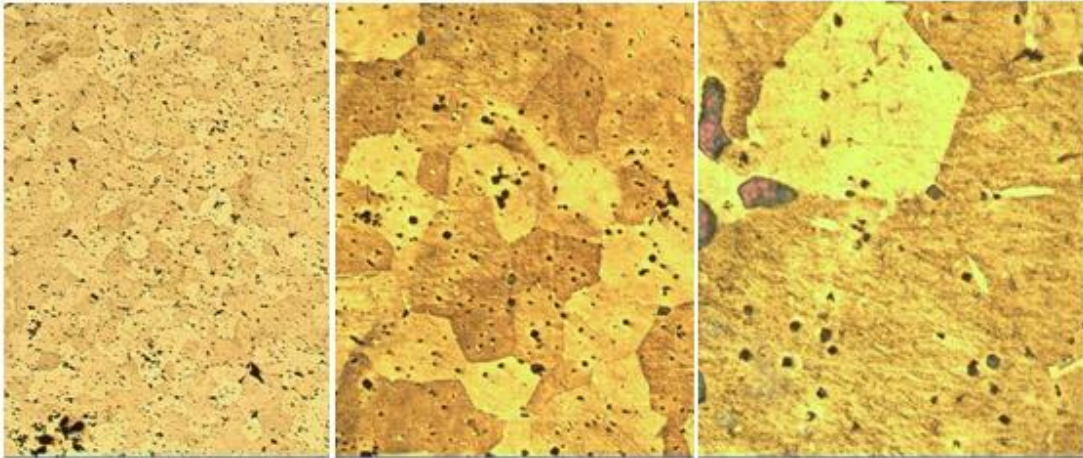


Şekil 6.3: GGG70 malzemesinin sırası ile x50, x100 ve x500 büyütmelerdeki iç yapıları



Şekil 6.4: GG25 malzemesinin sırası ile x50, x100 ve x500 büyütmelerdeki iç yapıları.

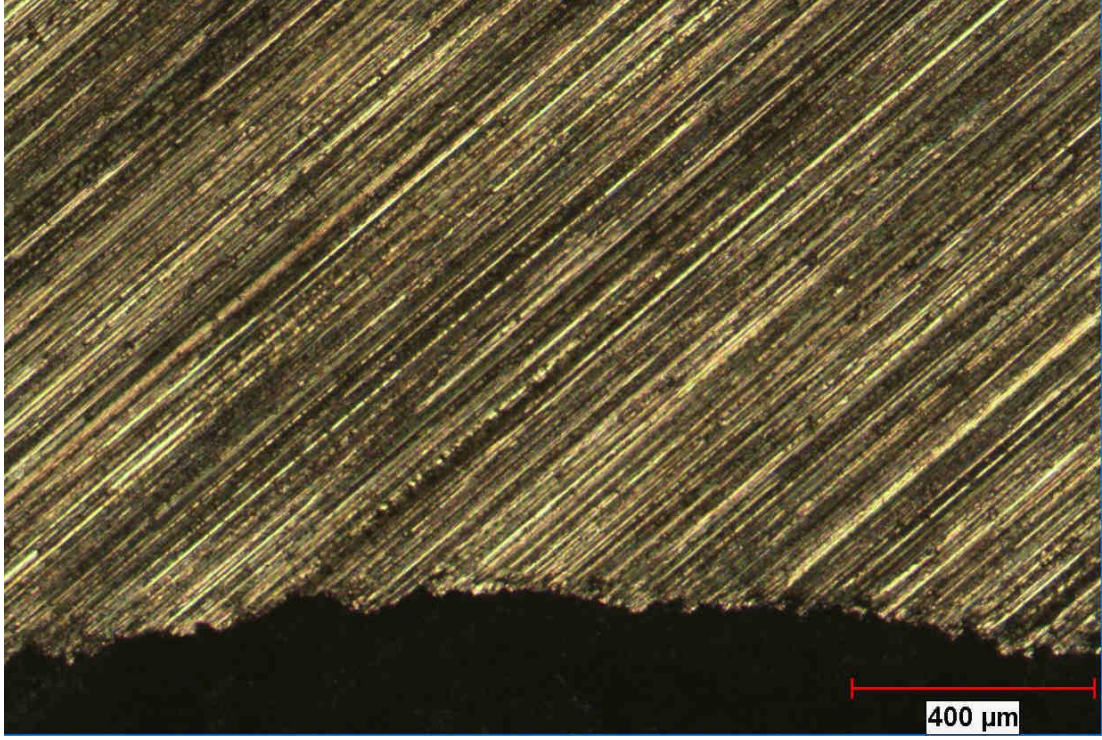
Aşınan malzeme olarak kullanılan grafitli SAE430B mangan bronzunun iç yapı görüntüsü Şekil 6.5’te verilmektedir.



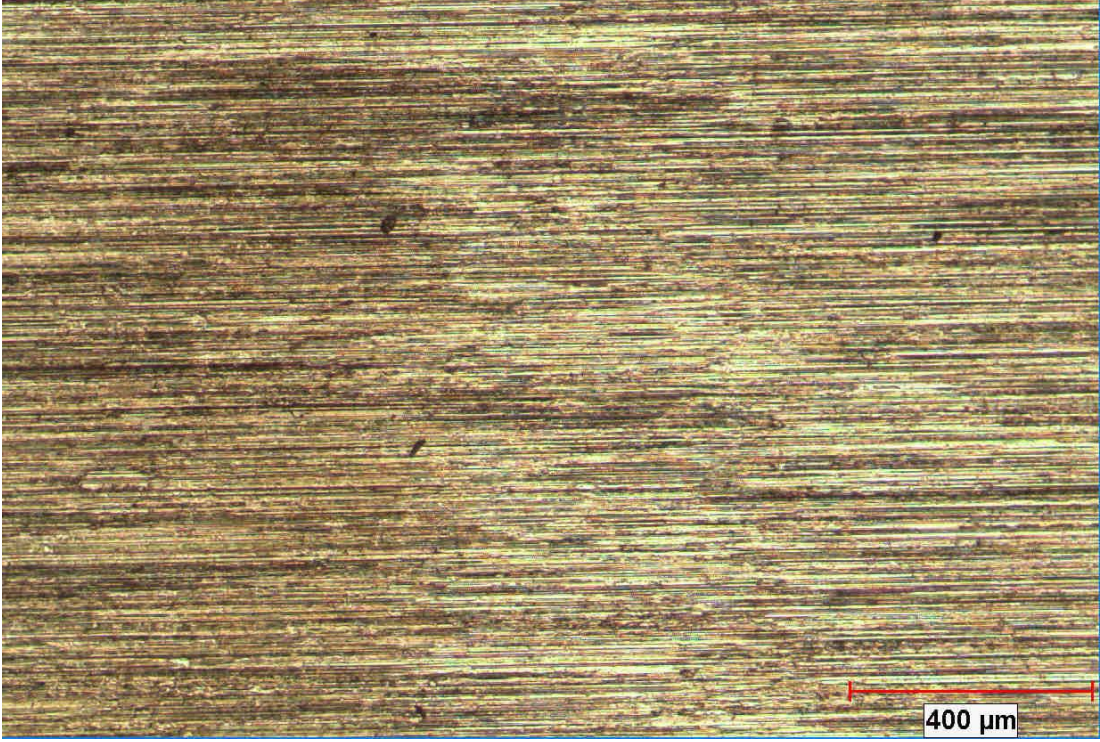
Şekil 6.5: SAE430B mangan bronzunun sırası ile x50, x200 ve x500 büyütmelerdeki iç yapıları.

SAE430B mangan bronzunun iç yapısı incelendiğinde, küçük beyaz iğnesel yapılar  $\alpha$  katı çözeltilisidir. Matris genel olarak  $\beta$  fazındadır. Görünen siyah noktalar ise demir bakımından zengin fazlardır [60].

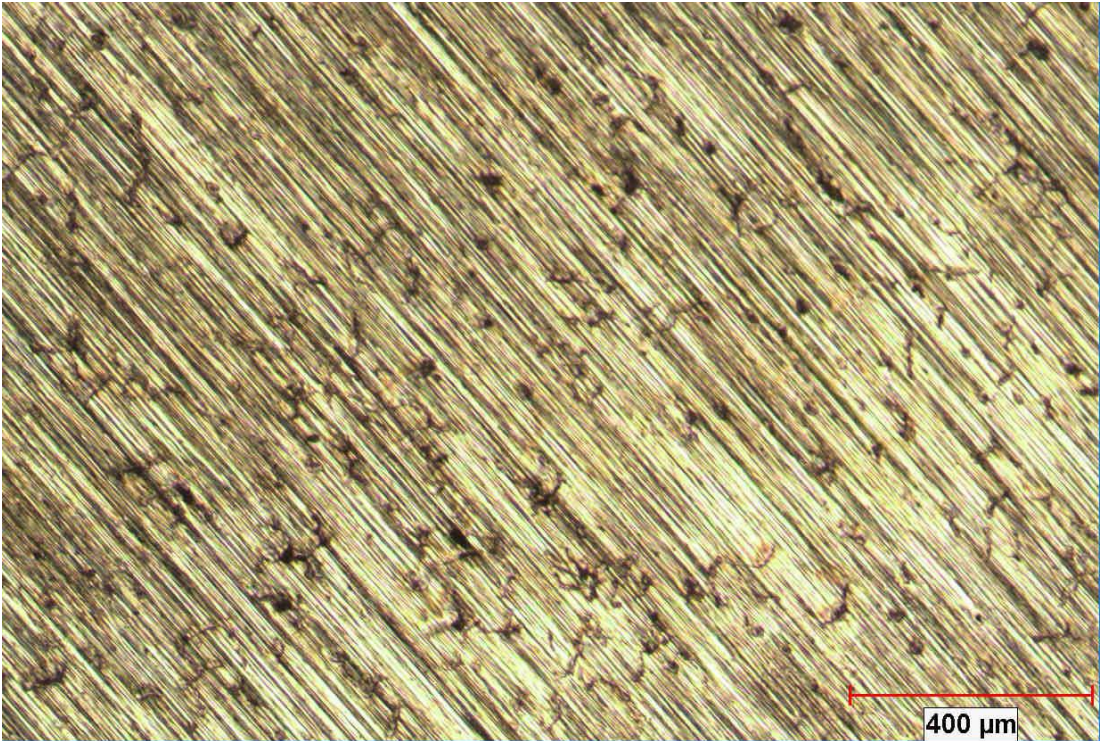
Aşınma deneyleri öncesinde disk ve pimlerin sürtünen yüzeylerinin birbirleri ile tam temasının sağlanabilmesi için yüzeyler taşlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Taşlanmış haldeki disk ve pim numunelerinin yüzey görüntüleri 50x büyütmede Şekil 6.6 - 6.9 arasında verilmiştir.



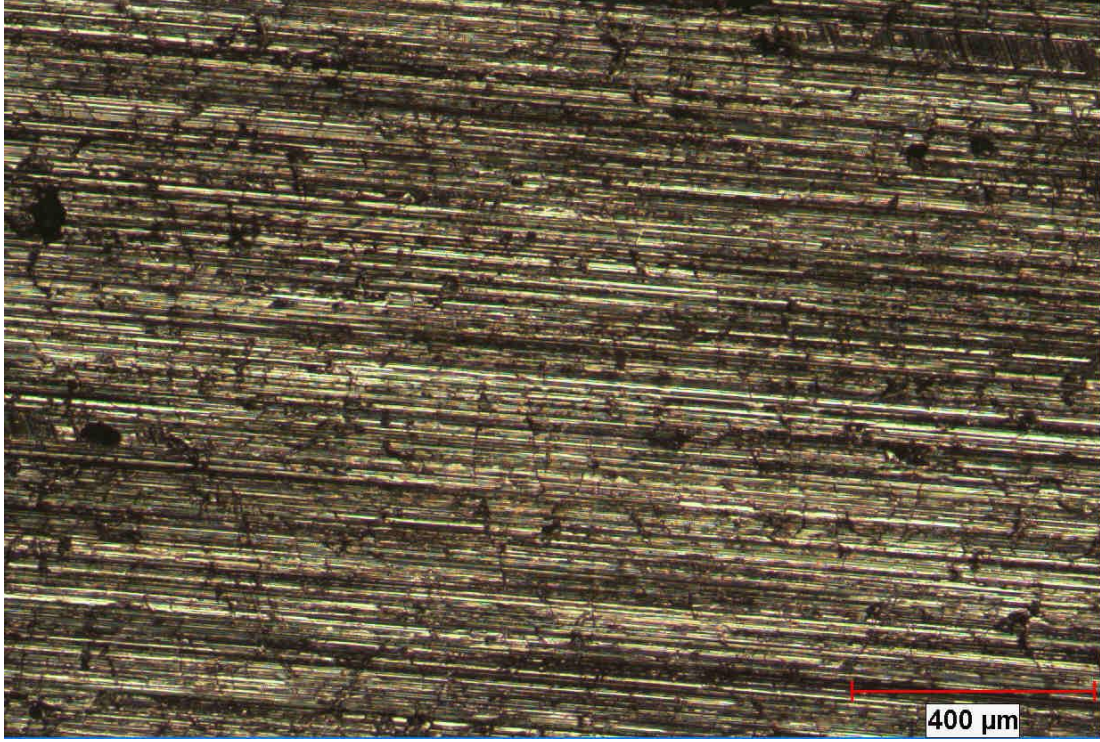
Şekil 6.6: Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış SAE430B mangan bronzunun yüzey görüntüsü.



Şekil 6.7: Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin yüzey görüntüsü



Şekil 6.8: Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış GGG70 küresel grafitli dökme demirin yüzey görüntüsü



Şekil 6.9: Aşınma deneyleri öncesi taşlanmış GG25 lamel grafitli dökme demirin yüzey görüntüsü

## 6.5 Aşınma Deney Sonuçları

Malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi için Bölüm 5’te belirtilen yöntemlere uygun şekillerde birçok aşınma deneyi yapılmıştır.

### 6.5.1 Ağırlık Kayıplarının İncelenmesi

I. Grup deneylerde; GGG70 Küresel grafitli dökme demir, GG25 lamel grafitli dökme demir ve 1.2379 soğuk iş takım çeliği pimleri kullanılarak, grafitli SAE430B bronz diskler 15N yük altında ve 60 mm/sn kayma hızında 5000m, 10000m ve 15000m kayma mesafelerinde aşındırılmıştır. II. Grup deneyler de; SAE430B mangan bronzu aynı aşındırıcı malzemelerden pimler kullanılarak, aynı yük altında ve aynı kayma hızında 5000m ve 10000m kayma mesafelerinde aşındırılmıştır. Oda sıcaklığında yapılan, disk üzerinde pim (pin-on-disk) esasına dayanan metal – metal aşınma deneylerinin sonuçları ağırlık kaybı ( $\Delta G$ ) ve sürtünme

katsayısı olarak ölçülmüştür. 5000m, 10000m ve 15000m kayma mesafelerinde yüzeylerde meydana gelen aşınma çizgileri incelenmiştir. Tablo 6.5'te I. Grup ve II. Grup deneylerde farklı kayma mesafelerinde aşınan malzemelerde oluşan ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayıları verilmiştir.

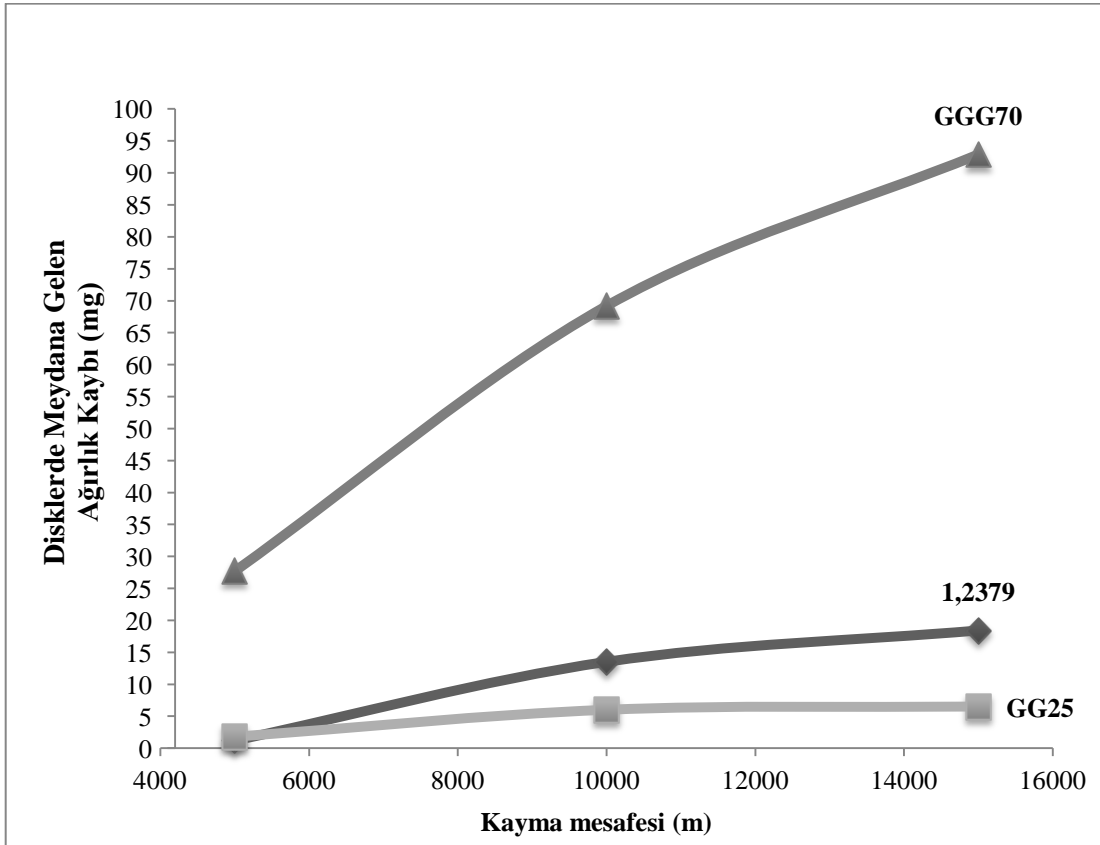
Tablo 6.5: I. ve II. Grup deneyler sonucunda farklı kayma mesafelerinde aşınan malzemelerde ortaya çıkan ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayıları.

Deneyler	Aşınan Malzeme	Aşındıran Malzeme	Kayma Mesafesi (m)	Aşınan Malzeme Ağırlık Kaybı (mg)	Ortalama Sürtünme Katsayısı
I. Grup	Grafitli SAE430B	1.2379	5000	1,2	0,23
			10000	13,5	
			15000	18,4	
		GG25	5000	1,8	0,29
			10000	6	
			15000	6,5	
		GGG70	5000	27,7	0,27
			10000	69,2	
			15000	92,9	
II. Grup	SAE430B	1.2379	5000	3,1	0,55
			10000	161,3	
		GG25	5000	173,5	0,46
			10000	546,1	
		GGG70	5000	200,1	0,57
			10000	522,8	

I. Grup deneylerde farklı aşındıran malzeme ve farklı kayma mesafelerine bağlı olarak kendinden yağlamayı sağlayan grafitli SAE430B aşınan malzemedeki ağırlık kayıpları Şekil 6. 10'da verilmiştir.

I. Grup deneylerde; tüm kayma mesafelerinde GGG70 malzemesi en fazla aşındıran, GG25 malzemesi ise en az aşındıran malzeme olarak kaydedilmiştir. GGG70 pim malzemesinin diskte meydana getirdiği ağırlık kayıpları diğer pim malzemelere göre belirgin farklar göstermektedir. (Şekil 6.10)

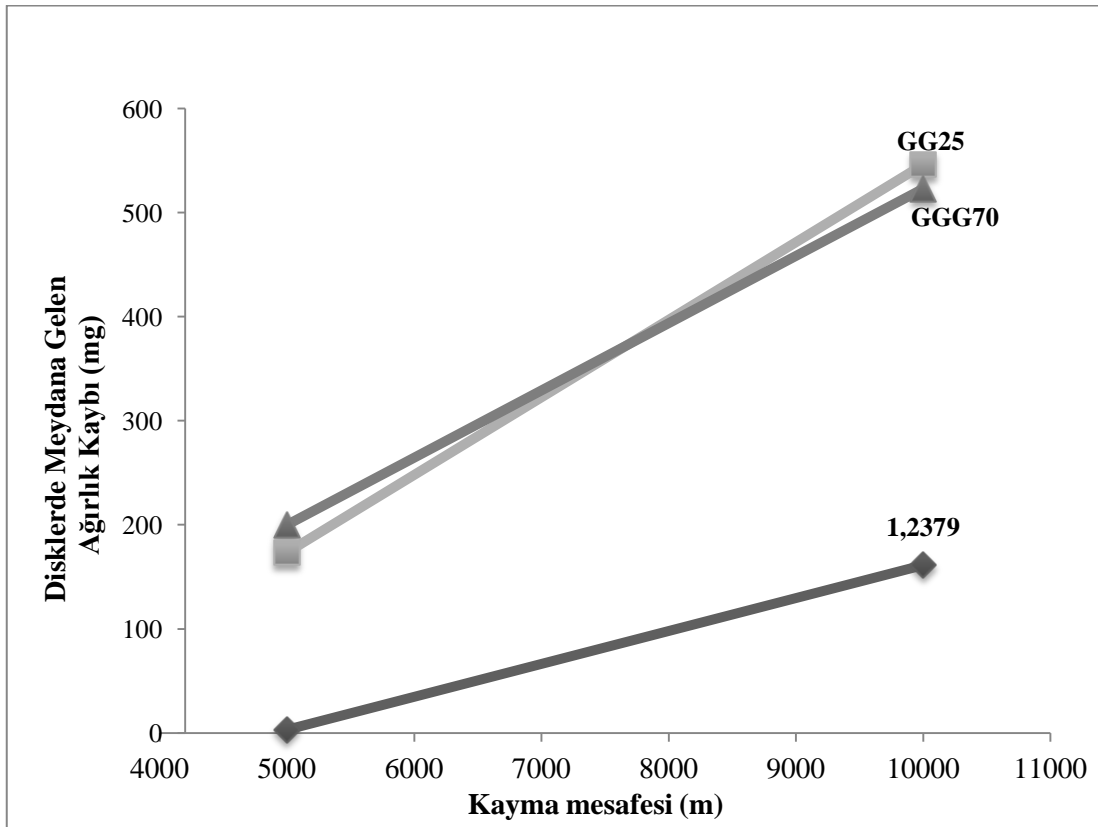
10000m ve 5000m kayma mesafelerinde elde edilen ağırlık kaybı farkları incelendiğinde, 1.2379, GG25, GGG70 aşındırıcılar için sırasıyla bu değerler; 12.3mg, 4.2mg ve 41.5mg olarak elde edilmiştir. 10000m ve 15000m kayma mesafelerinde aynı aşındırıcı malzemeler kullanılarak kaydedilen ağırlık kaybı farkları incelendiğinde ise, 1.2379, GG25, GGG70 aşındırıcılar için sırasıyla bu değerler; 4.9mg, 0.5mg, 23,7mg olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre; 5000-10000m kayma mesafesi aralığında, her üç aşındırıcı malzeme için diskte aşınma hızının daha fazla olduğu, 10000-15000m kayma mesafesi aralığında ise daha yavaş aşınmanın meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 6.10: I. Grup deneylerde diskte oluşan ağırlık kayıpları.



II. Grup deneylerde farklı aşındırıcı malzeme ve farklı kayma mesafelerinde SAE430B aşınan malzeme kayıplarına göre çizilen grafik Şekil 6.11’de verilmiştir. II. Grup deneylerde kendinden yağlamayı sağlayan grafit olmadığından I. Grup deneylerdeki değerlere göre, bu grup deney disklerinde ağırlık kayıplarının daha yüksek olduğu görülmüştür. II. Grup deneylerde yüzeylerden kopan malzeme miktarının artması ve kopan malzemelerin pim üzerine yapışması durumu olduğundan 10000m kayma mesafesine kadar sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir. Kayma mesafesinin artması ile birlikte deney düzeneğinin paralelliği bozulmuş ve standartlardan uzaklaşmıştır. Bu nedenle ağırlık kayıpları ölçümleri 5000m ve 10000m kayma mesafelerinde alınmıştır. 10000m kayma mesafelerindeki toplam ağırlık kayıpları incelendiğinde en çok aşındırıcı malzemenin GG25 malzemesi, en az aşındırıcı malzeme ise 1.2379 malzemesi olduğu kaydedilmiştir. Her üç aşındırıcı malzeme kullanıldığında diskte meydana gelen ağırlık kayıpları miktarı kayma mesafesine bağlı olarak artış göstermiştir.



Şekil 6.11: II. Grup deneylerde diskte oluşan ağırlık kayıpları

I. ve II. Grup deneyler karşılaştırıldığında II. Grup deneylerde diskte ölçülen ağırlık kayıpları I.Grup deneylerde ölçülen ağırlık kayıpları miktarlarına göre belirgin artışlar göstermiştir. Aşınan malzemelerin grafitli olması, aşınma deneylerinde aşındıran malzemelere göre diskte meydana gelen ağırlık kayıplarını farklı farklı oranlarda etkilemiştir. 10000m kayma mesafesinde ölçülen ağırlık kayıplarında, II. Grup deneylerde elde edilen sonuçlar I. Grup deneyler de elde edilen sonuçlara göre yaklaşık olarak; 1,2379 malzemesinde 12 kat, GG25 malzemesinde 91 kat, GGG70 malzemesinde ise 8 kat daha fazla ağırlık kaybı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre; disk malzemesinin grafitli olması durumunda, grafitlerin yağlayıcı etkisinden dolayı aşınan malzeme miktarlarında önemli azalmalar görülmektedir.

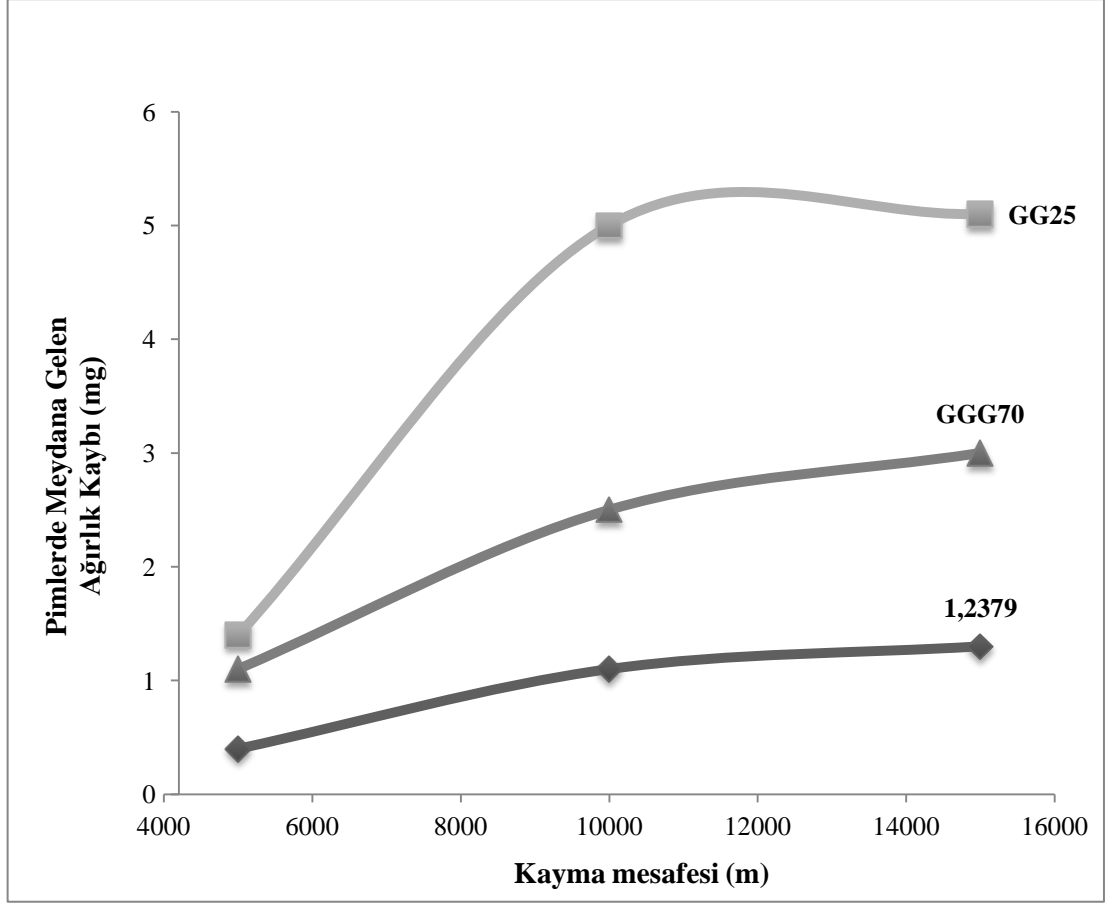
Aşınmayı etkileyen faktörlerin; malzemenin cinsi, kimyasal bileşimi, mikro yapısı, sertliği, yağlamanın olması, ortam sıcaklığı vb. olduğu yapılan birçok deneysel çalışma sonucunda ortaya çıkmıştır [61, 62, 63]. I. ve II. Grup deneyler sonucunda; bu faktörlerden biri olan yağlamanın aşınma miktarlarını; 8 ile 91 kat arasında azalttığı gözlemlenmiştir. Diğer bir faktör olan aşındırmanın sertliği ile ilgili olarak da I. Grup deneylerde kullanılan en sert malzeme (Sertlik değeri: 311,4 HV1) olan GGG70 aşındırma oranı en fazla ölçülen malzemedir. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmektedir [64, 65, 66].

I. ve II. Grup deneylerde aşındıran pim malzemelerde meydana gelen ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi II. Grup deneylerde yüzeyden kopan malzemelerin pim yüzeylerine yapışması, pimlerin ağırlık kayıplarının ölçülmesini zorlaştırmıştır. Bu nedenle sadece I. Grup deneylerdeki pim malzemelerin ağırlık kayıpları kaydedilmiştir. I. Grup deneylerde kayma mesafelerine bağlı olarak aşındıran 1.2379, GG25 ve GGG70 pimlerinde meydana gelen ağırlık kayıpları Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6: I. Grup deneylerde farklı kayma mesafelerinde, aşındıran malzemelerde oluşan ağırlık kayıpları.

Aşındıran Malzeme	Kayma Mesafesi (m)	Ağırlık Kaybı, $\Delta G$ (mg)
1.2379	5000	0,4
	10000	1,1
	15000	1,3
GG25	5000	1,4
	10000	5,0
	15000	5,1
GGG70	5000	1,1
	10000	2,5
	15000	3,0

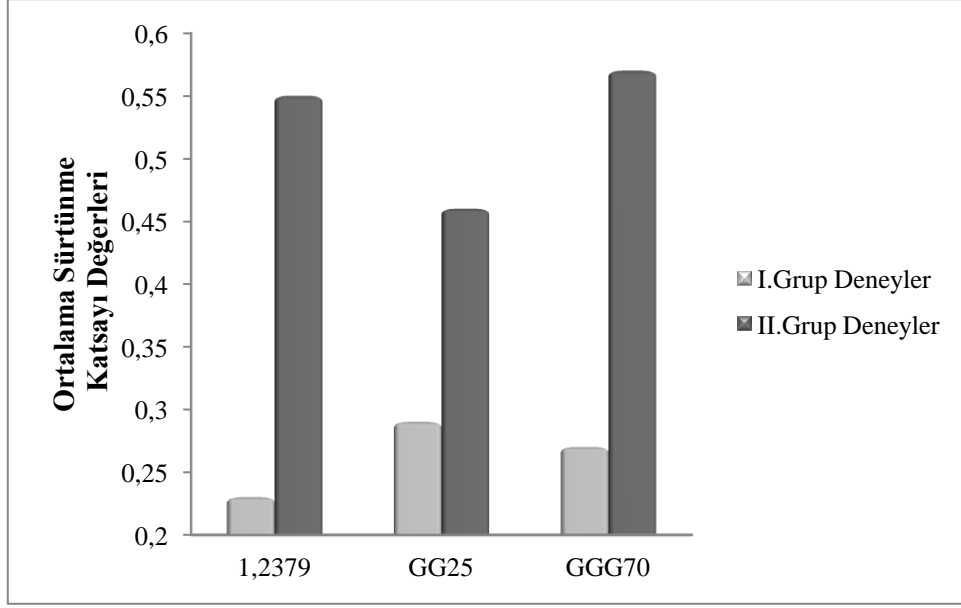
Pim malzemeler içerisinde; en az aşındıran malzeme olmasına rağmen en fazla aşınan malzeme GG25 olarak gözlemlenmiştir. En az aşınan malzeme ise 1.2379 çeliği olmuştur. Her bir pim malzemenin ağırlık kayıplarında 5000m-10000m kayma mesafeleri arasında, ağırlık kayıplarında aşınan malzemede de olduğu gibi belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Şekil 6.12’de pim malzemelerin kayma mesafelerine bağlı olarak ağırlık değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 6.12: I. Grup deneylerde kullanılan pimlerdeki ağırlık kaybı değişimi.

### 6.5.2 Sürtünme Katsayıları

I. Grup ve II. Grup deneyler sırasında sürtünme katsayı değerleri kaydedilmiştir. I. Grup deneylerde sürtünme katsayısı ortalaması en fazla olan malzeme çifti GG25-Grafitli SAE430B, en az olan malzeme çifti ise 1.2379- Grafitli SAE430B olarak elde edilmiştir. II. Grup deneylerde sürtünme katsayısı ortalaması en fazla olan malzeme çifti GGG70- SAE430B, en az olan malzeme çifti ise GG25 - SAE430B olarak görülmektedir. Şekil 6.13 I. Grup ve II. Grup deneylerin ortalama sürtünme katsayı değerleri arasındaki belirgin farkları daha net görebilmek amacıyla verilmiştir. Kendinden yağlamayı sağlayan grafitlerin bulunmadığı disk kullanıldığında, ortalama sürtünme katsayısı değerlerinde en fazla artış 1.2379 malzemesinde, en az artış ise GG25 malzemesinde kaydedilmiştir.

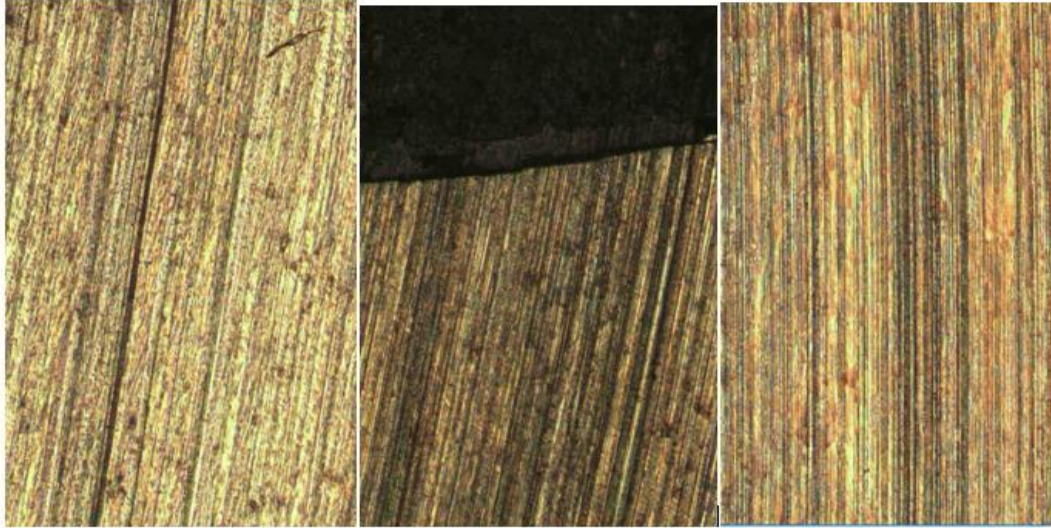


Şekil 6.13: I. Grup ve II. Grup deneylerde ortalama sürtünme katsayısı değişimi.

Sürtünme katsayısı; kayma hızı, uygulanan yük, nem, sıcaklık, yağlama vb. faktörlere bağlıdır [14, 40, 65]. I. ve II. Grup deneyler aynı ortam şartlarında, aynı kayma hızında ve aynı yük miktarında gerçekleştirildiğinden bu değişkenlerin sürtünme katsayısına olan etkileri ihmal edilebilir. Grafitli ve grafitsiz SAE430B mangan bronzunun kullanılması sürtünme katsayısı değerleri üzerinde yağlamanın etkisini göstermektedir. Malzemelerin özelliklerine göre değişkenlik gösteren, sürtünme katsayı değerlerinde yağlamadan kaynaklanan artış miktarları ise yaklaşık olarak; SAE430B-1.2379 aşınma çiftinde 2,4 kat , SAE430B-GG25 aşınma çiftinde 1,6 kat, SAE430B-GGG70 aşınma çiftinde ise 2,1 kat artış kaydedilmiştir. GG25 ve GGG70 malzemelerinin iç yapılarında belirli oranlarda grafit mevcut olduğundan 1.2379 malzemesine göre yağlamadan etkilenme oranları düşüktür.

### 6.5.3 Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

I. Grup deneylerde grafitli SAE430B mangan bronzu diski ile 1.2379, GG25 ve GGG70 pimlerinin her bir aşınma deneyi için yüzeysel aşınma izleri 5000m, 10000m ve 15000m aşınma mesafelerinde ayrı ayrı incelenmiştir. Malzemelerin her bir aşınma testinde 5000m, 10000m ve 15000m kayma mesafelerinden sonra alınmış aşınma izleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



a)

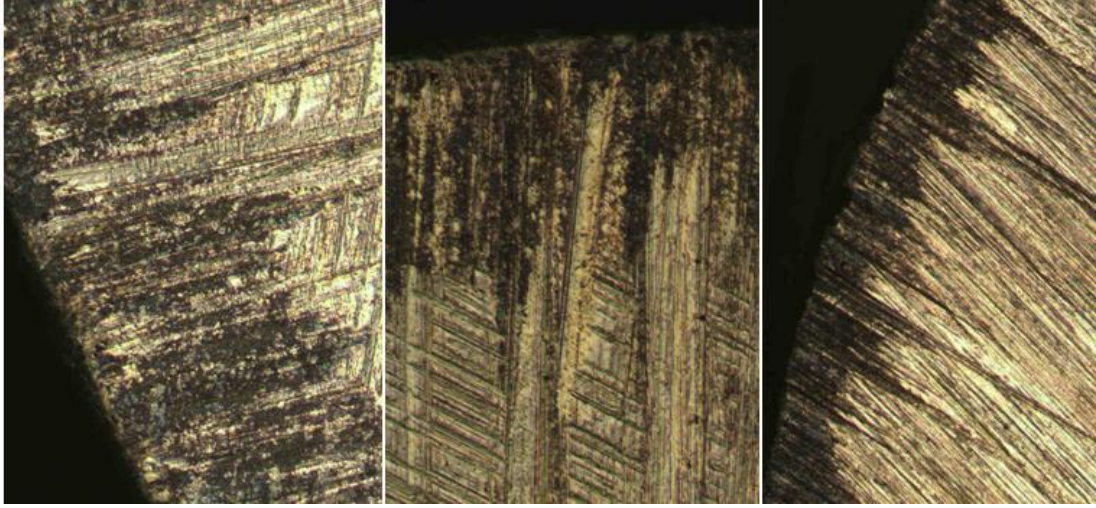
b)

c)

Şekil 6.14: Grafitli SAE430B disk-1.2379 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a), 10000m (b), 15000m (c) kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri (x50 büyütme).

I. Grup grafitli SAE430B-1.2379 aşınma çifti deneyinde SAE430B disk aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.14); 5000m kayma mesafesinde oluşan aşınma çizgilerinin 10000m kayma mesafesinde daha sıklaştığı görülmektedir. Ağırlık kayıplarında ki artış da kayma mesafelerine oranla paraleldir.

5000m-10000m arasında meydana gelen ağırlık kaybı farkı (12,3mg), 10000m-15000m arasında meydana gelen ağırlık kaybı farkından (4,9mg) fazladır. En fazla aşınma 10000m kayma mesafesinde gözlemlenmiştir, dolayısı ile en sık ve dar aşınma çizgilerinin 10000m kayma mesafesinde görülmesi deney sonuçları ile uyumludur.



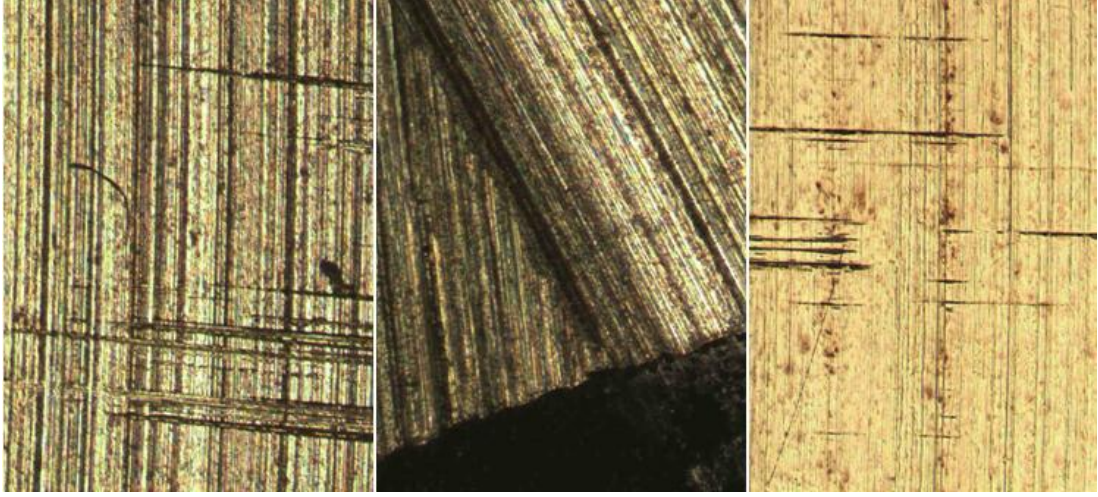
a)

b)

c)

Şekil 6.15: Grafitli SAE430B disk-1.2379 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a), 10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde pim yüzeyinde aşınma izleri ( x100 büyütme).

I. Grup grafitli SAE430B-1.2379 aşınma çifti deneyinde 1.2379 pim aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.15); pim malzemenin grafitleri disk üzerinden sıvama şeklinde uzaklaştırıp kenarlara biriktirdiği görülmektedir. Aşındırma ve aşınma miktarına bağlı olarak 10000m kayma mesafesinde, aşınma çizgilerinin 5000m kayma mesafesine oranla sıklaştığı, grafitlerin birikme miktarının da arttığı gözlemlenmiştir.



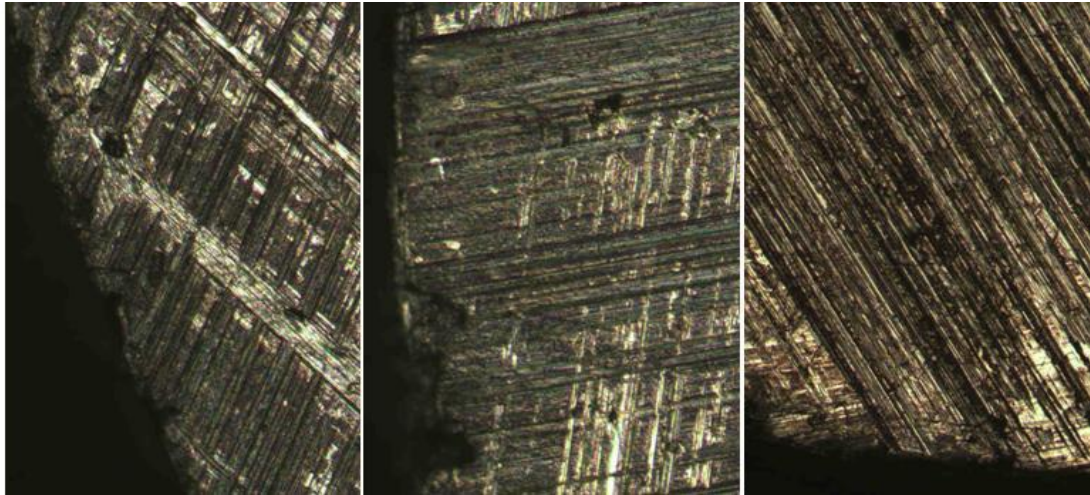
a)

b)

c)

Şekil 6.16: Grafitli SAE430B disk–GG25 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a), 10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri (x50 büyütme).

I. Grup grafitli SAE430B-GG25 aşınma çifti deneyinde SAE430B disk aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.16); aşınma çizgilerinde belirgin artışlar gözlemlenmemiştir. GG25 malzemesi, I. Grup deneylerde en az aşındıran malzeme olduğundan yüzey aşınma çizgileri deney sonuçları ile uyumludur.



a)

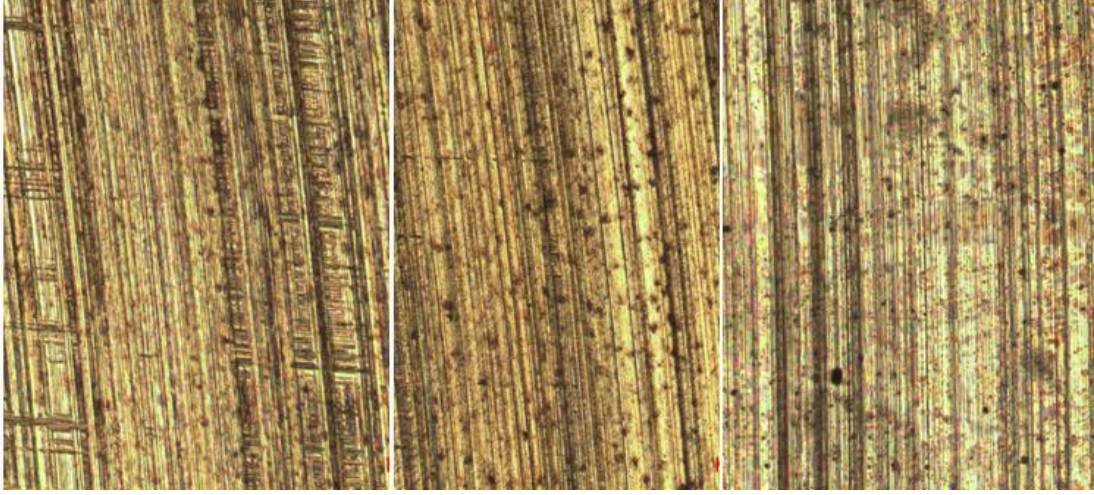
b)

c)

Şekil 6.17: Grafitli SAE430B disk–GG25 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a), 10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde pim yüzeyinde aşınma izleri ( x100 büyütme).

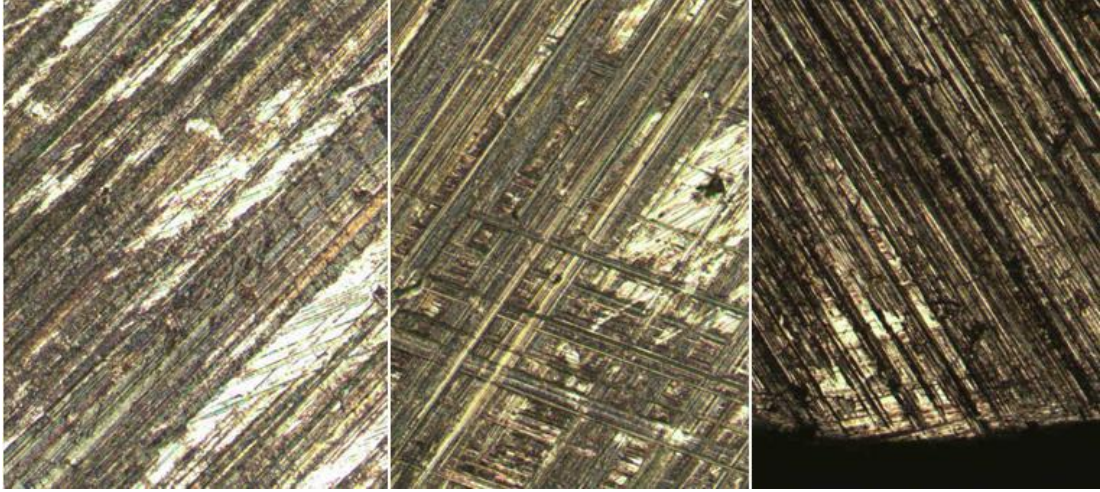


I. Grup grafitli SAE430B-GG25 aşınma çifti deneyinde GG25 pim aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.17); aşınma çizgilerinin olduğu görülmüştür. Özellikle GG25 pim malzemesini ağırlık kayıplarını incelediğimizde en çok ağırlık kaybının 10000m kayma mesafesinde gerçekleştiği görülmektedir. Yüzey çizgilerinin derin ve sık olması aşınmanın boyutunu göstermektedir.



Şekil 6.18: Grafitli SAE430B disk–GGG70 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a), 10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri ( x50 büyütme).

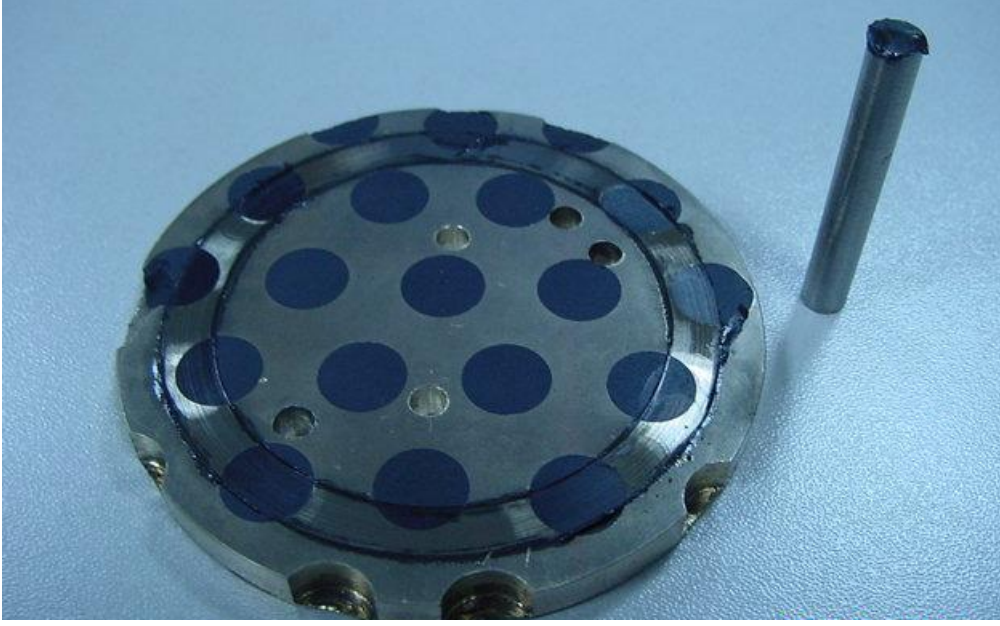
I. Grup grafitli SAE430B-GGG70 aşınma çifti deneyinde SAE430B disk aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.18); en çok aşındıran malzeme olarak ağırlık kayıpları kaydedilen GGG70 malzemesinin, ağırlık kayıpları ile orantılı olarak aşınma yüzey çizgilerinin sıklaştığı görülmektedir. En fazla aşınma kaybı; aşınma izleri sıklığından anlaşılacağı üzere 10000m kayma mesafesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 6.19: Grafitli SAE430B disk–GGG70 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m (a), 10000m (b) ,15000m (c) kayma mesafesinde pim yüzeyinde aşınma izleri (x50 büyütme).

I. Grup grafitli SAE430B-GGG70 aşınma çifti deneyinde GGG70 pim aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.19); pim malzemedeki en çok aşınma kaybı 10000m kayma mesafesinde ölçülmüştür. Dolayısıyla ile; 10000m kayma mesafesinde aşınma izlerinin 5000m ve 15000m kayma mesafelerinde oluşan yüzey çizgilerinden daha fazla ve daha sık olduğu görülmektedir.

I.Grup deneylerdeki aşınma çiftlerinin 15000 m kayma mesafesi sonrasındaki görüntüleri Şekil 6.20 - Şekil 6.22 arasında verilmiştir. Şekil 6.20’de grafitli SAE430B-1.2379 aşınma çifti verilmiştir. Aşınma sırasında oluşan ısıdan kaynaklı grafitin disk yüzeyinden toplanarak kenarlara birikmesi ve pim üzerine yerleşmesi daha net görülmektedir. Şekil 6.21’de grafitli SAE430B-GG25 aşınma çifti verilmiştir. En az aşındırıcı malzeme olan GG25 malzemesinin aşındırma izleri de şekilde görüldüğü üzere diğer aşınma çiftleri kadar belirgin değildir. Şekil 6.22’de grafitli SAE430B-GGG70 aşınma çifti verilmiştir. En fazla aşındırıcı malzeme olarak GGG70 pim malzemesinin aşındırma izleri şekilde görüldüğü üzere belirgindir.



Şekil 6.20: Grafitli SAE430B–1.2379 pim aşınma çifti 15000m kayma mesafesi sonrası numunelerin görüntüsü.



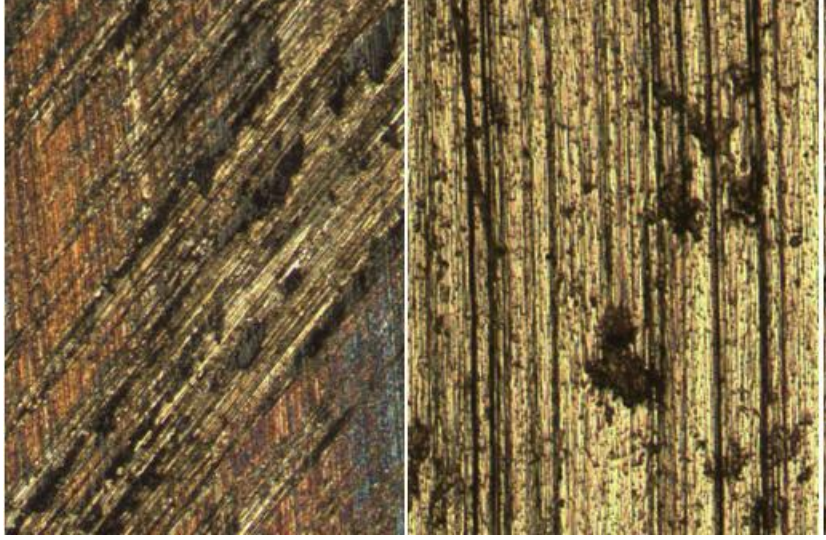
Şekil 6.21: Grafitli SAE430B–GG25 pim aşınma çifti 15000m kayma mesafesi sonrası numunelerin görüntüsü.



Şekil 6.22: Grafitli SAE430B disk–GGG70 pim aşınma çifti 15000m kayma mesafesi sonrası numunelerin görüntüsü.

II. Grup deneylerde SAE430B mangan bronzu disklerinin 1.2379, GG25 ve GGG70 pimleri ile aşındırılması sonucunda, her bir aşınma deneyi için disk malzemelerin yüzeysel aşınma izleri 5000m, 10000m kayma mesafelerinde incelenmiştir. Malzemelerin her bir aşınma testinden sonra (5000m ve 10000m aşınma mesafesinden sonra) alınmış x50 büyütme ile aşınma izleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

II. Grup deneylerde pim malzemelerde belirgin ağırlık kayıpları görülmediğinden aşınma yüzey görüntüleri verilmemiştir.



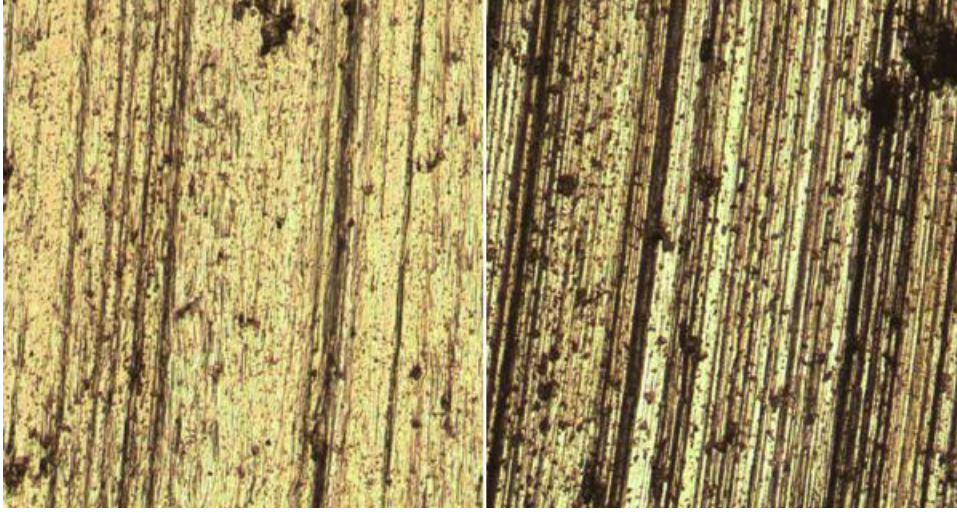
Şekil 6.23: SAE430B disk–1.2379 pim aşınma çifti 5000m ve 10000m kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri.

II. Grup SAE430B-1.2379 aşınma çifti deneyinde SAE430B disk aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.23); 10000m kayma mesafesinde aşınma izlerinin derinleştiği ve daha önceden sıklaşan aşınma çizgileri şeklinde bahsedilen çizgilerin aşındırma şiddetinin fazla olmasından birleştiği ve kalın çizgiler oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 6.24: SAE430B disk–GG25 pim aşınma çifti 5000m ve 10000m kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri.

II. Grup SAE430B-GG25 aşınma çifti deneyinde GG25 disk aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.24); II. Grup deneylerde en fazla aşındıran malzeme GG25 malzemesidir.



Şekil 6.25: SAE430B disk–GGG70 pim aşınma çifti sırasıyla 5000m ve 10000m kayma mesafesinde disk yüzeyinde aşınma izleri.

II. Grup SAE430B-GGG70 aşınma çifti deneyinde GGG70 disk aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6.25); aşınan yüzeylerde kaybedilen ağırlıklara oranla çizgiler sıklaşmıştır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

I. Grup deneylerde; GGG70 Küresel grafitli dökme demir, GG25 lamel grafitli dökme demir ve 1.2379 soğuk iş takım çeliği pimleri kullanılarak, grafitli SAE430B bronz diskler 15N yük altında ve 60 mm/sn kayma hızında 5000m, 10000m ve 15000m kayma mesafelerinde aşındırılmıştır. II. Grup deneylerde; SAE430B mangan bronzu aynı aşındırıcı malzemelerden pimler kullanılarak, aynı yük altında ve aynı kayma hızında 5000m ve 10000m kayma mesafelerinde aşındırılmıştır. Oda sıcaklığında yapılan, disk üzerinde pim (pin-on-disk) esasına dayanan metal – metal aşınma deneylerinin sonuçları ağırlık kaybı ( $\Delta G$ ) ve sürtünme katsayısı olarak ölçülmüştür. 5000m, 10000m ve 15000m kayma mesafelerinde yüzeylerde meydana gelen aşınma çizgileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1- Yapılan testler sonucunda ortaya çıkan ağırlık kayıpları doğrultusunda I. Grup deneylerde bronz diski en çok aşındıran malzeme GGG70 malzemesi, II. Grup deneylerde bronz diski en çok aşındıran malzeme GG25 malzemesi olarak elde edilmiştir.

2- I. Grup deneylerde GGG70 malzemesi en çok aşındıran malzeme olmasına rağmen sürtünme katsayı değeri GG25 malzemesinden biraz daha küçüktür. Ancak sürtünme katsayı değerlerinde belirgin farklar söz konusu değildir.

3- II. Grup deneylerde en yüksek sürtünme katsayısı değeri GGG70 malzemesinde ölçülmüştür.

4- GGG70 malzemesi deney malzemeleri içerisinde en sert malzemedir, dolayısı ile I. Grup deneylerde en çok aşındıran malzeme olması ile paraleldir. (Sertlik değeri: 311,4 HV1)

5- En çok ağırlık kaybı pimler arasında GG25 malzemesinde gözlemlenmiştir.

6- GGG70 malzemesi en fazla aşındıran olmasına karşın en az ağırlık kaybı veren malzemedir.

7- II. Grup deneylerde elde edilen sonuçlar I. Grup deneyler de elde edilen sonuçlara göre yaklaşık olarak; 1,2379 malzemesinde 12 kat, GG25 malzemesinde 91 kat, GGG70 malzemesinde ise 8 kat daha fazla ağırlık kaybı meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlara göre; disk malzemesinin grafitli olması durumunda, grafitlerin yağlayıcı etkisinden dolayı aşınan malzeme ağırlık kayıplarında önemli azalmalar görülmektedir.

8- I. Grup deneylerde kullanılan pim malzemelerin ağırlık kayıpları ölçüldüğünde, her bir pim malzemenin ağırlık kayıplarında 5000m-10000m kayma mesafeleri arasında ölçülen ağırlık kayıplarında, aşınan malzemedede de olduğu gibi belirgin artışlar gözlemlenmiştir.

9- I. Grup deneylerde sürtünme katsayısı ortalaması en fazla olan malzeme çifti GG25-Grafitli SAE430B, en az olan malzeme çifti ise 1.2379 - Grafitli SAE430B olarak elde edilmiştir. II. Grup deneylerde sürtünme katsayısı ortalaması en fazla olan malzeme çifti GGG70 - SAE430B, en az olan malzeme çifti ise GG25 - SAE430B olarak görülmektedir.

10- Malzemelerin özelliklerine göre değişkenlik gösteren, sürtünme katsayı değerlerinde yağlamadan kaynaklanan artış miktarları ise yaklaşık; SAE430B-1.2379 aşınma çiftinde 2,4 kat , SAE430B-GG25 aşınma çiftinde 1,6 kat, SAE430B-GGG70 aşınma çiftinde ise 2,1 kat olarak kaydedilmiştir

11- GG25 Lamel grafitli dökme demir ve GGG70 Küresel grafitli dökme demirler içerisinde bulunan grafitler sebebiyle aşınma izlerinde siyah renkli grafitin yoğun olduğu gözlemlenirken, 1.2379 malzemesinin aşınma izlerinde grafitlerin yüzey kenarlarında ve pim üzerinde toplandığı görülmektedir.

Yapılan çalışmalar neticesinde alınan sonuçlar ışığında, kalıp içerisinde kullanılan kendinden yağlamayı sağlayan grafitli sürtünme plakalarının GGG70 malzemesi ile temas halinde çalıştırılırken değiştirilme ve bakım sıklığının en fazla olması gerektiği aşındırma oranlarının yüksekliği ile ortaya çıkmıştır. Kalıp boşluk miktarının artmaması için kullanım talimatları malzemelere göre oluşturulmalıdır.



## 8. KAYNAKLAR

- [1] Stone, R., Ball, J.K., “Automotive Engineering Fundamentals”, *SAE International*, (2004).
- [2] Enomoto, Y., Yamamoto, T., “New Materials in Automotive Tribology”, *Tribology Letters*, Vol 21, 13-24, (1998).
- [3] Eyre, T. S., “Friction and Wear Control in Industry”, *Surface Engineering*, Vol 7, 143-148, (1991).
- [4] Schatt, W., Wieters K. P., *Powder Metallurgy*, U.K: EPMA-Shrewsbury,(1997).
- [5] Ünlü, B. S., “Kaymalı Yataklarda Tribolojik Özelliklerin ve Borlanmış Demir Esaslı Malzemelerin Yatak Olarak Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2004).
- [6] Paulo Davim, J., “An Experimental Study of the Tribological Behaviour of the Brass/Steel Pair”, *Materials Processing Technology*, 273-277, (2000).
- [7] Schmidt, R. F., Schmidt, D.G., “Selection and Application of Copper Alloy Castings”, *ASM Handbook (II)*, 346-3557, (1993).
- [8] Prasad, B.K., “Dry Sliding Wear Response of Some Bearing Alloys as Influenced by the Nature of Microconstituents and Sliding Conditions”, *Metall Trans. (A-28)*, 809-815, (1997).
- [9] Backensto, A.B., *Effects of Lubricants on the Properties of Copper-Tin Powders and Compacts*, N.Jersey: APMI, 303-314, (1990).
- [10] Zumgahr, K. H., “Microstructure and Wear of Materials”, Tribology Series Vol 10, *Elsevier*, (1987).
- [11] Karamış, M. B., “Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü”, Doktora tezi (yayımlanmamış), *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 13-18, (1985).
- [12] Odabaş, D., Topal, E. S., “100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması”, 6. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Denizli, 396-405, (1995).
- [13] İpek, R., “AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5155 Çeliğinin Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması”, Doktora Tezi (yayımlanmamış), *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 40-52, (1992).

- [14] Onaran, K., *Malzeme Bilgisi*, İstanbul: Çağlayan Basımevi, 87-95, (1985).
- [15] Selçuk, B., “Civatalı Bağlantılarda Sürtünmenin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 55-84, (1991).
- [16] Karamış, M. B., Odabaş, D., İpek, R., “*Tren Fren Papuçlarında Aşınma Davranışının Etüdü*”, 3. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 175-183, (1988).
- [17] Cöcen Ü., Belevi M., Önel K., “Tane Silisyum Karbür Katkılı Alüminyum Bazlı Kompozitlerin Aşınma Davranışı”, 7. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Denizli, 155-187, (1997).
- [18] İpek, R., “Tren Fren Papuçlarının Aşınmasının Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), *E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 94-102, (1987).
- [19] Akkurt, M., *Makine Elemanları*, Cilt 2, İstanbul: İTÜ Matbaası, 76-79, (1992).
- [20] Odabaş, D., “Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerin Teorik ve Deneysel Araştırılması”, Doktora Tezi (yayımlanmamış), *Fen Bilimleri Enstitüsü Erciyes Üniversitesi*, Kayseri, 58-76, (1991).
- [21] Moore, D.F., *Principles and Applications of Tribology*, Oxford: Pergamon Press, (1975).
- [22] Ulukan, L., “Makina Elemanları III”, Ders Notu, İstanbul, (1993).
- [23] Hutchings, I.M., *Tribology: Friction and wear of Engineering Materials*, London: Adward Arnold, (1992).
- [24] Portakal, A., “Kaymalı Düz Yataklarda Yüzey Pürüzlülüğü ve Aşınma Hızı”, *Mühendis ve Makine*, Cilt 19, 400-408, (1974).
- [25] Pırgors, O., “Abrasive Verschleißverhalten von Stählen bei Gleit – und Wölbewegungen”, *Schmierungstechnik 10*, (1979).
- [26] Yılmaz, F., ‘Sürtünme ve Aşınma’, 9. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 229-247, (1997).
- [27] Gürleyik, M. Y., “Soğuk Deformasyonla Aşınma Direnci Arttırılabilir”, 2. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 501-510, (1986).
- [28] Gürleyik, M. Y., “Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları”, *Mühendis ve Makine*, Cilt 27, 3-14, (1986).
- [29] Onaran, K., *Malzeme Bilgisi*, İstanbul: Çağlayan Basımevi, 87-95, (1985).

- [30] Hurricks, P. L., “Some Metallurgical Factor Controlling the Adhesive and Abrasive Wear Resistance of Steels a Review”, *Wear* 26, 285 – 304, (1973).
- [31] Karamış, M.B., “Traktör Hızı ve Pulluk Çalışma Derinliğinin Uç Demiri Aşınma Hızına Etkileri ve Optimizasyonu”, 2. *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu*, ODTÜ, Gaziantep, 668 -677, (1986).
- [32] Habig, K. H., Verschleiß UND Hörte von Werkstoffen, *Hanser- Verlag, München- Wien*, Germany, 547-554, (1980).
- [33] Weissbach, W., *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. (Çev: S. Anık), Kurtuluş Matbaası, İstanbul, 28-35, (1977).
- [34] Koç, R., “Vagon Boji Bagalarına Alternatif Polimer Malzemelerin Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi (yayımlanmamış), *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 121-142, (2004).
- [35] Gürleyik, M.Y., “Yıkama Aşındırması”, *Mühendis ve Makine*, Cilt 311, Sayı 368, K.T.Ü. Trabzon, 25-34, (1980).
- [36] Karamış, M.B., “Abrasive Aşınma Mekanizmasında Yüzey Basıncının Aşınmaya Etkisi”, 2. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 493-500, (1986).
- [37] Tekin, E., “Madencilikte Kullanılan Aşınma Dayanımlı Demir Alaşımları”, 2 *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 401-409, (1986).
- [38] Lülisdorf, P., “Verschleißprobleme mit Zylinder und Schnecke beim Extrudieren”, *VDI - Bildungswerk*, BW 3019, Traisdorf, 140-152, (1978).
- [39] Akkurt, S., “Poliasetalin Kuru ve Su ile Yağlama Koşullarında Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Bakımından İncelenmesi”, 4. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 585 – 594, (1990).
- [40] Arıkan, R., “MOS2 İlaveli Çinko-Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Yapısı ve Aşınma Özellikleri”, 3. *Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 537-547, (1988).
- [41] Aytaç, A., “A356 Alüminyum Alaşımının Yarı Katı İşleme Üretimi Ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Lisans Tezi, *Z.K.Ü Metal Eğitimi Bölümü Döküm Eğitimi Anabilim Dalı*, Karabük, (2007).
- [42] İzçiler, M., Öcal. İ., “Yüzey topografyasına bağlı olarak aşınmanın ölçümü”, I. *Demir-Çelik Sempozyumu Bildirileri*, TMMOB, Erdemir, Ereğli- Zonguldak, (2001).
- [43] Keleştimur, M.H., “Makine Yapı Çeliklerinde Abrasif Aşınma Direncine Yüzey Sertliğine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1989).

- [44] Karsay, I. S., *Ductile Iron-Production Practies*, USA: AFS, Second Edition, (1990).
- [45] Stafenescu, D. M., “Classification and Basic Metalurgy of Cast Iron”, *Metals Handbook*, 10th edition, ASM International, USA, 3-55, (1990).
- [46] Sen, U., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri”, Doktora tezi, *İ.T.Ü Fen Bil. Enstitüsü*, İstanbul, (1997).
- [47] Labrecque, C., Gagne, M., “Ductile Iron:Fifty years of continous developement”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, (1998).
- [48] Lin, S. C., Lui, T. S., Chen, L. H., Song, J. M., “Effect of pearlite on the vibration-fracture behavior of spheriodal graphite cast irons under resonant conditions”, *Metallurgical and Materials Transactions*, 33(A), 26-23, (2002).
- [49] I.Otomotiv ve Yan sanayi Sempozyumu, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 115-120, (1985).
- [50] Şen, U., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri”, Doktora tezi, *İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1997).
- [51] Özel, A., “GGG 40-80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Östemperleme Isıl İşleminin Darbe Direnci ve Darbe Geçiş Sıcaklığına Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1994).
- [52] Imasogie, B.I., Wendt, U., “Characterization Of Graphite Particle Shape In Spheroidal Graphite Iron Using A Computer-Based Image Analyzer”, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, USA, 1-12, (2004).
- [53] ASM Handbook, “Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys”, Metals Park, ASM Int, (1990).
- [54] Çavusoğlu, E.N., *Döküm Teknolojisi I*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, (1992).
- [55] Rossi B, E., *Welding Engineering*, *Mcgraw Hill Book Company*, (1954).
- [56] Erdoğan, M., *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, Nobel Yayın Dağıtım.
- [57] Güleç, Ş. ve Aran, Ş., *Malzeme Bilgisi*, MBEAE Matbaası, (1987).
- [58] Edward, M., Wright Paul K., *Metal Cutting*, Boston: 4. Edition, Melbourne New Delhi, Oxford Auckland Johannesburg, (2000).
- [59] Girit,O., “Dın 1,2379 Ve Sleipner Malzemelerin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi*, İstanbul, (2006).

[60] Metals Handbook, “Atlas of Microstructure of Industrial Alloys”, Eight edition, Vol 7, 294-295, (1972).

[61] Hasirci, H., Gül, F., “Al-Cu Döküm Alaşımlarının Abrasif Aşınma Davranışına Magnezyum ve Nikel’in Etkileri”, *11. Uluslar arası Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Denizli, Cilt-II, 1306-1313, (2006).

[62] Gül, F., “Ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınma dayanımı üzerine borlama yüzey işleminin etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 25, No 2, 389-395, (2010).

[63] Ünlü, B. S., “Kaymalı Yataklarda Tribolojik Özelliklerin ve Borlanmış Demir Esaslı Malzemelerin Yatak Olarak Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2004)

[64] Çetinkaya, C., “An investigation of the wear behaviours of white cast irons under different compositions”, *Materials and Design* 27, 437-445, (2006).

[65] Chieh F., Ming-Che C., Chia-Ming C., Weite W., “Microstructure change caused by (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys”, *Surface and Coatings Technology*, 908-912, (2006).

[66] Ulutan M., “AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007).