İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HERMETİK KOMPRESÖRLER İÇİN İLERİ YATAK MALZEMELERİ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kemal SARIİBRAHİMOĞLU

Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HERMETİK KOMPRESÖRLER İÇİN İLERİ YATAK MALZEMELERİ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Kemal SARIİBRAHİMOĞLU
(506051427)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Kasım 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2009

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Hüseyin KIZIL**
Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Eyüp Sabri KAYALI (İ.T.Ü.)**
Doç. Dr. Şafak YILMAZ (İ.T.Ü.)

OCAK 2009

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda her türlü desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Hüseyin KIZIL'a sonsuz teşekkür ederim. Sabancı Üniversitesi' nde bana her konuda yardımcı olan sayın hocam Doç.Dr. Mahmut F. AKŞİT ve Atatürk Üniversitesi' nden sayın Prof.Dr. İhsan EFEOĞLU hocama bilimsel katkılarından dolayı ve Arçelik A.Ş.'den Sayın Dr. Feriha BİROL ve Dr. Hüsnü KERPİTÇİ'ye yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2009 Met. Müh. Kemal SARIİBRAHİMOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR ..... **v**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xi**
SUMMARY ..... **xii**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı **1**

2. GENEL TRİBOLOJİK KAVRAMLAR **2**

2.1. Sürtünme **3**

2.1.1. Sürtünme ısınması 6

2.2. Aşınma **7**

2.2.1. Yapışma aşınması 10
2.2.2. Abrasif aşınma 14
2.2.3. Yorulma aşınması 19
2.2.4. Korozif aşınma 20
2.2.5. Kazımalı aşınma 22
2.2.6. Erozif aşınma 22

3. KOMPRESÖRLER **24**

3.1. Kompresör Çeşitleri **25**

3.1.1. Pozitif yer değiştirmeli kompresörler 25
3.1.2. Kinetik kompresörler 26

3.2. Pistonlu Kompresör Tipleri **27**

3.2.1. Açık tip kompresörler 27
3.2.2. Hermetik kompresörler 28

3.3. Kompresörlerde Kullanılan Soğutucu Akışkanlar **32**

3.4. Yağlayıcılar **36**

3.4.1. Katı yağlayıcılar 39

3.5. Ev Tipi Soğutucular **44**

3.6. Kompresörlerin Çalışma Şartları ve Aşınmanın Gerçekleştiği Bölgeler **45**

3.7. Yatak Malzemelerinden Beklenen Özellikler **47**

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **49**

4.1. Tribometre Test Cihazı **49**

4.2. Tribometre Testlerinde Kullanılan Malzemeler **50**

4.2.1. Yüzey pürüzlülük ölçümleri 55

4.3. Ölçüm Sistemi Analizi (ÖSA) – GageR&R Testleri **56**

4.3.1. Temizleme kademeleri 56
4.3.2. GageR&R test sabitleri 57
4.3.3. Sonuçlar 57

4.4. Yatak Malzemelerinin Hava Ortamında Gerçekleştirilen Tribometre Testleri **60**

4.4.1. Test prosedürü 60
4.4.2. Sonuçlar 61
4.4.3. Uygulanan yükün arttırılması 67
4.4.4. Sınır yağlı, hava ortamı tribometre test sonuçları 69

4.5. İsobütan Ortamında Gerçekleştirilen Tribometre Testleri **72**

4.5.1. Yatak malzemelerinin R600a ortamındaki yağsız tribometre testleri 73
4.5.2. Yatak malzemelerinin R600a ortamındaki sınır yağlı tribometre testleri 76

4.6. Sinter Disk Numunelere Molibden Sülfür Kaplama Yöntemi **78**

4.6.1. Manyetik alanda sıçratma tekniği 79

4.7. Mangan Fosfat Kaplama Yöntemi **80**

4.8. MoS_2 Kaplama Paramereleri ve Kaplamaların Çizik Testleri. **81**

4.9. Molibden sülfür ve Mangan Fosfat Kaplamaların Tribometre Testleri **86**

4.9.1. Kaplamaların R600a ortamındaki yağsız test sonuçları 86
4.9.2. Kaplamaların R600a ortamındaki sınır yağlı test sonuçları 89

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA **92**

KAYNAKLAR **95**

ÖZGEÇMİŞ **100**

KISALTMALAR

EHD	:	Elastohidrodinamik yağlama
CFC	:	Kloroflorokarbon
HCFC	:	Hidrokloroflorokarbon
POE	:	Poly-ester yağ

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kompresörlerde kullanılan soğutucu gazların ozon tabakası ve küresel ısınma potansiyelleri……...……..…….. 33
Çizelge 3.2 : Soğutucu gazlar ve kimyasal formülleri……...….....……... 35
Çizelge 3.3 : Tribolojik uygulamalarda sıvı yağlayıcılar ile katı yağlayıcıların karşılaştırılması…….…… 40
Çizelge 3.4 : Kendiliğinden yağlama özelliğine sahip katı malzemeler……..….. 42
Çizelge 4.1 : 100Cr6 pim malzemesinin sertlik ve kompozisyon değerleri…….. 51
Çizelge 4.2 : Biyel yatağı demir alaşım sinter malzemesinin kimyasal yapı bileşenleri.....……..... 52
Çizelge 4.3 : Ölçüm Sistemi Analizi (ÖSA) aşınma test parametreleri.....….... 57
Çizelge 4.4 : Demir esaslı sinterlenmiş çelik disk malzemesinin ağırlık kayıpları…..... 58
Çizelge 4.5 : 100Cr6 pim malzemesinin ağırlık kayıpları……. 58
Çizelge 4.6 : Gage R&R Minitab programı test sonuçları…...……. 58
Çizelge 4.7 : Disk üstünde pim aşınma testi sabitleri…….…..... 61
Çizelge 4.8 : Buhar işlemsiz sinter malzemesinin 40 N yükte gerçekleştirilen, yağsız hava ortamı tribometre test sonuçları..... 62
Çizelge 4.9 : CFUBMS prosesinde her bir deney için Pulsed-dc durumunda kullanılanılacak çalışma şartları..... 82
Çizelge 4.10 : CFUBMS prosesinde herbir deney için Pulsed-dc durumunda kullanılanılacak şartlar ve oluşan kaplama sertlikleri.....82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Temas eden yüzeyler arasındaki gerçek temas bölgeleri……...5
Şekil 2.2 : Aşınma mekanizmaları ve temas tiplerinin tanımlanmaları…….. 8
Şekil 2.3 : Metal yüzeyinde oluşan katmanlar……... 9
Şekil 2.4 : Dört Aşınma Tipinin Şematik Gösterimi…….. 10
Şekil 2.5 : Sürtünme sırasında temas eden pürüzlülüklerin etkileşimleri……... 11
Şekil 2.6 : Sertlik ve aşınma oranlarının birbirlerine göre dağılım şeması…….12
Şekil 2.7 : Üç elemanlı abrazif aşınmanın oluşum şekli, (a) üçüncü elemanın yüzeyde kayması, (b) üçüncü elemanın dönme yapması..... 15
Şekil 2.8 : Abrazif sert pürüzün yumuşak malzeme yüzeyinde oyuk açması.....…. 15
Şekil 2.9 : Sert kürenin yumuşak malzeme yüzeyinde kayarken oluşturduğu plastik deformasyon bölgeleri...…….. 16
Şekil 2.10 : Abrazif etki sonucu oluşan yüzey profilleri……. 17
Şekil 2.11 : Şiddetli aşınma sırasında meydana gelen aşınma mekanizmaları mikro modeli……. 18
Şekil 2.12 : Yorulma aşınmasında yüzey altında meydana gelen deformasyon bölgeleri…….. 20
Şekil 2.13 : Korozif aşınma oluşumu……22
Şekil 3.1 : Kapalı tip kompresörün yandan kesit görünümü……28
Şekil 3.2 : Piston, piston pim deliği, biyel kolu, krank mili bağlantısı...……... 29
Şekil 3.3 : Hermetik tip kompresörün iç parçaları……. 30
Şekil 3.4 : Molibdenit, grafit, hegzagonal bornitrit,ve borik asitin tabakalı kristal yapılarına ait şematik gösterimler……. 43
Şekil 3.5 : Bir soğutucu sistemin genel görünüşü……44
Şekil 3.6 : Hermetik kompresörün ana parçaları ve aşınma bölgeleri.....…… 46
Şekil 4.1 : Nanovea Tribometre cihazı ……..…… 49
Şekil 4.2 : Normalize durumdaki 100Cr6 çeliğinin karbürleme ile değişen iç yapısı ……51
Şekil 4.3 : Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları…… 56
Şekil 4.4 Nanovea cihazında gerçekleştirilen sinter disk -100Cr6 pim aşınma testleri……57
Şekil 4.5 : Anova yöntemi ile deneysel tasarım sonuç grafikleri……... 59
Şekil 4.6 : Ö.S.A. aşınma testleri sinter disk ağırlık kayıpları…….59
Şekil 4.7 : Buhar işlemsiz sinter çelik-100Cr6 malzemesi sürtünme katsayısı-mesafe grafiği……...…… 63

Şekil 4.8 : İşlemsiz sinter malzemenin aşınma oranı – yarıçap grafiği…….. 64
Şekil 4.9 : Buhar işlemli çelik malzemenin ağırlık kaybı – zaman grafiği ….. 65
Şekil 4.10 : 100Cr6 çelik malzemesinin ağırlık kaybı –zaman grafiği……...….66
Şekil 4.11 : Buhar işlemli sinter çelik malzemesinin sürtünme katsayısı zaman grafiği..... 66
Şekil 4.12 : (a) Buhar işlemsiz sinter malzeme, (b) buhar işlemli sinter malzemenin, aşınma testleri sonucunda meydana gelen ağırlık kayıpları karşılaştırmaları.....67
Şekil 4.13 : (a) İşlemsiz sinter malzeme (b) buhar işlemli sinter malzemenin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri 67
Şekil 4.14 : Buhar işlemli sinter malzeme ve 100Cr6 pim malzemesinin optik mikroskop altındaki aşınma izi görüntüleri..... 68
Şekil 4.15 : Buhar işlemsiz sinter malzeme ve 100Cr6 pim malzemesinin optik mikroskop altındaki aşınma izi görüntüleri..... 68
Şekil 4.16 : Buhar işlemli, b. işlemsiz sinter çelik malzemenin tarama elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri (a) buhar işlemli, (b) buhar işlemsiz sinter çelik malzemedir..... 69
Şekil 4.17 : (a) Buhar işlemli (b) buhar işlemsiz sinter çelik disk malzemenin sınır yağlı test sonucundaki sürtünme katsayısı – mesafe grafikleri 70
Şekil 4.18 : Buhar işlemli malzeme ve işlemsiz sinter malzemenin sınır yağlı test sonucundaki ağırlık kayıpları karşılaştırmaları..... 71
Şekil 4.19 : Buhar işlemli sinterlenmiş çelik disk-100Cr6 malzemenin yağlı testi sonucundaki aşınma izi görüntüleri..... 71
Şekil 4.20 : Buhar işlemsiz sinterlenmiş çelik disk-100Cr6 malzemenin yağlı test sonundaki aşınma izi görüntüleri..... 72
Şekil 4.21 : Buhar işlemsiz ve buhar işlemli sinter çelik disk-100Cr6 malzemenin R600a ortamındaki sürtünme katsayısı mesafe grafikleri 73
Şekil 4.22 : Buhar işlemsiz sinter malzemenin, isobütan ve hava ortamı ağırlık kaybı –zaman grafikleri karşılaştırmaları.....74
Şekil 4.23 : Buhar işlemli sinter malzemenin isobütan ve hava ortamı ağırlık kaybı –zaman grafikleri karşılaştırmaları..... 74
Şekil 4.24 : Buhar işlemli numunenin aşınma izinin optik mikroskop altında görüntüsü (ortam r600a)..... 75
Şekil 4.25 : Sinter numunelerin aşınma izi bölgesinden alınan EDS ve SEM görüntüleri (test ortamı r600a). (a) Buhar işlemli (b) Buhar işlemsiz..... 76
Şekil 4.26 : İşlemsiz sinter ve buhar işlemli sinter malzemesinin sınır yağlı R600a ortamı ve hava ortamı aşınma testleri. a) B.işlemli R600a ortamında, (b) b. işlemsiz r600a ortamında (c) b. işlemli hava ortamında (d) b. işlemsiz hava ortamındadır.....77
Şekil 4.27 : Buhar işlemsiz sinter ve buhar işlemli sinter malzemesinin tarama elektron mikroskobu görüntüleri; (a) b. işlemli malzeme, (b) buhar işlemsiz çelik disk malzemedir..... 78
Şekil 4.28 : (a) $MnPO_4$ bağ yapısının {100} doğrultusu izdüşüm görüntüsü, (b) mangan, fosfor atomlarının tetrahedral ve oktahedral yerleşimleridir..... 81
Şekil 4.29 : Çizik testi sonunda elde edilen yüzey görüntüsü..... 83

Şekil 4.30 : Buhar işlemli sinter üzerine kaplanan MoS_2 kaplamaların çizik testi sonundaki yüzey görüntüleri..... 84
Şekil 4.31 : İşlemsiz sinter malzeme üzerine kaplanan MoS_2 kaplamaların çizik testi sonundaki yüzey görüntüleri..... 84
Şekil 4.32 : Çizik testi sonundaki akustik emisyon, uygulanan yük ve sürtünme katsayısı grafikleri (Run 9-5)..... 85
Şekil 4.33 : Çizik testi sonundaki akustik emisyon, uygulanan yük ve sürtünme katsayısı grafikleri (Run 3-17)..... 85
Şekil 4.34 : Molibden sülfür kaplanmış numunelerin R600a ortamında 100Cr6'a karşı gerçekleştirmiş yağsız tribometre test sonuçları; (a) Run 1-1, işlemsiz sinter üzerine kaplı MoS_2, (b) Run 9-20, b.işlemli üzerine kaplı MoS_2 ,(c)Run 9-5, b. işlemsiz sinter disk üzerine kaplı MoS_2 kaplamadır..... 86
Şekil 4.35 : Kaplamaların aşınma izlerinin SEM görüntüleri; (a) mangan fosfatın 8. saat sonundaki aşınma izi bölgesi, (b) buhar işlemli sinter üzerine kaplı MoS_2 kaplamadaki yorulma çatlağı, (c) buhar işlemsiz sinter çelik kaplı MoS_2 kaplamadaki yorulma çatlağı, (d) MoS_2 kaplamanın 6. saat sonundaki aşınma izi görüntüsüdür.....88
Şekil 4.36 : Mangan fosfat kaplı buhar işlemli numunenin 100Cr6 pim malzemesine karşı olan sürtünme katsayısı grafiği..... 88
Şekil 4.37 : Malzemelerin R600a ortamındaki yağsız aşınma testlerinin ağırlık kayıpları karşılaştırmaları 89
Şekil 4.38 : MoS_2 ve mangan fosfat kaplamaların sınır yağlı aşınma testleri sonucundaki sürtünme katsayısı – mesafe grafikleri (ortam R600a). (a) Buhar işlemli çelik disk üzerine kaplanmış MoS_2 (run 9-20). (b) Buhar işlemli çelik disk üzerine kaplanmış mangan fosfat. (c) Buhar işlemsiz sinter çelik disk üzerine kaplanmış MoS_2 (run 9-5)..... 90

SEMBOL LİSTESİ

Fs	:	Sürtünme kuvveti
μs	:	Statik sürtünme katsayısı
Fn,L	:	Yük
μk	:	Kinetik sürtünme katsayısı
Ar	:	Gerçek tema bölgesi
A	:	Temas Alanı
τ a	:	Kayma gerilimi
μ_d	:	Çıkıntı deformasonundan kaynaklanan sürtünme
μ_a	:	Yapışmadan kaynaklanan sürtünme
Q,P_μ	:	Sürtünme enerjisi
v	:	Yüzey hızı
Ph,Ps	:	Sertlik değerleri
R	:	Aşınma oranı
x,D	:	Kayma mesafesi
H	:	Yumuşak malzemenin sertliği
Wadh	:	Aşınma hacmi
h	:	Aşınma derinliği
c	:	Aşınma katsayısı
n	:	Pürüzlülük sayısı
k	:	Aşınma katsayısı
d	:	Pürüz çapı
σ	:	Uygulanan gerilim
tan θ	:	Abrasif parçanın çıkıntı eğimi
E	:	Elastik modül
t	:	Hata oluşum süresi
σ_a	:	Açık alan gerilimi
Ra	:	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
M_1	:	Malzemedeki ilk ağırlık
M_2	:	Malzemedeki son ağırlık
ρ	:	Yoğunluk

HERMETİK KOMPRESÖRLER İÇİN İLERİ YATAK MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Sıvılar buharlaşırken çevreden ısı çeker. Bu faz dönüşümü ile ısı kaybının neden olduğu sıcaklık azalmasına "soğuma" denir. Soğutma işlemini gerçekleştirmek için mekanik elemanlar kullanılmasına "mekanik soğutma" denir.

Soğutma tekniğinin ilerlemesinin ve evlerimize kadar girebilmesinin en önemli nedeni soğutucuyu devir daim yapan ve kompresör adı verilen mekanik sistemin geliştirilmesi olmuştur. Kompresörler, soğutucu akışkanı buharlaştırıcıdan emen ve sıkıştırarak yoğunlaştırıcıya basan cihazlardır olarak tanımlanabilir. Günümüzde kullanılan buzdolapları hermetik (kapalı tip) kompresörler ile çalışmaktadır. Bu kompresörler pistonlu tip kompresörler sınıfına girer. Pistonlu kompresörler bir silindir içersinde gidip gelme hareketi yapan bir pistonla sıkıştırma işlemini gerçekleştirirler.

Birleşmiş Milletler Dünya Çevre programı çerçevesinde görüşmeler sonrası çevresel zararın minimuma indirilebilmesi için soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanların da değiştirilmesine karar verilmiştir. Yeni, doğal, çevresel zararı olmayan soğutucu akışkanların kullanılması kompresörlerdeki tüm parçaların tribolojik etkileşimlerinin değişmesine neden olmuştur. Yüksek devirlerde çalışan pistonlu kompresörlerde meydana gelen yüksek aşınma sonucu tüm sistemin verimi düşmekte, kullanım ömrü azalmakta ve sistem sürekli revizyona girmektedir.

Bu çalışmanın amacı yeni soğutucularla birlikte daha az yağ ile çalışan, daha uzun ömürlü kompresörlerin geliştirilmesidir. PVD magnetron püskürtme yöntemi ile kaplama parametreleri değiştirilerek MoS_2 kaplanmış ve mevcut kullanılmakta olan $MnPO_4$ kaplama ile birlikte aşınma davranışı incelenmiştir. Kaplamasız, ısıl işlemli, yüzey buhar işlemli ve MoS_2 kaplanmış numunelerin aşınma deneyleri yapılmıştır. MoS_2 ile kullanılacak en uygun taban malzemesi belirlenmesi amacıyla MoS_2 için çizik testleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri disk üzerinde pim deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Az yağlı gerçekleştirilen deneylerde MoS_2 'nin $MnPO_4$ yerine kullanıldığında daha uzun ömürlü sistem elde edilebileceği bulunmuştur.

THE DEVELOPMENT OF ADVANCED BEARING MATERIALS FOR HERMETICAL COMPRESSORS

SUMMARY

Liquids absorb heat from atmosphere when they are evaporated. Dropping the temperature of an environment is called “cooling”. This basic technique transfers heat from one place to another by phase transformation. Mechanical cooling is converting the heat by mechanical components to carry out cooling process.

Major reason of the development of the cooling techniques and penetration to our houses is the development of mechanical compressors which circulates cooler liquids. Compressors can be defined as equipments which vacuum the cooling fluid from evaporator and presses to the condenser by pressurising it. Hermetical compressors fullfill their function by inner pistons which works up and down to compress the cooler liquid to the evaporator and emit it from condenser. These are the compressors which are classified as piston pump type of compressors. These type of compressors realise pressing process with a piston moving up and down in a cylinder.

As per the discussions within the context of the United Nations World Environmental Protection Programme, in order to minimise the environmental damage, it is decided to change the cooling fluids to less harmful ones. The use of new, natural, enivronmental harmless coolers causes the change of the tribological interaction of compressor parts. High power and high speed piston type hermetic compressors having high wear and friction on their components, frequently needs revision due to the decreasing system performance and requires continous revision of the system.

The main objective of this study is the development of the long-lived compressors working with less oil together with new coolers. By PVD magnetron spraying method, MoS_2 coatings developed with various coating parameters and currently used manganese phosphate coatings tribological behaviour has been examined. Uncoated heat treated sintered steel, surface steam treated steel and MoS_2 coated samples were tested with Nanovea tribotester. The scratch tests on MoS_2 were accomplished to determine most convenient base equipment to be used with disk material. Wear tests has been realised on pin on disk experiment mechanism. As a result of the experiments realised with starved lubrication and isobutane environment, it is found out that when MoS_2 is used instead of $MnPO_4$ the system’s lifetime is extended.

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

Kompresörler, düşük basınç ve sıcaklıktaki soğutucu akışkanı buharlaştırıcıdan emen ve bu gazı sıkıştırarak yoğunlaştırıcıya basan cihazlardır. Hızla gelişen ülkemizde olmazsa olmazlardan biri olarak kendini kanıtlamış olan kompresörler; özellikle beyaz eşya, otomotiv, cam şişe, çelik, pet şişe, plastik endüstrisinde ve daha birçok alanda kullanılmaktadırlar. Kompresörlerin gelişimi ve kullanım ömürlerinin artması endüstri sektörleri için işlerin hızlanması, verimin artması anlamına gelmektedir.

Aşınma, birbirleri ile temas eden hareketli cisimlerde sürtünme etkisiyle oluşan kütle kaybı olarak tanımlanmaktadır. Triboloji biliminin bir konusu olan aşınma, çeşitli makine ve techizatın kullanım ömrünü sınırlayan önemli bir hasar türüdür.

Kompresörlerde meydana gelen aşınma, kullanım ömürlerini sınırlayan önemli bir problemdir. Bu problem özellikle yağın nüfus etmediği bölgelerde malzeme kaybına ve bunun sonucu olarak da makinenin işlemez hale gemesine neden olmaktadır.

Sürtünen yüzeylerdeki aşınma problemi çeşitli yağlardan oluşan bir film tabakası oluşturularak azaltılabilinir. Günümüzde sıvı yağlayıcıların kullanımadığı bölgelerde katı yağlayıcıların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Katı yağlayıcıların sıvılardan daha çok avantajı olmasına rağmen katı filmin aşınma problemini önleme etkisi; kaplama parametrelerine ve kullanılacak yüzeylerde tutunabilme kabiliyetine büyük ölçüde bağlıdır.

Bu çalışmada kapalı tip kompresörlerde kullanılan piston pimi ile biyel kolu yatağı arasındaki aşınma problemi incelenmiştir. Disk üstünde pim tribometre cihazı ve çizik testi cihazı kullanılarak, kaplamaların dayanım ömürlerine bakılmıştır. Soğutucu gaz ile birlikte yapılan testler neticesinde farklı tip kaplama parametreleri ile kaplanmış malzemeler denenerek koruma yöntemleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

2. GENEL TRİBOLOJİK KAVRAMLAR

Triboloji, hareket halinde olan yüzeylerin birbirleri ile etkileşimlerini inceleyen; sürtünme, yapışma, aşınma ve yağlama konularını içeren bilim ve teknoloji dalıdır. Triboloji bilimi, 1966 yılında İngiltere Hükümeti'nin sürtünme ve aşınma azaltılmasıyla ilgili ekonomik tasarruf kararı almasıyla başlamıştır [1].

Sanayileşmiş birçok ülkede, makineler ve sistemlerin ömrünü uzatmak, ve daha verimli hale getirmek, güvenilirliği arttırmak, çevresel zararı minimuma indirgemek gibi ihtiyaçlardan dolayı sürtünme ve aşınmayı azaltmak böylece maliyet kaybı, zaman kaybı ve diğer bir çok zararın minimuma indirilimesini sağlamak amacıyla yapılan bir araştırma dalı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Triboloji'nin en çok makinelerin çalışmasında rol oynadığı düşünülse de, aslında günlük yaşamımızı her düzeyde etkiler. Otomobil tekerleklerinin aşınması, bıçakların ve diğer keskin aletlerin körleşmesi, bilgisayar sabit disklerinin ömürlerinin kısalması, asfalt sokak ve yolların aşınmaya uğraması gibi triboloji biliminin kapsamına giren gündelik sorunlar ulusal gelirimize çok büyük bir yük getirmektedirler. İnsanların kaygan bir zeminde dengelerini kaybedip düşmeleri, karlı veya ıslak yollarda arabaların kontrollerini yitirerek kazalara neden olmaları da bu bilim dalının konu alanları içersindeki gündelik sorunlardır [1].

Genel bir bakış açısı olarak aşınma, iki farklı katı yüzeyin atomlarının ya da moleküllerinin birbirleri ile etkileşimi sonucu meydana geldiği bilinmektedir. Ancak bu bakış açısı triboloji gibi geniş kapsamlı bir hasar konusuna eksik bir bakış açısıdır. Tribolojik davranış sadece malzemelerin yüzey şartları ile ilgili unsur olmadığı gibi; malzemenin mekanik özelliklerine, malzemenin şekline, alt yüzey şartlarına, üretim prosesine, ortam koşullarına, kimyasal ve fiziksel özellikler gibi daha birçok faktöre göre değişebilen geniş bir içeriğe sahip hasar mekanizmalarını kapsamaktadır [2].

Parçaların birbirlerine sürtünmesi ile yüzeylerde malzeme kaybına bağlı olarak hasar oluşur. Bu malzeme kaybının çok az olması bile çeşitli aşınma mekanizmaları ile tüm sistemin akışını etkileyebilir. Bu kayıpların azaltılması için yağlama teknikleri, uygun malzeme seçimi ve tasarım değişiklikleri ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Son yıllarda triboloji araştırıcıları bu yaklaşımların dışında, farklı yüzey kaplama yöntemleri ile aşınma hasarından korunma yollarını denemektedir.

Farklı tribolojik gereksinimleri karşılayabilmek için kaplanmış yüzey; sertlik, yapışma, elastisite, kayma dayanımı, kırılma tokluğu, ısıl genleşme, pürüzlülük, kalınlık gibi değişkenlerin uygun bir birleşimine sahip olmalıdır [3]. Bu özellikler ise ancak farklı kaplama yöntemleri ve kaplanacak malzemenin özelliği gibi birçok değişkene dayalı olarak geniş kapsamlı araştırmalar yardımıyla bulunur. Yüzey mühendisliğinde başlıca problem, bu değişkenlerin aynı anda sağlanabilmesindeki zorluklardan kaynaklanmaktadır. Örneğin sertlik ve mukavemet artışına çoğunlukla tokluğun ve yapışmanın azalması eşlik eder. Bu yüzden etkin kaplama tasarımının, hem kaplama sisteminin teknik özelliklerini hem de ana malzeme üzerine etkin olararak yapışması ilgili gereksinimleri aynı anda sağlamalıdır [1].

Triboloji tanımını tam olarak anlamak için sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını ve bu kavramları oluşturan mekanizmaların da bilinmesi gerekmektedir.

2.1 Sürtünme

Sürtünme, birbirine göre hareket eden iki nesnenin arasında oluşan ve harekete karşı koyan kuvvete verilen isimdir. Coulomb (1736-1806) tarafından ortaya atılan sürtünme kanununda, kaymayı başlatmak veya devam ettirmek için gerekli kuvvetin, Fs, normal yük Fn ile orantılı olduğu ve bu oranın da μ olrak ifade edilen sürtünme katsayısına eşit olduğu belirtilir.

$$Fs = \mu s \, . \, Fn \qquad \textbf{(2.1)}$$

Burada, μ_s, statik sürtünme katsayısı olarak ifade edilir. Temas noktalarına atomik bağlanma sonucu oluşan yapışma kuvvetini yenen bir kuvvet uygulandığında malzemeler birbirleri üzerinde kayma hareketi yapmaya başlarlar. Kayma başladıktan sonra sürtünme katsayısında bir azalma meydana gelir ($\mu_k < \mu_s$) ve bu durumda şu bağıntı yazılabilir:

$$Fk = \mu k \, . \, Fn \qquad \textbf{(2.2)}$$

Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısı olarak belirtilir. F_n normal uygulanan yük olarak tanımlanmıştır.

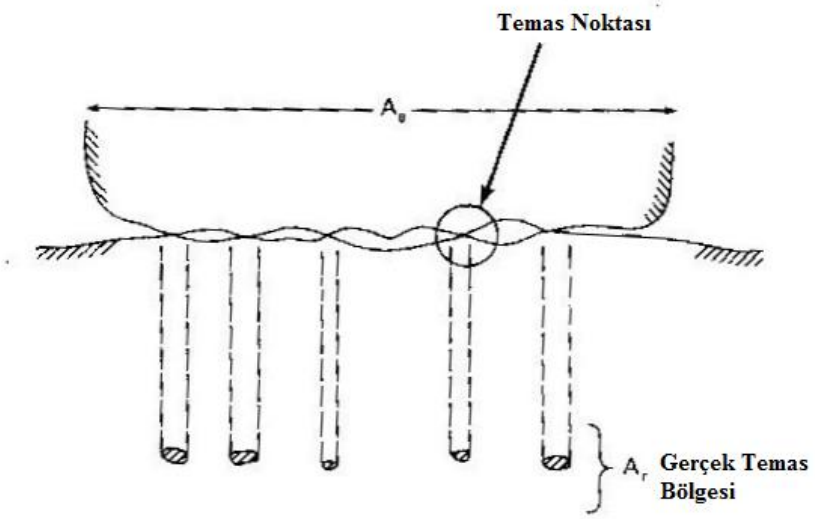
Statik sürtünme katsayısı zamana bağımlı olarak değişir. Bekleme süresinin uzunluğuna göre temiz iki yüzey arasında yapışma kuvvetlerden kaynaklanan atom atoma bağ yapma olasılığı yükselir ve sonuç olarak sürtünme katsayısı artar [2].

Malzemelerin yüzeyleri çok hassas işlense ve parlatılsa bile, yüzeydeki girinti ve çıkıntılar yani yüzey pürüzlülükleri tamamen giderilemez. Sanılanın aksine iki yüzeyin birbiri ile teması, görünen tüm temas alanı boyunca olmamaktadır. Temas eden çıkıntılar, pürüzler ilk ve gerçek temas bölgelerini oluşturuken, yük taşıma görevini de üstlenmektedirler. Yüzeylere etki eden yük bu temas noktalarından desteklenir. Bu modelin basit şekli Amontons (1699), Coulomb(1785), ve Morin (1833) tarafından geliştirilmiş, sürtünme kuvvetinin, uygulanan yük ve tüm kontak yüzeyinden bağımsız olduğu hipotezi ortaya çıkmıştır [1,2].

Bowden ve Tabor modelleri ise sürtünme kuvvetinin yapışma ve deformasyon terimlerinden kaynaklandığını göstermiştir. İki malzeme temas halinde kaymaya zorlandığı zaman, bu iki malzemedeki yapışmadan dolayı birbirlerine kaynayacaklarını ifade etmiştir. Deformasyon kuvveti etkisinde ise sert bir çıkıntının veya partikülün daha yumuşak olan karşı malzeme içine batacağını ve yumuşak malzemedeki plastik akışın, harekete karşı gösterdiği direncin, sürtünme kuvvetini etkileyeceğini öne sürmüşlerdir.

Günümüze kadar yapılmış olan çalışmalardan, metal teması sırasında birbirleri ile etkileşen çıkıntılarda interatomik etkileşim sonucu yapışma kuvvetlerinin meydana geldiği bilinmektedir. Bu atomlar arası etkileşim; kovalent, iyonik, metalik, elektrostatik, hidrojen veya Van der Waals bağları ile bağlanmaları etkisiyle meydana gelmektedir [1,2,4].

İki yüzey arasında meydana gelen temas sırasında yüzeydeki pürüzlülükler; malzemelerin elastik modüllerine, sertliklerine, yüklenmeye, hıza bağlı olarak elastik veya plastik olarak deforme olabilirler. Ayrıca temas sırasında pürüzlerin atomik olarak etkileşimleri sonucu yapışma etkisi meydana gelebilir. Yüzey çıkıntılarının fazla olması pürüzler arası mekanik kitlenmenin ve yapışmanın fazla olmasına neden olur. Pürüzlülüğün çok az olması ise gerçek temas alanının artmasına neden olmaktadır. Gerçek temas alanın artmasıyla sürtünen yüzeylerdeki temas bölgelerinin de artması, aşınma problemini azalttığı düşünülse de, yağ ile kullanılan sistemlerde yağ tutma kapasitesinin arttırılması amacıyla pürüzlü yüzey istenmektedir.



Şekil 2.1 : Temas eden yüzeyler arasındaki gerçek temas bölgeleri

Statik ve kinetik sürtünme katsayıları arasındaki fark bu teorilerden kaynaklanır. Statik temas sırasında temas bölgelerinde oluşan plastik deformasyon ve baskı kuvveti, çıkıntıların soğuk kaynağı ile temas alanları boyunca atom atoma bağ oluşumuna neden olur. Kinetik temas sırasında atom atoma bağ yapısı oluşabilecek zaman olmaz ve kinetik aşınma katsayısı statik aşınma katsayısından daha düşük değerde çıkar. Statik sürtünme durumda oluşan atom bağları sebebiyle, sürtünen iki malzemenin kayması için kayma akma gerilmesi seviyesinde bir dış gerilmeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle kaymaya sebep olan sürtünme kuvveti (Fs) aşağıdaki şu bağıntıyla ifade edilir ;

$$Fs = A \cdot \tau a \qquad \textbf{(2.3)}$$

Bu bağıntıdan temas alanı (A) ve kaymanın gerçekleştiği kuvvet (Fs) ile doğru orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Temas alanı azaldığında kitlenmelerin az olması sonucu, kaymanın başlaması için gerekli kuvvet de azalacaktır. Kinetik temas sırasında temas alanında atomlar arası bağlanma için gerekli zaman oluşmadığı için bağlanma alanı azalmaktadır, sürtünme kuvvetinin azalmasının nedeni de bu sebebe dayanmaktadır [5].

Sürtünmenin etkisi üç kademeye ayrılabilir; bunlardan biri çıkıntı deformasyonundan, diğeri yapışmadan, bir diğeri ise süpürmeden kaynaklanır.

Çıkıntı deformasyonunun statik sürtünme katsayısındaki değişime neden olduğu bilinmektedir. Kayma başladıktan sonra, çıkıntılar deforme olacağından çıkıntı kitlenmesi meydana gelemez. Bu bileşen, sürekli yeni çıkıntılar meydana getirmesi halinde kararlı hal sürtünmesine neden olabilir [1].

Yapışmadan kaynaklanan sürtünmede ise, iki yüzeyin birbirleri üzerine bastırıldığından dolayı birbirlerine kaynamış çıkıntıların zayıf olan bağ yapılarından kopmaya başladıkları görülmektedir. Kopma, yumuşak malzemeden gerçekleştiğinde sert malzeme yüzeyine partikül yapışması meydana gelebilir. Yüksek yapışmadan kaynaklanan yüksek sürtünme katsayısı değerleri, kayma prosesinin oksitlenme veya kirlenme olmadan devam etmesi sonucu oluşur [1,2]. Yapışma aşınması iyi yağlama ile engellenebilir.

Süpürmeden kaynaklanan sürtünme, çıkıntıların yumuşak malzeme yüzeyini deforme edip oyuklar açması şeklinde meydana gelir. Süpürme etkisinin yüksek olması, iki benzer metalin birbiri üzerinde kayması sırasında, derinlere batan aşınma partiküllerinin neden olduğu sürtünme sonucu meydana gelmektedir [1,2].

Sürtünme sırasında temas eden çıkıntılarda yüklenme sonucu oluşan gerilmenin akma dayanımı geçmesi sonucu malzemede plastik akış meydana gelir. Bu plastik akış, gerçek temas bölgelerinin sürtünme sırasında artmasına neden olup, kayma ve normal gerilmenin düşmesini sağlar. Plastik akış sonucu çıkıntı temas alanının artmasına "çıkıntı büyümesi" denilmektedir. Meydana gelen bu mekanizmalar sonucunda özellikle sürtünen yağsız yüzeylerde yüksek ısı meydana gelmektedir. Pürüzlülüklerin etkileşimleri ile ortaya çıkan ısı, malzemelerin farklı tepkiler vermesine neden olmaktadır. Sürtünmeden kaynaklanan ısınma sonrasında iki tepki görülebilir. Bunlardan bir tanesi malzemede meydana gelen faz değişimi, bir diğeri ise oksidasyon olayıdır [2].

2.1.1 Sürtünme ısınması

Sürtünen yüzeylerdeki toplam hacimdeki sıcaklık ile temas yüzeylerindeki sıcaklık arasında büyük farklar olabilmektedir. Temas eden bölgelerdeki yüksek ısınma termokapllar yardımı ile ölçülebilir. Ayrıca malzeme özelliklerine ve sürtünme durumlarına bağlı olarak formüller de geliştirilmiştir.

Yağsız ortamda oluşan sürtünme ısısı; sürtünme gücüne (P.μ), gerçek temas alanına, malzemenin özgül ısısına ve ısıl geçirgenlik katsayısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Sürtünmeden kaynaklanan ısıyı ölçmek için birçok yöntem denenmiştir. Mikro boyutta deformasyona uğrayan çıkıntılar için relatif hareket halindeki yüzeylerde bu enerji dağılımı meydana gelmektedir. Bu enerjinin çok az bir kısmı elastik deformasyona gitmektedir (1% den küçük) Deformasyon sonucu ortaya çıkan enerji;

$$Q = P_\mu = F_\mu \cdot v = F_N \cdot \mu \cdot v \quad \textbf{(2.4)}$$

formülü ile gösterilmiştir. Burada Q sürtünme enerjisini, μ sürtünme katsayısını, F_n yükü , v ise sürtünen cisimler arasındaki yüzey hızını gösterir [1,2].

Sürtünme sırasında malzemelerin hacim sıcaklığında yüzeyin 10-100μm altında tüm yüzeye eşit olarak dağılmış olan sıcaklık artışı oluşur. Bu sıcaklık uygulanan yük ve sürtünme hızı ile artar. Ayrıca sürtünme işi, lokal ve yüzey temas noktalarında ısınma meydana getirir. Bu ısınmaya "flaş sıcaklık" denilmektedir. Bu temas noktalarındaki sıcaklık, hız ve yük ile doğru orantılı olarak artmaktadır [6].

İlk sürtünme başladığı anda yüzeyden belirli bir derinlikte (μ.m) malzemenin toplam hacim yüzey sıcaklığı artar. Buradaki sıcaklık artışı üniform olarak dağılmıştır. Hacim sıcaklığının artmasının ardından devam eden sürtünmede, lokal ve flaş sıcaklıklar, sürtünen yüzeylerde artmaya başlar. Flaş sıcaklık artışı hacim sıcaklığından fazladır [6].

Değişik sürtünme modelleri geliştirilmiş ve farklı bir çok fikir ortaya çıkmıştır. Yapılan çoğu çalışma, sürtünme kuvvetinin ve sürtünme katsayısının matematiksel olarak ifade edilmesine yönelik olmasına karşın, bu özellikler malzeme kombinasyonlarıyla ve temas şartları ile ilgili olduğundan net bir teorem ortaya konulamamıştır.

2.2 Aşınma

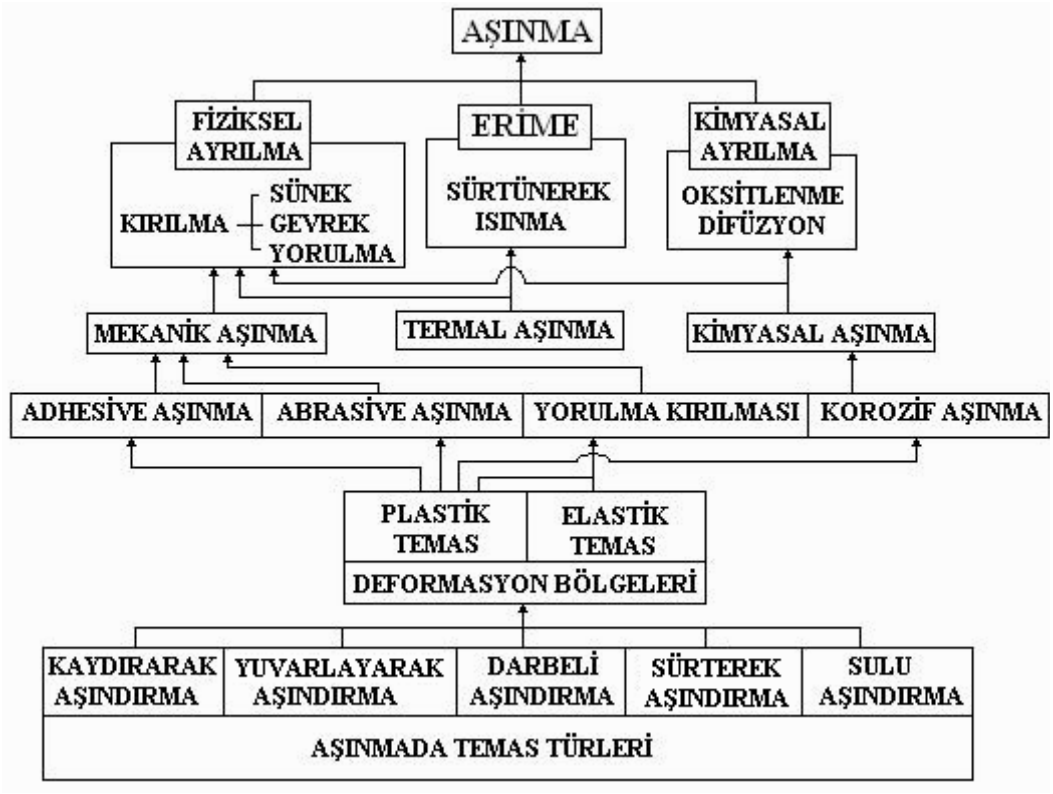
Aşınma, kullanılan malzemerin başka malzemelerle teması neticesinde mekanik etkilerle yüzeylerden küçük parçaların kopması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulmasıdır. Aşınma, iki yüzeyin kayma hareketi ve/veya yuvarlanma hareketi ile meydana gelir. Meydana gelen aşınma sebebi ile hemen hemen bütün makinelerin kullanım ömrü ve dayanabilirliği azalmaktadır.

Birbirleri ile temas halinde bulunan malzeme yüzeylerinde, oksit filmleri veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin doğrudan temasına sebebiyet verebilir. Bu temas, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrü ve performansını sınırlayan aşınma problemine sebep olur [1,5,6].

Genel olarak aşınma, yüzeyin durumu ve kaybolan malzemenin miktarı ile değerlendirilmektedir. Aşınma oranı, malzemenin hacim kaybının aşınma mesafesi ve yüke bölünmesi ile elde edilir. Aşınma katsayısı da, belirli aşınma oranı ve aşınan malzemenin sertliği ile tarif edilir [7].

Aşınma; çevresel etkilerin (sıcaklık, nem), dinamik parametrelerin ve malzeme özelliklerinin meydana getirdiği bir sürtünme sistemidir. Bu sistemin içersindeki küçük bir değişiklik bile büyük ölçüde farklar meydana getirir [7].

Aşınma, bir yüzey hasarı olduğu için görünen yüzeylerde gözle tespit edilebilen bir hasardır. Ancak bir çok kapalı makine sistemlerinde aşınan parçaların tespit edilmesi ve yerinde değiştirilebilmesi mümkün olmadığı için büyük problem teşkil edebilmektedir.



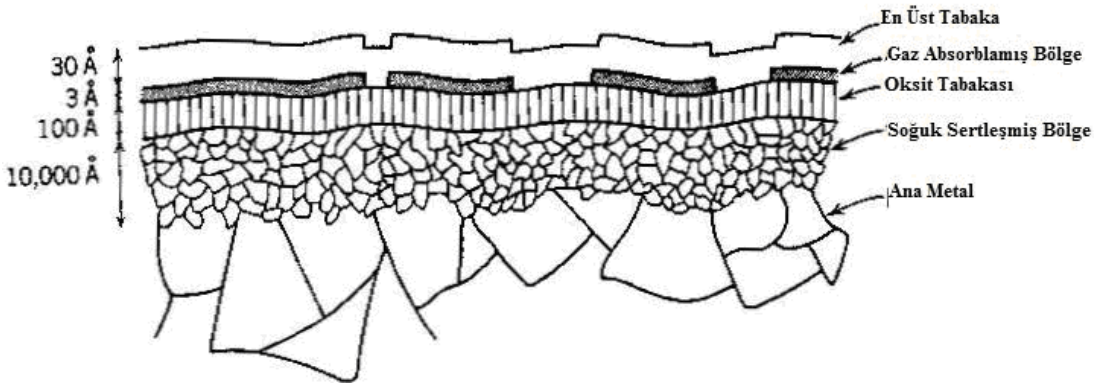
Şekil 2.2 : Aşınma mekanizmaları ve temas tiplerinin tanımlanmaları [7].

Aşınma olayı kademeleri şu şekilde meydana gelir; bölgesel erimeler, yüzey altı çatlakların oluşumu, kimyasal çözünme ve yüzeyden parça ayrılmasıdır. Bu kademeleri ve meydana gelen parça kopmasını; çevresel etkiler, malzeme geometrisi, malzemenin sertliği, yüzey enerjisi, ve diğer malzemenin özellikleri etkilemektedir.

Aşınma sistemlerinde ;

1- Ana malzeme (Aşınan)
2- Karşı malzeme (Aşındıran)
3- Ara malzeme
4- Yük
5- Hareket

aşınmanın meydana gelebilmesi için gerekli unsurlardır [9]. Aşınmanın şiddeti malzemelerin özelliklerine ve hareket hızı faktörüne doğrudan bağlı olmakla birlikte ortam koşulları, yağlama, geometri, gibi çeşitli unsurlara da bağlıdır.



Şekil 2.3 : Metal yüzeyi katmanları [10].

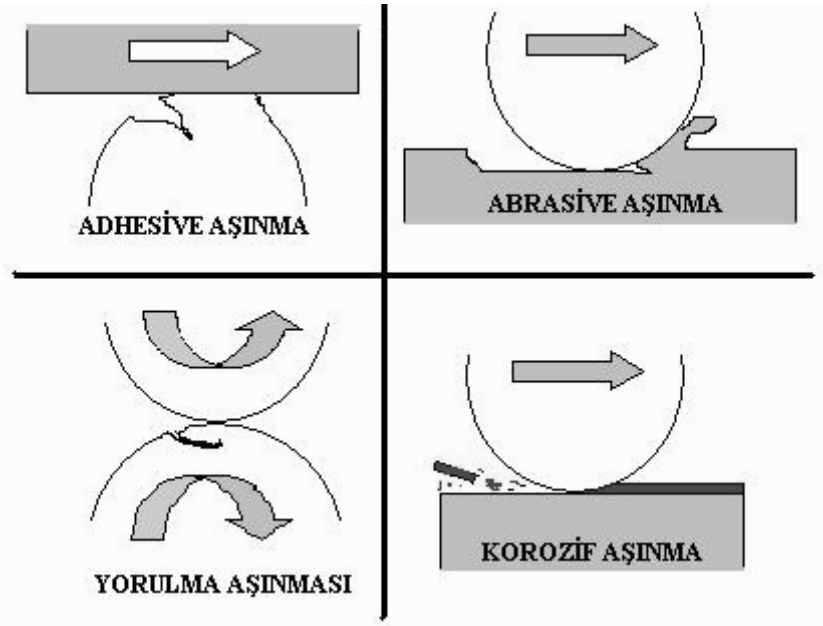
Ömrü bitince değiştirilebilen parçalarda aşınma kavramı fazla maliyet kaybına neden olmazken, büyük makine sistemlerinde ve uzun süreli dayanım ömrü istenen örneğin yatak malzemeleri, pistonlar, yüksek yüklenmeye maruz kalan kapalı bölgeler, vb. gibi hasarın tespit edilmesi zor olan bölgelerde fazla maliyet kayıplarına neden olur. Yüksek hızda çalışan parçalarda aşınma; yağlama, kaplama ve temas açısını azaltma yöntemleri ile giderilmeye çalışılmaktadır. Ancak zamanla yüzeyde oluşan parçacıklar, çatlaklar ve bu olaylara bağlı olarak gelişen kirlenme sonucu aşınmanın hızlanması, çalışan parçanın verimini etkilemekte ve yüksek maliyet kayıplarına neden olmaktadır.

Metalik malzemelerde sürtünme sonucu meydana gelen aşınma, şiddetli ve orta şiddetli olarak iki şekilde sınıflandırılmıştır. Şiddetli aşınma davranışı olarak tanımlanan aşınma; yüksek aşınma katsayısı, yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma sonucu kopan büyük metal partikülleri oluşturmaktadır. Orta şiddetli aşınma davranışında ise düşük aşınma katsayısı ve küçük boyutlu oksitlenmiş aşınma partikülleri görülür. Bu aşınma davranışı genellikle çelik, nikel ve bakır alaşımlarında karşımıza çıkar. Malzeme arayüzeyine uygulanan yüksek gerilmeler

σ_a ve düşük hızlarda v_a yüzeyden kopan oksitli partiküllerin görülme olasılığı fazladır [10].

Sürtünme sonucu meydana gelen aşınma ve ortaya çıkan aşınma zararlarını en aza indirebilmek için uygun yağlama, uygun malzeme seçimi, tasarım ve yüzey temizliği önemlidir. Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden parça kopması; kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yolu ile gerçekleşebilir [1,9].

Malzeme kaybına neden olan aşınma türleri dört ana sınıfa ayrılmıştır. Bunlar: yapışma, abrasif , korozyon aşınması, ve yüzey yorulmasıdır.

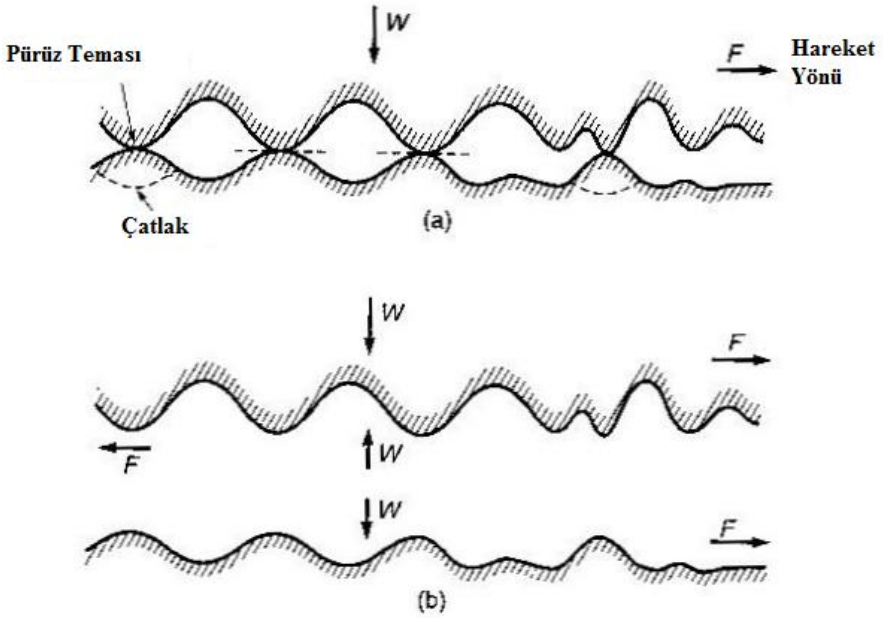


Şekil 2.4 : Dört Aşınma Tipinin Şematik Gösterimi [7].

2.2.1 Yapışma (Adhezif) aşınması

En sık rastlanılan bir aşınma türü olan adhezif aşınma, yapışma aşınması olarak da bilinmektedir. Genel olarak iki yüzeyin birbirlerine göre bağıl hareketleri sırasında birbirlerine kaynaklaşmış yüzey pürüzlerinin koparak diğer yüzeye taşınımı olarak tanımlanabilir [2].

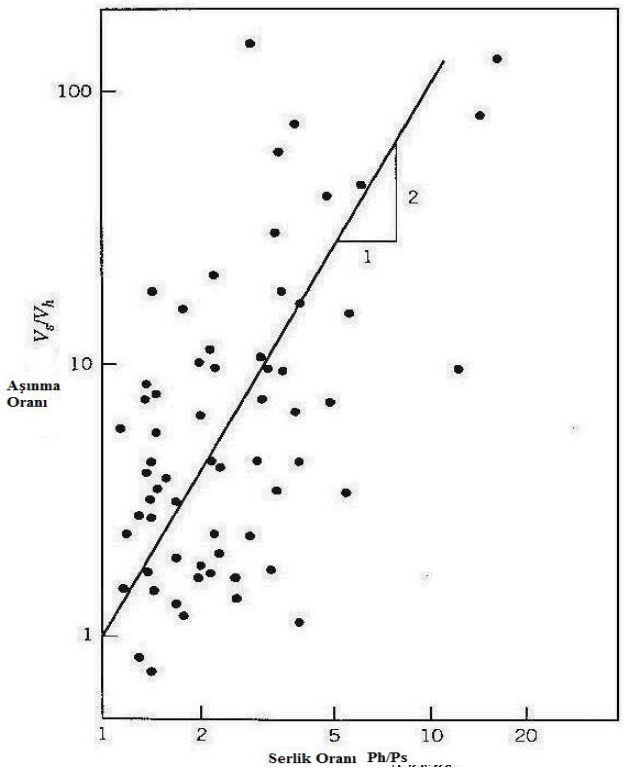
Bu aşınma türünde, gerçek temas bölgelerini oluşturan çıkıntılarda yerel akma dayanımının aşılması sonucunda deforasyonlar oluşur ve birbirlerine kaynarlar. Hareketin devamı sonrasında atom bağ yapısının en zayıf olan bölgeden kopması sonucu hasarlar meydana gelir [10].



Şekil 2.5 : Sürtünme sırasında temas eden pürüzlerin etkileşimleri [2].

Yapışma aşınma hasarının oluşumu şekil 2.5‘ de gösterilmiştir. İki ara yüzey belirli bir teğetsel yer değiştirmeye zorlanmaktadır. Yüzey pürüzlülüklerinin özellikle kayma yönüne dik veya dike yakın olduğu durumlarda transfer işlemi gerçekleşmektedir. Başlangıç yüzey pürüzlülük değerinin düşük olmasına rağmen bu değer sürtünme sonrası artabilir. Kayma sırasında meydana gelen etkileşimler ve soğuk kaynama, yüzeylerin kabalaşmasına neden olabilir ve katsayı artar[10].

Sürtünme sırasında sadece ara yüzeyde kırılmalar meydana gelmez. Bazı durumlarda malzeme kopması ve kırılmalar yumuşak malzemenin içinde de başlayabilmektedir. Bunun nedeni yumuşak malzemenin mekanik özelliklerinin sert malzemeye göre daha düşük olmasıdır. Sonuç olarak aşınan ortamda yumuşak malzeme parçaları oluşmakta ve bu parçalar soğuk kaynama sonrası sert malzemenin yüzeyine atomik olarak bağlanabilmektedir.Bazı durumlarda ise sert malzemedeki düşük mukavemetli yerel bölgelerin, yumuşak malzemedeki yüksek mukavemetli pürüzlülük bölgelerine rastlaması sonucu sert malzemeden de parça kopması görülebilir [10].



Şekil 2.6 : Sertlik ve aşınma oranlarının birbirlerine göre dağılım şeması [10].

Sertlik değerinin aşınmaya etkisi şekil 2.6‘ da gösterilmiştir. Burada sürtünen iki malzemenin sertlik değerleri p_h ve p_s olarak kabul edilirse ve bunların oranı R ise, bu iki malzemenin aşıma oranı R^2 olarak değişmektedir. Temas eden iki parçanın sertlikleri ne kadar arttırılırsa artırılsın sert malzemenin aşınma oranının sıfıra indirilemeyeceği görülmektedir [10].

Adhezif aşınma hasarları; malzeme çiftlerinin uygun seçilmemesi, yağlamanın yetersiz olması durumunda ve yüzey yapışma etkileşiminin fazla olduğu sistemlerde öne çıkan bir hasar türüdür.

Yapışma aşınma türü kuralları genel olarak şu şekilde gösterilmektedir:

1. Adhezif aşınma miktarı genellikle yüke (L) doğrudan bağımlıdır.
2. Aşınma oranı kayma mesafesi (x) doğrudan bağımlıdır.
3. Adhezif aşınma oranı daha yumuşak malzemenin sertlikleri (H) ile ters orantılıdır.

Bu kurallar çevresinde formülasyon şu şekilde gösterilebilinir:

$V_{adh} = c.L.x / H$ **(2.6)**

Wadh = Aşınma Hacmi

c = Aşınma Katsayısı

x = Kayma Mesafesi

L = Normal Yük

H = Yumuşak malzemenin sertliği

Tüm pürüzlülüklerin aynı boyutlarda ve n kadar olduğu varsayılırsa ve çaplarının d olduğu kabul edilirse; $\pi d^2/4$, ifadesinden;

$L = H . A$ **(2.7)**

$N = 4 A / \pi d^2$ **(2.8)**

$A = 4 L / \pi d^2 H$ **(2.9)**

formülasyonu çıkartılabilinir. Çapı (d) kadar temas eden açık alan temas bölgesinin, x kadar kayma mesafesinde, yük taşıma kapasitesi yeni oluşan pürüz tarafından karşılanan yüzey çıkıntılarının toplam sayısı,

$N = n.x / d = 4 L x / \pi d^3 H$ **(2.10)**

olduğu gösterilebilinir. Çıkıntının karşı tarafa geçmesi olasılığı k olarak kabul edilirse, ve bu pürüzün d çapında yarımküre olduğu varsayılırsa , x kadar kayma mesafesinde aşınma hacminin bağıntısı ;

$V_{adh} = k . N . \pi d^3 / 12 = k. L. x / 3. H$ **(2.11)**

olarak gösterilir. Bu bağıntı yapışma aşınmasının en önemli kuralı olarak düşünülür ve k 'nın aşınma katsayısı olduğu ifade edilmektedir. Bu formülasyondaki 3 sayısı pürüzlerin dairesel ve yarımküre geometrisinde düşünülmesi yani şekilsel değişiklik kabüllerinden kaynaklanmaktadır [10].

Yatak malzemelerde ve fren sistemlerinde aşınma hacmi yerine daha çok aşınma derinliği (h) ölçümlerinden faydalanılmaktadır. Formülasyonu düzenlersek;

$$h = - k.L.x / H.A_a \quad \textbf{(2.12)}$$

ve buradan açık alana uygulanan gerilimi σ_a (yük/temas alanı) şeklinde tanımlarsak,

$$h / x = k . \sigma_a / H \quad \textbf{(2.13)}$$

şeklinde düzenleyebiliriz.

Aşınma katsayısını her malzeme için kesin bir şekilde hesaplamak zordur. Çeşitli malzeme özelliklerine göre farklılık göstermekte hatta deneyi yapan kişiden bile etkilenebilmektedir.

Yapışma aşınmasının azaltılması k / H oranının küçültülmesine bağlıdır. Yüzey sertliğinin arttırılması ve ara yüzey enerji teriminin mümkün olduğu kadar küçük (W_{ab}) olması bu aşınma türünü azaltır. Ayrıca sürtünen metallerin kimyasal ve yapı benzerlikleri minimum şekilde seçilmelidir. Bu duruma en iyi örnek karşı malzeme çelik iken, demir yapısından demir karbür metaloid malzeme yapısına geçilmesi yağsız kullanılacak ortamlarda aşınma oranının 10 kat daha düşük olmasını sağlar. Sert fazların (özellikle karbürlerin) mevcudiyeti aşınma direnci üzerinde faydalı etkiler gösterir [2,10].

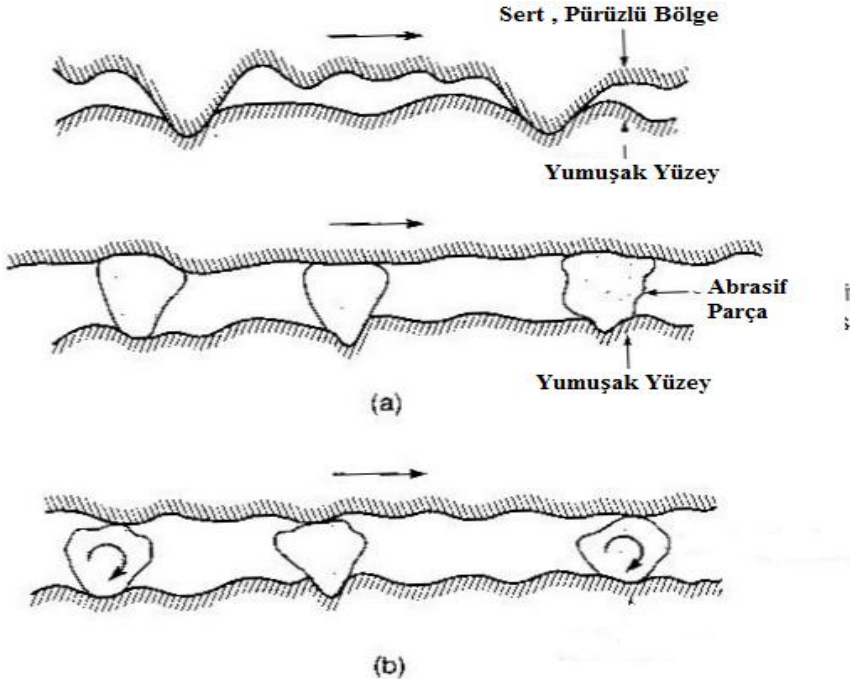
Yapışma aşınması genellikle temas alanında yetersiz yağlayıcı beslenmesinden kaynaklanır. Yağ filminin cinsi, viskozitesi ve miktarı aşınmayı kontrol altında tutmak için önemli unsurlardır. Benzer olmayan metal veya metalik olmayan kaplamaların kullanılması ile bu aşınma türü önlenebilir [1].

2.2.2 Abrazif aşınma

Abrazyon, birbirine sürtünen nesnelerden daha sert olanının yumuşak olan diğer malzeme yüzeyini kazıyarak parçalar koparması temeline dayanır. Sert ve kaba yüzeyin daha yumuşak yüzey ile olan teması sırasında pürüzlerin yumuşak yüzeyde oyuk açması ve parçalar kopartması şeklinde gelişir. Bu aşınma türü çizilme veya yırtılma aşınması olarak da bilinmektedir. Ortaya çıktığı durumlar iki şekilde olabilmektedir [5].

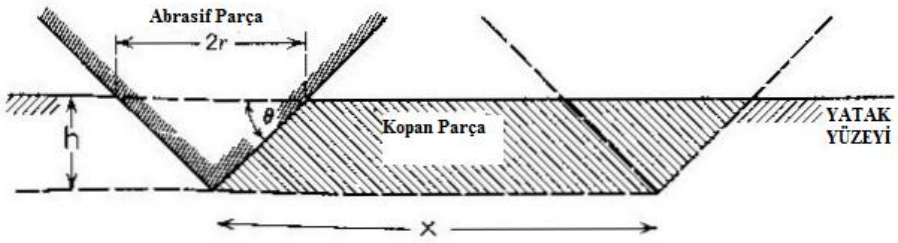
İlk duruma sürtünen elemanlar arasında herhangi bir aşındırıcı parça olmadan doğrudan etkileşim vardır. Kesme ve çizme sonucu malzeme kopması gerçekleşir. Buna iki elemanlı abrazyon denilmektedir [5].

İkinci durumda sert yüzey üçüncü bir cisimdir. Ana ve karşı malzeme arasına giren bir aşındırıcı parça (ara malzeme) her iki yüzeyi kayma veya dönme ile aşındırabilmektedir.



Şekil 2.7: Üç elemanlı abrazif aşınmanın oluşum şekli, (a) üçüncü elemanının yüzeyde kayması (b) üçüncü elemanın dönme yapması [9].

İki elemanlı abrazif aşınma türü, sürtünen elemanların doğrudan birbirleri ile etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları sonucu oluşabilir [9].



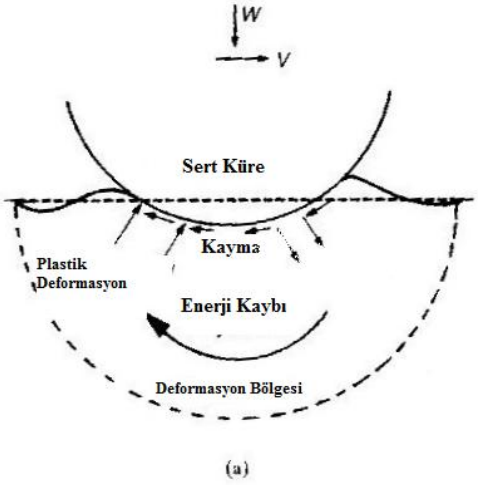
Şekil 2.8 : Abrazif sert pürüzün yumuşak malzeme yüzeyinde oyuk açması [10].

İki sistem arasında kayma hareketi başladığında abrazif aşınma partiküllerinin oksidasyonu, soğuk sertleşmeleri ve bunların aşınma sistemleri arasında birikmesi diğer aşınma mekanizmalarını da başlatabilmektedir.

Birim kayma mesafesi başına aşınma hacmi, aşağıdaki formül ile belirlenmektedir;

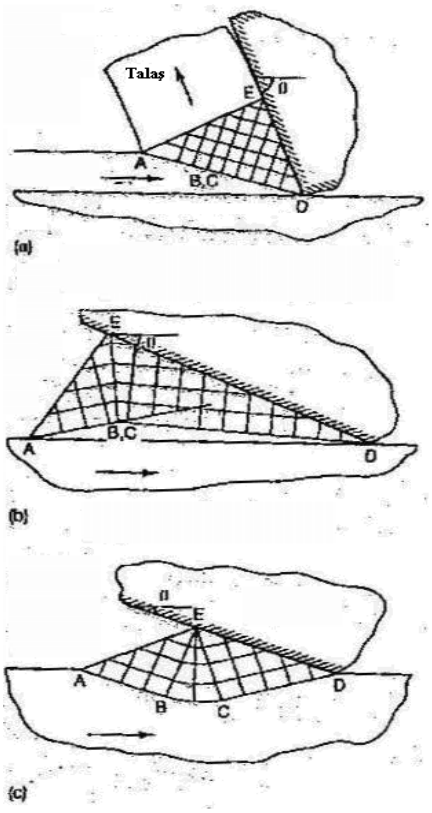
$$W_{ab} = V / L = (K . F_N . \tan \theta) / (\pi . H) \quad \textbf{(2.14)}$$

Bu ifade de birim kayma mesafesi başına aşınma hacmi, temas eden abrazif parçanın çıkıntı eğimi (tan θ) ve aşınmış malzemenin sertliği ile ilişkilendirilir. Genel olarak K' nın değeri iki elemanlı hava ortamındaki abrazif aşınmada, metal metal sürtünmesi sırasında ~$5x10^{-3}$ ile $50x10^{-3}$ arasında değişmektedir. Üç elemanlı aşınmada ise bu değer ~$0.5x10^{-3}$ ile $5x10^{-3}$ arasında değişmektedir. Aynı oranda iki elemanlı abrazif aşınma türünde sürtünme katsayısı 0.4 ile 1 arasında çıkarken, üç elemanlı aşınma türünde ise 0.2 ile 0.5 arasında bir sürtünme katsayısı vardır. "K" aşınma katsayısı $mm^3 (N.m)^{-1}$ olarak ifade edilmektedir [11].



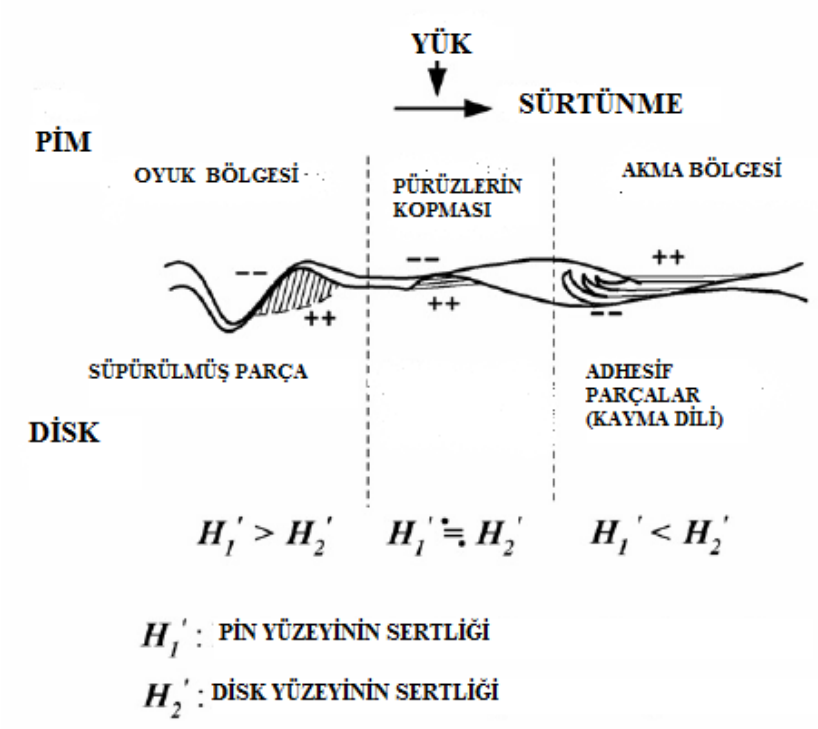
Şekil 2.9 : Sert kürenin yumuşak malzeme yüzeyinde kayarken oluşturduğu deformasyon bölgeleri.

Abrazif aşınma sırasında harcanan enerji ve yapılan iş, alt yüzeylerde meydana gelen plastik deformasyon işi ile açıklanır. Yüzeylerde meydana gelen deformasyon sertleşmesi sonucunda akma gerilimi, tüm hacmin akma geriliminden iki veya üç kat daha fazladır. Değeri abrazif aşınma sırasında metalin yüksek kayma gerilimlerine vereceği tepki ile ve yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışı tepkisi ile belirlenebilir [11].



Şekil 2.10 : Abrazif etki sonucu oluşan yüzey profilleri [11]

Şekil 2.10'da abrazif aşınma sırasında kayma çizgisi boyunca katı iki boyutlu köşeler ve üç değişik deformasyon çeşidi ile meydana gelen yüzey profilleri gösterilmiştir. "A" gösteriminde açının daha dik olması sonucu kesme modu ile meydana gelen aşınma partikülü oluşumu gösterilmiştir. "C" ise deforme olan malzeme sırtının, köşeden alınıp taşınması şeklinde meydana gelen bir sürme aşındırmasıdır. Bu aşınma türünde herhangi bir malzeme kopması meydana gelmez. "B" ise ara davranışı sergilemektedir. Sınırlı kayma, hatta parçanın ön yüzü ile aşınan parça arasında yapışma aşınması tarzında bir aşınma oluşmaktadır. Bunun sürekli tekrarlanması ve plastik deforme olan parçanın bu şekilde sürülmesi ile bir süre sonra kama düzeni şeklinde abrazif aşınma oluşur. Bir süre sonra yüzeyden parça kopması meydana gelir. Yüzeye batma açısı olan "ɵ" açısının düşük olması sürme aşınmasına, bu açının büyük olması ise kesme aşınmasına neden olur [11,12].



Şekil 2.11 : Şiddetli aşınma sırasında meydana gelen aşınma mekanizmaları mikro modeli.

Gevrek kırılma ile meydana gelen abrazif aşınmada, belirli bir yüklenmenin ardından hemen yüzeyde yüksek gerilme sonucu çatlak meydana gelmektedir. Çatlağın malzeme iç yüzeyine ilerlemesi ve burada devam etmesi, deforme olan malzemenin iç gerilmelerinin sonucu oluşmaktadır. Bu aşınma türünde ise malzemenin daha çok kırılma tokluğu ve sertliği önemli rol oynamaktadır.

Bu aşınma modeli için E / H oranı büyük önem arz etmektedir. Bu oranın düşük olması abrazif etkinin kesme modunda olmasını sağlayarak daha fazla aşınma partikülü oluşmasına neden olur [11,12].

Yapışma aşınması konusunda gösterildiği gibi abrazif aşınma oranını da aynı formülden yararlanarak bulabiliriz,

$$V = K_{abr} \cdot L \cdot x / H \qquad \textbf{(2.15)}$$

Burada K_{abr} abrazif aşınma katsayısını vermektedir. Bu katsayı pürüzlülük açısının tanjantının π `e bölünmesi ile elde edilir. Aşınma direnci ile sertlik arasında doğru bir orantı olduğu da bu formülden anlaşılmaktadır

Abrazif aşınma türünü yavaşlatmak ve azaltmak için malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılır. Böylece gerçek alan yüzey temas noktasının azaltılması sağlanır. Ayrıca yüzey kaplamaları ve yağlayıcılar da aşınmayı azaltmaktadırlar.

Bir malzemeye uygulanan soğuk sertleşme işleminin abrazif aşınma oranına herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Bunun nedeni aşınma sırasında yüzeyde daha şiddetli yüzey gerilmelerinin meydana gelmesidir [12].

Bu özellikler göz önüne alındığında; ısıl işlem ile sertleştirilmiş malzemelerin kullanılması, yüzeyi katı yağlayıcılar veya sert kaplamalar ile kaplama, sıvı yağlayıcıların kullanılması sistemlerin ömürlerini uzatmaktadır.

2.2.3 Yorulma aşınması

Malzemeler, etkisi altında bulundukları gerilmelerin periyodik olarak artıp azalması sonucu, olağan gerilme dirençlerinden daha az bir gerilme ortamında dahi zayıflayıp parçalanmaya başlayabilirler. Bu aşınma türüne yorulma aşınması denilmektedir [5].

Temas halindeki yüzeylerde plastik şekil değiştirme sonrası pekleşme meydana gelir. Malzeme gevrekleşir. Gevrekleşen malzeme tekrarlı gerilmeler etkisi ile çatlar. Çatlakların ilerlemesi ve kopmanın olması sonucunda parça hasara uğrar.

Pratikte tüm makinelar periyodik gerilme değişimlerine maruz kalırlar. Dönme ve kayma temasındaki tüm tekrarlanan gerilmeler (yüzeydeki teğetsel gerilmenin sıfır olduğu), yüzeyin hemen altında yırtılma gerilmesinin en yüksek olduğu noktalarda başlar. Bu noktalar malzemedeki mikroçatlaklar, inklüzyonlar, gözenekler ve diğer kusurlardan seçici olarak başlamaktadır. Çatlaklar, gerilmelerin devam etmesi durumunda yüzeye doğru ilerlerler ve malzemede büyük hasarlara yol açarlar [1,5].

Yorulma aşınması sonucu oluşan ve kopan aşınma partikülleri büyük yapılıdırlar. Bunların boyutları gerilime maruz kalan temas alanı kadardır [10].

Malzemenin yorulma aşınması ömrü yüke bağlıdır.

$$t = \text{sabit} / L^3 \qquad \textbf{(2.16)}$$

Bu formülde t ile gösterilen ifade zamana bağımlı hata oluşum süresi, L ise yüktür. Temas eden malzemenin temas alanının küresel olması sonucu meydana gelen elastik deformasyon ile oluşan yorulma aşınması ise ;

$$t = \text{sabit} / \sigma^{9}{}_{m} \qquad \textbf{(2.17)}$$

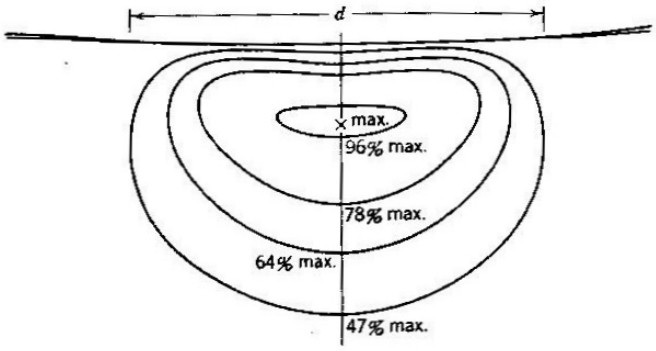
ile gösterilmetedir. Burada σ_m maksimum elastik gerilme olarak tanımlanır [10].

Yüzeye uygulanan gerilimler sonucu oluşan plastik deformasyon, yüzey altında yorulma salınımına neden olur. Bu salınımlar sonucu yüzey altında yorulma çatlakları meydana gelir ve bu çatlaklar ilerleyerek aşınma partikülleri meydana getirirler.

Genel yorulma ile yorulma aşınması birbirlerine benzerdirler. Hacim yorulma testleri sonucu belirlenen yorulma ömürleri, yüzey yorulma dayanımları ile bağlantılıdırlar. Her ikisinde de malzeme ömrü, basma gerilimi ile ters orantılı olarak değişmektedir. Aralarındaki kritik fark ise hacim yorulmasında bir malzemenin akma dayanımının yarısının altında olan basınçlarda yorulma ömrü sonsuz iken, yorulma aşınmasında böyle bir limit olmamasıdır. Ayrıca yüzey şartları ve ortam koşulları malzemelerin yorulma aşınma dayanımlarını etkilemektedir [7].

Delaminasyon yani tabakalar halinde dizilim aşınması; yüksek kayma yüklenmesi sonucu yorulma çatlaklarının yüzeyin hemen altında başlaması, bunların ilerlemesi ve ince düz tabaka şeklinde aşınma partikülleri oluşturmasına denilmektedir [13].

Yüzey yorulma aşınmasında çatlaklarının nereden başlayabileceğini tahmin etmek güçtür. Dönme teması sonucu yorulmaya uğrayan malzemelerde çatlaklar yüzeyde başlarken diğer temas şekillerinde yüzey altında başlayabilmektedir (şekil 2.12.). Alt yüzey çatlakları maksimum kayma gerilmesinin olduğu ve elastik deformasyona uğrayan bölgelerde oluşmaktadır.



Şekil 2.12 : Yorulma aşınmasında yüzey altında meydana gelen deformasyon bölgeleri.

Malzemelerin yüzey yorulma aşınması Barwell dört top test aleti ile yüksek hızlarda ölçülebilmektedir. Dayanım grafikleri "Weibull diyagramı" ile gösterilmektedir.

Malzemelerin yorulma aşınması, mikroçatlak oluşumunun yavaşlatılması veya önlenmesi ile en aza indirilebilir. Malzemenin sertliğinin arttırılması çatlak oluşum hızını azaltacağı için aşınma önlenmiş olur. Tokluğun arttırılması çatlak büyüme hızını azaltacağı için yorulma aşınması ile oluşan hasar yavaşlatılır.

2.2.4 Korozif aşınma

Metal veya alaşımların kararlı halleri olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde bulundukları ortamın elemanları ile tepkimeye girerek, önce iyonik hale ve oradanda ortamdaki başka elemetlerle birleşerek bileşik

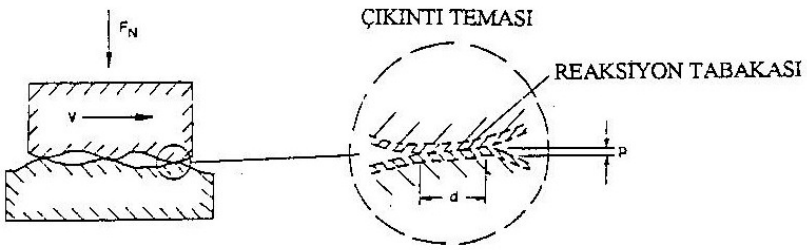
haline dönmeye çalışırlar; yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar. Korozyon, metalik malzemelerin içinde bulundukları ortamla reaksiyona girmeleri sonucu, dışarıdan enerji vermeye gerek olmadan, doğal olarak meydana gelen bir hasar türüdür. Korozif aşınma ise korozyona uğratan çevresel faktörlerle birlikte mekanik aşınmanın daha hızlı olarak gelişmesi şeklinde açıklanabilir [1].

Korozif aşınmanın ilk aşamasında korozif sıvı malzeme içerisine gözenek veya çatlaktan sızar. Bu andan itibaren malzeme kaybı artık kaymadan bağımsız olarak korozif aşınma karakteristiğine girmektedir. Bu aşamadan sonra, korozif etki ile oluşan filmin ya da yüzeydeki koruyucu filmin, sistemdeki sürtünme sonucu parçalanması ve çıplak yüzeyin tekrar korozif etkiye maruz kalması şeklinde süreç gelişebilir. Bir çok durumda yüzeyde oluşan bu korozif reaksiyon filmleri yüzeyden daha sert ve kırılgandırlar. Belirli bir kalınlığa ulaşabilirlerse bu filmler de katı yağlayıcı etkisi yapabilmektedirler. Bu durum özellikle yüksek sıcaklıklarda meydana gelen korozif ortam malzeme reaksiyonları ile oluşur. Bunun sonucu aşınma oranı düşer [10].

Genellikle korozif bir reaksiyonun hızı ortam sıcaklığınada bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda korozif rekasiyonlar sistemi daha hızlı zarara uğratmaktadırlar. Bunu gösteren en iyi örnek molibden ve bor karbürün 1000^0C 'nin üstünde oksitlenip (MoO_3, B_2O_3) daha uçucu bir hal almasıdır.

Korozif aşınmanın en çok görülen şekli kuru, yağsız ve hava şartlarındaki sürtünmelerde meydana gelen oksidasyon olayıdır. Yüzeylerde, ağır yüklenme veya yüksek hızlı sürtünme sonucunda okstilenme meydana gelmektedir. Çoğu oksitlenme olayı sürtünme katsayısını düşürdüğü gibi aşınma oranını da düşürmektedir. Endo ve Fukuda çalışmalarında, yüzeydeki çatlak uçlarının oksitlenmesinin yorulma çatlaklarının daha hızlı büyümesine neden olduğunu göstermişlerdir [13].

Korozif aşınmanın düşük sıcaklıklarda da etkili olduğu otomobil motorlarından verilen bir örnek ile daha iyi anlaşılabilir. Motorun soğuk iken ilk ateşleme sırasında, çeşitli yakıt reaksiyon ürünleri ile oluşan sülfirik asit, silindir duvarlarını oluşturan dökme demir ile reaksiyona girer ve bu bölgelerde korozif aşınma meydana gelir.



Şekil 2.13 : Korozif aşınma oluşumu [1].

Korozif etkinin azaltılması için, iyi bir yağlama yapılması önerilmektedir. Ancak bazı yağlarda bulunan klor, sülfür, fosfor içerikli katkılar korozif aşınmayı daha da arttırabilmektedir. Sıcaklığın kontrolü ve malzemelerin olumsuz tepki verdiği korozif sıvıları ortamdan uzaklaştırmak yapılabilecek en kalıcı çözüm yoludur.

2.2.5 Kazımalı aşınma

Kazımalı aşınma iki yüzey arasında küçük genlikli teğetsel titreşim hareketlerinin ortaya çıkarttığı bir aşınma türüdür. Kazımalı aşınma türü beklenmedik şekilde gelişen bir aşınma türü olarak karşımıza çıkar. Titreşim genliğinin çok küçük olması, yağın arayüzeyde işlevini tam olarak yerine getirememesine neden olur ve kopan aşınma parçacıklarının bu yağı götürmesi ile parçalar daha hızlı bir şekilde zarara uğrarlar [13].

Kazımalı aşınmayı engellemek için belirli bir yöntem yoktur. Değişen parametreler sistem için hem iyi hem de kötü sonuçlar doğurabilir. Yükün arttırılması ile sürtünme artacağından aşınma daha da artabilir. Titreşimin genliğini arttırarak arayüzeye yağ yenilenmesi sağlanabilirse kazımalı aşınma engellenir ancak bu işlemin gerçekleşmesi kayma hareketini arttırır [13].

Kazımalı aşınma türünü engellemek için arayüzeyde bir katı yağlayıcı tabaka kullanılır. Metallerin daha yumuşak seçilmesi dayanımı arttıran diğer bir yöntemdir.

2.2.6 Erozif aşınma

Bir yüzeye hızla püskürtülmüş katı partiküllerin, küçük sıvı damlalarının veya gazların çarptıkları yüzeylerde meydana getirdikleri aşınma olayıdır [9].

Katı partikül çarpışma aşınması; pervane kanatlarına, boru birleşme noktalarına ve dirseklere verdiği zararlar dolayısı ile, hava ve uzay endüstrisinde son yıllarda üzerinde çalışılan önemli bir aşınma türü haline gelmiştir.

Malzemelerin erozif aşınma ile zarara uğramaları, malzemenin türüne, yapısına, katı partikülün çapma hızına, açısına, boyutuna ve aşınma prosesi ile ilgili ortamsal parametrelere bağlı olarak büyük oranda değişiklik gösterir [10].

3. KOMPRESÖRLER

Kompresörler, düşük basınç ve sıcaklıktaki soğutucu akışkanı buharlaştırıcıdan emen ve sıkıştırarak yoğunlaştırıcıya basan cihazlardır. Kompresyon yani sıkıştırma kelimesinden gelen ve gazı sıkıştıran makine olarak adlandırılan kompresör, bir gazın basınca karşı akışını sağlayan makina olarak kullanılır ve mekanik kuvveti pnömatik akışkan kuvvetine dönüştürür [14].

Kompresörler sanayileşmiş ülkeler için önemli hale gelene kadar büyük aşamalardan geçmişlerdir. İlk kullanılan kompresörler tipik amonyak makinalarıydı ve yüksek basınçları karşılayabilmek için çok ağır imal edilirlerdi. Ayrıca bu kompresörler günümüzde kullanılan kompresörlere kıyasla çok yavaştılar. Kompresörlerin performanslarının artması ve kapladıkları alanların azalması ile birlikte tüm makina sistemlerinin verimleri de artmıştır [14].

Mil contaları, yataklar, valf tasarımları ve yağlama sistemlerindeki ilerlemeler tasarımın ilerlemesini ve kullanılan alanların genişlemesini sağlamıştır. Özellikle hızla gelişen ülkemizde olmassa olmazlardan biri olarak kendini kanıtlamış olan kompresörler; beyaz eşya endüstrisinde, otomotiv, cam şişe, pet şişe, plastik sanayisinde, ve daha birçok alanda kullanılmaktadırlar. Kompresör şirketleri daha hızlı çalışan ve belirli bir beygir gücü için kompresörlerin daha küçük olmasına olanak sağlayan modeller geliştirlmiş ve geliştirmektedir [14].

Yüksek oranda ticari soğutma ve iklimlendirme uygulamalarında kullanılan kompresörlerin gelişimi, ev tipi buzdolaplarında kullanılmaya başlamasından etkilenmiştir. Hermetik kompresörler ve kılcal borulu soğutucu besleme cihazları ilk defa ev tipi buzdolabı uygulamalarında kullanılmıştır. 1930'ların başlarında hermetik kompresörler ev tipi buzdolabı üreticileri için standart olmaya başlamıştır. Bir kaç yıl içinde kayış tahrikli kompresörler ev tipi buzdolabı sahasından hemen hemen yok olmuştur. Dondurma dolapları, içecek soğutucuları, su soğutucuları üreticileri hermetik kompresörleri ikinci benimseyenler olmuşlardır [14].

Soğutucu kompresörlerin sistemdeki görevi; ısı ile yüklü soğutucu akışkanı evaparatörden uzaklaştırmak ve böylece arkadan gelen ısı yüklenmemiş akışkana yer temin ederek akışın sürekliliğini sağlamaktır. Diğer görevi ise buhar halindeki

soğutucu akışkanın basıncını kondenserdeki yoğuşma sıcaklığının karşıtı olan seviyeye çıkartmaktır [15].

İdeal bir kompresörde aşağıdaki kontrol karakteristikleri aranır;

a) Sürekli bir kapasite kontrolü ve geniş bir yük değişimi-çalışma rejimine uyabilme,

b) İlk kalkışta dönme momentinin mümkün olduğunca az olması,

c) Verimlerin kısmi yüklerde de düşmemesi,

d) Değişik çalışma şartlarında emniyet ve güvenilirliği muhafaza etme,

e) Titreşim ve gürültü seviyelerinin kısmi ve tam yüklerde ve değişik şartlarda belirli seviyenin üstüne çıkmaması,

f) Ömrünün uzun olması,

g) Daha az güç harcayarak birim soğutma değerini sağlayabilmesi,

h) Maliyetinin mümkün olduğu kadar düşük olması,

i) Titreşim, aşınma, eskime, yağ ve soğutucu sızıntısı gibi problemlerin oluşmamasını, kapasite ve akım kontrolünü azaltıp çoğaltarak kontrol edilebilmesi, gravitenin çok az ve çok fazla olduğu ortamlarda geometrik her pozisyonda etkilenmeden çalışabilmeyi sağlamalıdır [15,16].

3.1 Kompresör Çeşitleri

3.1.1 Pozitif yer değiştirmeli kompresörler

Havayı hapsederek öteleyen ve gittikçe küçülen bir hacme (veya basınca karşı) sürerek basıncını arttıran kompresör çeşitleridir. Bunlar başlıca;

- Pistonlu kompresörler
- Helisel (Vidalı) kompresörler
- Paletli/Kanatlı kompresörlerdir.

Ayrıca düşük basınçta kullanılan, birbirine geçen iki rotorlu diğer tip kompresörler ve özel maksatlı diyafram kompresörler bu sınıfa dahildir.

Pozitif yer değiştirmeli sınıfına giren pistonlu tip kompresörler, bir silindir içersinde gidip gelme hareketi yapan bir pistonla sıkıştırma işlemini gerçekleştirirler. Bu tip kompresörlerde, tahrik motorunun dönme hareketi bir krank-biyel sistemi ile doğrusal harekete çevrilir. Maksimum kapasitesi, silindir yer değiştirme hızının ve hacminin bir fonksiyonudur. Tipik bir hermetik (kapalı tip) pistonlu kompresörler

için 1750-3500 dev/dk. hızda pompalanan gazın hacmi ve ağırlığı silindirlerin dakika başına strokuyla ilgili olan matematiksel bir denklem çıkartmaktadır [15].

Döner kompresör küçük kesirli beygir güçlerinde üretilir. Bu kompresör ticari soğutma sahasında benimsenmemiştir. Bunun nedeni özellikle düşük emme basınçlarında çalışırken, çok yüksek boşaltma basınçlarına karşı pompalamada verimsiz olmasıdır.

Vidalı kompresörler Amerika Birleşik Devletlere`nde 1950`den beri soğutma görevinde kullanılmaktadır. Orijinal tasarımı 1930`ların başında kuru tip olarak İsveç`te imal edilen bu tip kompresörler, daha sonraki yıllarda yağ püskürtmeli olarak üretilmeye başlanmıştır [16].

Vidalı tip kompresörlerde gaz, vida boşluklarını doldurmak üzere içeri çekilir. Rotorların dönmesi vida arası boşlukların karşılıklı olarak azalmasını ve gazın içeri doğru sıkıştırılmasını sağlar. Vidalar arası boşluk çıkış ağzıyla karşılaşınca gaz boşalır.

Vidalı kompresörler 7-10 bar basınç arasında çalışırlar. 1.5-2.5 m^3/dk ve 20 HP – 1500 HP arasındaki güçlerde pistonlu kompresörlerin yerine tercih edilir. 100 tondan 700 tona kadar çalışma aralığındaki vidalı makinelerin günümüz ölçüleri, soğuk su sistemleri için olan nominal ARI standartlarına göredir. Daha küçük güçlerde pistonlu ve paletli kompresörler daha ucuz ve kullanışlı olabilir. Küçük güçlerde vidalı kompresör pistonlu kompresörden daha pahalı olmasına rağmen, sessiz/gürültüsüz çalıştığı ve sabit debili hava bastığı için tercih edilebilir [14-16]. Bu tip kompresörlerde R-12, R-22, R-502 ve amonyak (yüksek yoğuşma basınçlı refrijeranlar) gibi soğutucular sıkça kullanılmakta iken yeni geliştirilen kompresörlerde doğal R600a, R600 gibi soğutucu gazlar kullanılmaya başlanmıştır.

Pozitif yer değiştirmeli kompresörler yağsız, sınır yağlı, yağ soğutmalı veya yağ yardımıyla sıkıştırmalı olabilir. Yağlı kompresörlerde yağın havadan ayrılması için yardımcı donanım kullanılır. Dinamik kompresörler hariç, yağlı kompresörler yağsız kompresörlerden daha uzun ömürlü, daha verimli ve daha ucuz olduklarından dolayı tercih edilirler.

3.1.2 Kinetik kompresörler

Santrifüj kompresörler, eksenel-radyal karışımı dinamik hava kompresörleri olup turbo kompresörler diye de adlandırılırlar. Havayı hızlandırarak, oluşturduğu basınç farkıyla emip çıkışa basan yağsız kompresörlerdir [14]. Pompalama kuvvetinin pervane hızına ve dönen pervane ile akan akışkanın (soğutucu) arasındaki açısal momente bağlı bir sistemdir. Fanları pervaneleri ve türbinleri kapsayan bir turbo makinalar ailesinin üyesidir [15].

Buhar sıkıştırma çevrimi ile soğutma işlemi yapan santrifuj kompresörlerin, pistonlu ve dönel paletli veya vida tipi kompresörlerden farkı, santrifuj kuvvetinden yararlanmasıdır. Genellikle -100^0 C ' e kadar olan soğutma işlemlerinde kullanılırlar.

Santrifüj kompresörler 80 tondan başlayıp 8000 tona kadar üretilmektedir. 7 bar, 20-30 m^3/dk veya 180-220 HP güçten itibaren vidalı kompresörlere karşı debi ve maliyet avantajı üstünlüğü sağlanır [14-16].

Yoğuşma basıncı düşük olan soğutucular santrifuj kompresörler için uygundur. Genellikle R-11 ve R-113 soğutucu akışkanlar bu kompresör tiplerinde kullanılmaktadır.

Dönen kanatların hız kazandırdığı hava, önde veya içeride vakum oluştururken, arkada veya dışarıda yığılma dolayısıyla basınç oluşturur. Önden emip arkaya basanlara eksenel kompresör, içten emip dışa basanlara radyal kompresör denir. Yüksek basınçlı (>0.5 bar) radyal veya radyal-eksenel karışımı kompresörlerin basınç oluşturan elemanına "Impeller" denir. Santrifüj-turbo kompresörlerin impellerleri, emişinin olduğu ön/orta taraftan emdiği havayı hızlandırıp, çıkışının olduğu dış/arka tarafa savurarak santrifüj kuvvetle sıkıştırır [15,16].

Santrifüj kompresörler tekstil, elektronik, gıda, ilaç, enerji santralleri vs. gibi bir çok endüstride kullanılmakta ve bunların hava ihtiyacını karşılamaktadır.

3.2 Pistonlu Kompresör Tipleri

Bir silindir içerisinde gidip gelme hareketi yapan bir pistonla sıkıştırma işlemini gerçekleştiren bu tip kompresörlerde, tahrik motorunun dönme kareketi bir krank biyel sistemi ile doğrusal harekete çevrilir.

Günümüzde kullanılan pistonlu kompresör tipleri tek etkili, yüksek devirli ve çok sayıda silindirli makineler olup, açık tip (kayış kasnak ve kavramalı) veya hermetik tip motor-kompresör şeklinde tasarlanmakta ve imal edilmektedirler [15].

3.2.1 Açık tip kompresörler

Açık tip kompresörler ilk kullanılan kompresörlerdendir. Günümüze kadar gelebilen kayış tahrikli yada doğrudan bağlantılı bir dış motor tarafından tahrik edilen kompresör çeşitleridir. Bu tip kompresörde kartere uzanan mil ve mil contası bulunmaktadır.

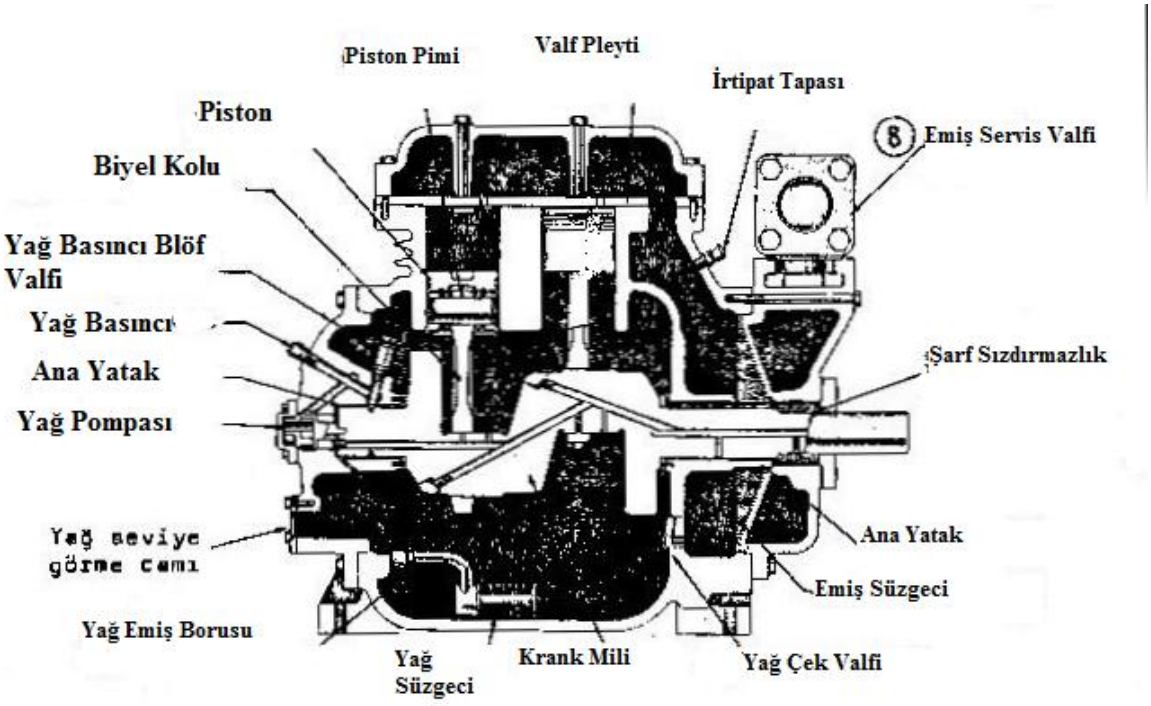
Bu kompresör çeşitlerinin kullanım alanları ve sağladıkları verim değişkendir. Bunun en güzel örneği motor kasnağının ve kompresör valfı boşluğunun sadece boyutlarının

değiştirilmesiyle; aynı kompresörün yüksek, orta ve düşük sıcaklık uygulamalarında da kullanılabilmesidir [15,16].

Herhangi bir arıza durumunda kayış tahrikli motorun dış tarafta olmasından dolayı açık tip kompresörlerin bakımı dışarıdan yapılabilir. Ancak kayışların zamanla aşınması ve mil sızdırmazlık elemanlarının yağlama ile tıkanması sonucu çok sık bakıma ihtiyaç duyar. Ayrıca çalışma esnasındaki ses rahatsız edici olabilmektedir. Bu kompresörün motoru, motor muhafazasının etrafındaki hava ile soğutulur. Motor, çevre sıcaklığının yüksek olduğu veya havalandırmanın yetersiz olduğu bir yerde ise ısıyı uygun şekilde dağıtmak sorun olabilir.

3.2.2 Hermetik kompresörler

Hermetik kompresörler kapalı tip sızdırmaz kompresörlerdir. Kompresör motorunun ve pistonların aynı muhafazada korunduğu bu tip kompresörler, ilk olarak 1935`te iklimlendirme uygulamalarında kullanılmıştır. O günden bu güne özellikle az yer kaplayan ve yüksek performans verimi elde edilen en önemli kompresör sınıfı olmuştur.



Şekil 3.1 : Kapalı tip kompresörün yandan kesit görünümü [15].

En az alan kaplayarak en verimli olan kompresör sınıfı genellikle her alanda tercih edilmektedir. Kapalı tip kompresörlerin bu özellikleri en büyük avantajıdır. Titreşimden etkilenmemesi, kayışsız çalışması, yağlı sürekli soğutmalı bir sisteme sahip olması hermetik kompresörlerin dayanım ömrünü arttıran etkenlerdir.

Soğutucu devrelerde kullanılan kompresörler basınçlı hava üretiminde kullanılan kompresörlerden farklıdır. Basınçlı hava üretiminde kullanılan emme basma subapları soğutma kompresörlerinden kaldırılmış ve yerine piston üzerine tek yönlü özel klapeler yerleştirilmiştir. Piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru hareket ederken soğutucu akışkan karterden silindire dolar ve alt ölü noktadan üst ölü noktaya hareket ederken de silindirin içerisine emme sürecinde dolmuş olan soğutucu akışkanın hacmi azalır basıncı artar. Oluşturulan basınç belirli bir değere ulaşınca basma klapesi kendiliğinden açılır ve piston, sıkıştırılmış olan akışkanı sabit basınçta yoğunlaştırıcıya basar [15,16].

Günümüz soğutma uygulamalarında kullanılan hermetik kompresörlerin boyutları 1.5ton'dan 5ton'a kadar çıkabilmektedir. Boyutlardaki azalmalara karşı performanslarının artması, seri üretim ve standartlaştırma, kompresör endüstrisine ileri bir kalite getirmiştir.

Hermetik tip kompresörlerin ana elemanları;

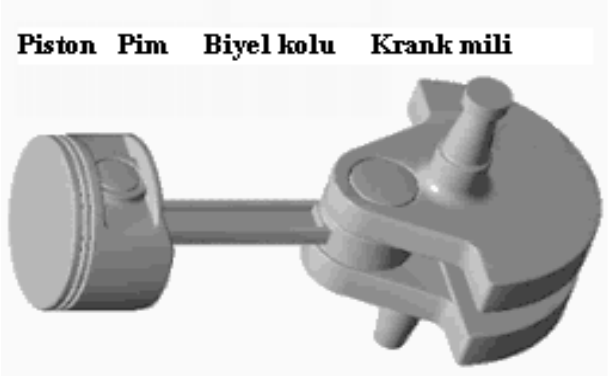
1) Silindir

2)Karter

3)Piston, piston kolu, krank mili, kasnak

4)Emme ve basma klapeleri

5)Kesici elemanlar (ventiller).

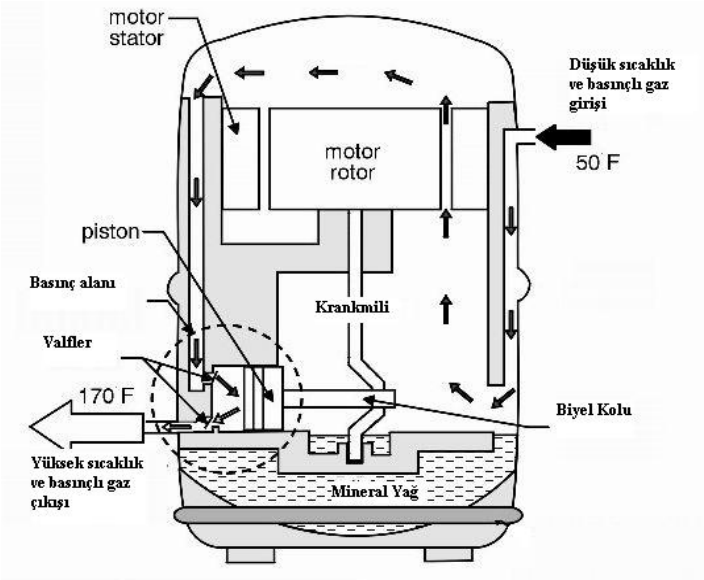


Şekil 3.2 : Piston, biyel kolu, krank mili, piston pim deliği bağlantısı.

Şekil 3.2 'de pistonu biyel koluna bağlayan piston pimi ve biyel kolunun hareketini sağlayan krank mili gösterilmiştir.

Emme ve basma hatları ile dolaşım hattı üzerinde ventiller vardır. Emme ve basma hatları üzerindeki ventillerin işlevi kompresörün buharlaştırıcı ve kondensör ile bağlantısını kesmektir. Dolaşım hatları üzerindekin işlevi ise emme ve basma hatları arasında bağlantıyı kurarak dolaşımı sağlamaktır. Emme hattı üzerine monte edilen

emme filtresinin işlevi buharlaştırıcıdan gelen soğutucu akışkanı, soğutma devresine zararlı olabilecek yabancı maddelerden arındırmaktır [15].



Şekil 3.3 : Hermetik tip kompresörün iç parçaları.

Klapeler pistonlu tip kompresörlerde piston üzerine yerleştirilirler. Bu klepeler piston emiş süresinde etkin yüzeye dağılmış menfezlerden silindir içerisine soğutucu akışkanın girmesini sağlarlar. Pul şeklinde olan klepeler, klape boşluğunda, uzunluk ekseni doğrultusunda rahatça hareket ederek emme menfezlerinin sıkıştırma sürecinde kapanmasını ve emme sürecinde açılmasını sağlarlar. Kompresörlerde, çıkış klepeleri çoğunlukla silindir kapağına yerleştirilir. Ayrıca klepenin hareketini sınırlayıcı birde mesnet bulunmaktadır [15,16].

Pistonlar soğutma işlemi için soğutma gazını, kondansör ve evaparatör kısımlarına basmak amacı ile kullanılan parçalardır. Sızdırmazlık ve ömrünün uzun olması amacıyla dökme demir yada aluminyum alaşımdan imal edilirler. Alüminyum alaşımdan imal edilen parçaların ısıl iletkenlik katsayısının yüksek olması ve sistemin hafifletilmesi dolayısı ile daha kullanışlı oldukları düşünülmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda korozif etkinin ve aşınma direncinin yüksek olması istenen bölgelerde çelik alaşımları tercih edilmektedir. Kompresör gövdesi genellikle sızdırmalara karşı dökme demir (nikel esaslı) yada alumünyum alaşımından imal edilir [15,16].

Piston silindir aralığı dökme demir pistonlarda silindir çapının %0.04'ü mertebesinde üretildiğinde, sızdırmazlık için segman ilavesine gerek vardır. Bundan dolayı

özellikle aluminyum alaşımlarda %0.2'sinden daha az piston silindir aralığı mümkün olmamakta ve genellikle segmanlı imal edilmektedirler [16].

Piston pimleri 100Cr6 çeliğinden imal edilir. 50-60 Rockwell derecesinde sertleştirildikten sonra 0.2 mikron toleransta taşlanır. Piston pimi, biyel başına veya piston deliklerine sıkı geçme ile birbirine serbest hareket etme serbestliğine sahip olacak tasarımda imal edilirler. Dövme çelik veya çelik dökümden yapılıp çok iyi ve dar tölaransta işlenmiş olması gerekir. Bu malzemenin yorulma aşınmasına da dayanıklı olması gerekir. Yüzey serliğinin ana yataklarda 350 Brinel olması istenir. Piston piminin yerinden kaymaması, piston deliklerinin dış tarafına maşa pimler konularak sağlanır [15,16].

Biyel kolu, dönel hareketin doğrusal harekete çevrilmesini sağlar (şekil 3.2.). Bu elemanlar bir baştan krank miline diğer baştan piston pimiyle pistona bağlıdır. Biyel malzemesi olarak dökme demir, çelik, aluminyum, bronz gibi malzemeler kullanılmaktadır. Biyel kolunun yüzeyine delikler ve yiv boşukları açılır böylece yağın dağıtılması sağlanır.

Hermetik kompresörlerde bazen krank-biyel mekanizması yerine "İskoç Hamudu" diye tanımlanan mekanizma kullanılır. Burada dönel hareketi doğrusal harekete çeviren, kaydırılmış eksenlerde dönel hareket yapan bir mil ile eksantrik eksenlerdeki kısmın içinde ileri geri hareket yaptığı bir yarıkla techiz edilmiş (biyel vazifesini gören) pistona bağlı ara parça mevcuttur. Bu parçalar dövme çelik veya aluminyum alaşımlarından yapılmaktadır [15].

Krank milini eksenel bölümlerinden destekleyerek taşıyan ana yataklar; yatay eksenli hermetik, yarı-hermetik kompresör tiplerinde aynı zamanda elektrik motorunun rotorunu da taşımaktadır. Genel uygulama şeklinde piston ve silindirler ana yataklar aslında kalacak şekilde tasarlanır. Ana yataklar kompresör gövdesinin içerisine yerleştirilir ve gövdenin ana kısmını oluşturur. Az da olsa eksenel yüklenmeleri karşılayacak şekilde tasarlanırlar. Rotor ve krank mili alttan eksenel yatak veya tek bir bilya ile taşınır. Ana yataklarda kaymalı tip yatak yerine, rulmanlı tip yataklar kullanılır. Özellikle bronz yatak zarfı kullanılmayan yerlerde tercih edilen bir yöntemdir [14-16].

Yatakların yukarıda bahsedildiği gibi dönel elemanları çok iyi ve hassas şekilde taşıması gerekmektetedir. Aksi halde yağ filmi çok incelir, sürtünme ve aşınma artar, ısınma problemi olur ve daha fazla enerji sarfolur. Yataklar; dış etkilerden fazla etkilenmeyen, uzun ömürlü ve bakıma ihtiyaç göstermeyen uygun bir tasarım ile üretilir. Dökme demir üzerine geçirilmiş sertleştirilmiş çelik zarf yataklar sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca sertliği 180-220 Brinel arasında olan ferritsiz-vasıflı gri pik döküm (gözeneksiz-perlitik döküm) yataklar da günümüzde kullanılmaktadır [15].

Silindir kapakları bir soğutma kompresörünün en yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerinden biridir. Emme ve basma klepeleriyle birlikte yapılır veya valf klepeleri ayrı bir pleyt üzerinde toplanarak silindir kapağı sadece soğutucu akışkanın emme ve basma yollarını oluşturur. Alüminyum gövdeli kompresörlerde ise aluminyum alaşımından üretilirler.

3.3 Kompresörlerde Kullanılan Soğutucu Akışkanlar

Soğutma sistemlerinde kullanılan hermetik kompresörlerin aşınma mekanizmalarına etki eden soğutucu gazlar, son yıllarda en çok üzerinde çalışılan konu olmuştur. İlk kullanılan soğutma gazları; yüksek basıncın, aşınmanın ve gücün karşılanabilmesi için kompresörlerin ağır makineler olarak dizayn edilmesine neden olmuştur. Günümüzde kullanılan soğutucu gazlar ise ile hermetik kompresörlerin boyutlarının daha küçük tasarlanmasına olanak sağlamıştır.

Soğutucuların en önemli görevi mekanik temas içerisinde olan yataklara, mekanik sızdırmazlık elemanlarına ve yüksek temas bölgelerine yağlayıcı etki yapmasıdır. Bu bölgelerde oluşan temaslar EHY (elastohidrodinamik yağlama) gerektiren bölgeler olup, yüzeyler birbirlerinden yağ film basıncı ile ayrılıp sadece elastik temas yaparlar.

Önceleri, soğutma tekniğinde soğutucu olarak amonyak (NH_3) ve karbondioksit (CO_2) kullanılırdı. Günümüzde bu soğutucu akışkalar yerine çevreye daha duyarlı, daha uzun ömürlü soğutucular kullanılmaya başlanmıştır.

Bu kullanılan soğutuculardа aranan nitelikler şu şekilde sıralanabilir [15,16];

1) Buharlaşma gizli ısısı yüksek olmalıdır,
2) Kritik sıcaklığı ve basıncı yükek olmalıdır,
3) Atmosferik basınçta kaynama sıcaklığı düşük olmalıdır,
4) Doygunluk basıncı regülatör ventilin basıncının altında olmalıdır,
5) Yanıcı yada patlayıcı olmamalıdır,
6) Zehirleyici olmamalıdır,
7) Ucuz ve kolay temin edilebilir olmalıdır,
8) Küçük kapasiteli bir kompresörün kullanımına elverişli olmalıdır,
9) Kapalı devredeki kaçakların kolayca saptanmasını sağlayabilmelidir.

Freon, yukarıdaki açıklanmış olan bu niteliklerin çoğuna sahip bir soğutucu akışkan olduğu için tercih edilmektedir. Freon; F.11, F.12, F.13, F.22 ve F.502 piyasadaki tanımları ile R11,R12,R13,R22, R502 isimlendirmelerini alır.

Kloroflorokarbon (CFC) soğutucuların yerine çevreye daha duyarlı gazların gelmesi kolay olmamıştır. Soğutma döngüsünün hızlı hareket etmesi ve sistem içersinde toplanmaması için yağ ve gazın birbirinin içersinde belirli oranlarda çözünebilmesi gerekmektedir.

1980 'lerin sonlarında ilk kez klor içermeyen R-134a gazı ortaya çıkmıştır. R-134a gazı yani HFC (hidroflorokarbon), R-12 gazı yerine kullanılmaya başlanmıştır. R-134a gazının mineral yağ ile çözünmemesi sonucu yeni yağların üretilmesi gerekmiştir. Geliştirilen yağlar ve "Kyoto protokolü" çerçevesinde CFC gazının kullanımı tamamıyla bitmiştir [17].

R-12 yani Freon-12' nin bileşimi karbon (C), klor (Cl) ve flor (F)' dan oluşur (CF_2Cl_2) . İklimlendirme uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir. Bileşimi CHF_2Cl olan diğer bir soğutucu akışkan da Freon-22'dir. Bu tip soğutma gazı küçük kompresör sınıflarında kullanırdı. Ayrıca derin dondurucu tesisatlarında çok düşük buharlaşma sıcaklığı elde etmek için kullanılırdı. Hermetik kompresör sınıflarında tercih edilen bu tip soğutucular, normal basınç ve sıcaklıkta gaz halinde bulunup özgül ağırlıkları havanınkinden büyüktür. R-12, yağ ile daha çabuk ve hızlı karışırken R-22 ise su ile yüksek oranda karışmaktadır. Freon gazı insanların sağlığını etkilemedği gibi demir çelik, pirinç, bakır, alüminyum, kalay ve kurşun gibi metalleri de olumsuz (korozif) etkilememektedir [15-17].

Çizelge 3.1 : Kompresörlerde kullanılan soğutucu gazların ozon tabakası ve küresel ısınma potansiyelleri [17].

Soğtucu Gaz	İçerik	Ozon T. Zararı	Küresel Isınma
R11	CFC	1	4000
R12	CFC	1	8500
R134a	HFC	0	1300
R717 (Amonyak)	HC	0	0
R600a (Isobutan)	HC	0	3
R290 (Propan)	HC	0	3
R600a/R290	HC	0	3

Günlük hayatımızda karşılaştığımız ve en önemli sorunumuz olan küresel ısınmanın etkilerini her şekilde görmekteyiz. Klima satışlarının üç kat artması, binlerce insanın su için dualar etmesi, cilt kanserlerinin artması aslında bu felaketin boyutunu gözler önüne seriyor. Ozon tabakasının zedelenmesi ve artık yenilenememesi dünyamızı ne kadar kirletiğimizi açıkca ortaya koymaktadır. Bunların nedeni nüfusun artması ile ihtiyaçlarımızın karşılanması amacı doğrultusunda sanayi ve endüstrinin artması, otomobillerin kullanımının artması olmaktadır. Küçük bir deodorantın bile

dünyamıza zarar verdiğinin farkında olamamamız çevre kirliliğini son durumuna getirmiştir.

Bu sorun beyaz eşya sektöründe de başka soğutuculara geçiş yapılmasının en önemli nedenidir. İçerisinde klor bulunan gazların stratosferde birikmesi ve ozon tabakasını reaksiyon ile oksijene dönüştürmesi yavaş ama ölümcül bir evre başlatan bir durumdur (çizelge 3.1). Günümüz şartlarında küresel ısınmanın da etkilerini düşünürsek bu tür gazların dünyamıza zarar vermemesi son derece önemlidir. Kloroflorokarbon (CFCs) hidrokloroflorokarbon ($HCFC_s$) gibi soğutucu gazlar, üreticiler için hem soğutma hem de havalandırma alanında yukarıdaki sayılan soğutucu gaz özelliklerine tam uyum sağlaması nedeni ile tercih ettiği ama dünyamıza verilen zararı tetikleyen soğutucu akışkanlar sınıfına girmektedirler.

Birleşmiş Milletler Dünya Çevre Programı çerçevesinde görüşmeler sonrası (Montreal ve Kyoto Protokolleri) ortaya çıkan bu zararlı etkinin giderilmesi amacıyla birçok üretici CFC_s ve $HCFC_s$ kimyasallarına alternatif soğutucu geliştirmeye çalışmaktadırlar. Son yıllarda termofiziksel özelliklerinden ve çevresel toksit olmayan özelliklerinden dolayı HFC-134a (R-134a, Freon134a, Genetron134a) kullanımına geçilmiştir [18]. Bu soğutucu akışkanların ozon tabakasına vermiş olduğu zarar, daha önce kullanılan gazlara nazaran daha az olmasına rağmen, küresel ısınma potansiyelinin yüksek olması bu gazların da kullanımının azaltılmasının gerektiğini göstermiştir.

Son yıllarda bu soğutucu gazların değiştirilebilmesi için bir çok çalışmalar yapılmaktadır. Enerji sarfı, kompresör yağlaması, fiyat, bulunabilirlik ve çevresel faktörler göz önüne alınarak yeni soğutucu sıvılar denenmektedir.

James ve Missenden [19] propan gazı üzerine çalışmışlardır. Soğutucu akışkanlarla yapılan bu çalışmada, CFC-12 soğutucu gazına alternatif olarak enerji sarfiyati, kompresor yağlama, fiyat, bulunabilirlik, ve çevresel etkiler göz önüne alınıp propan gazına geçişin daha uygun olduğu gösterilmiştir. Richardson ve Butterworth [20] ise bu gazların performanslarını incelemiş ve propan, isobutan karışımının CFC-12` e göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Jung [21] ise HCFC-22, HFC-134a, HCFC-142b, RE-170 , HC-290 propan and HC-660a karışımlarını karşılaştırmıştır. HFC-134a / RE-170 en iyi performans katsayısını vermiş ve CFC-12 ‘e göre verimi %2.3 daha arttırdığının termodinamik analizini göstermiştir.

Çizelge 3.2 : Soğutucu gazlar ve kimyasal formülleri [15].

Piyasa Tanımı	Kimyasal Adı	Kimyasal Formülü	Atmos. Kaynama Sıc. ^{0}C	Buhr. ısısı (x ^{0}C'da) Kcal/Kg	Sıvı'nın özgül ağırlığı Kg/dm^3
R-11	Trikloroflorometh an	CCl_3F	+23.8	43.4 (20^{0}C)	1.49 (20^{0}C)
R-12	Diklorodiflorometh an	CCl_2F_2	-29.8	36.2(0^{0}C)	1.33(20^{0}C)
R-13	Klorotriflorometh an	$CClF_3$	-81.5	30.0 (-40^{0}C)	0.90 (20^{0}C)
R-21	Diklorofloromethan	$CHCl_2F$	+8.8	55.4(20^{0}C)	1.38(20^{0}C)
R-22	Klorodiflorometh an	$CHClF_2$	-40.8	49.1(0^{0}C)	1.21(20^{0}C)
R-113	Triklorotrifloroeth an	CCl_2FCClF_2	+47.6	37.1(20^{0}C)	1.58(20^{0}C)
R-114	Diklorotetrafloroeth an	$CClF_2CClF_2$	+3.8	31.1(20^{0}C)	1.47(20^{0}C)
R-170	Ethan	CH_3CH_3	-88.8	97.5(-40^{0}C)	0.35(20^{0}C)
R-290	Propan	$CH_3CH_2CH_3$	-42.1	88.6(0^{0}C)	0.50(20^{0}C)
R-500	R-12 ile R-152a karışımı	%73.8 + 26.2	-33.5	43.5(0^{0}C)	1.17(20^{0}C)
R-502	R-22 ile R-115 karışımı	%48.8 + 51.2	-45.4	35.0(0^{0}C)	1.26(20^{0}C)
R-504	R-31 ile R-115 kaışımı	%48.2 + 51.8	-57.2	53.6(-40^{0}C)	1.09(-40^{0}C)
R-600	n-Buthan	$CH_3CH_2CH_2CH_3$	-0.5	87.8(20^{0}C)	0.58(20^{0}C)
R-600a	İsobüthan	$CH(CH_3)_3$	-11.7	79.2(20^{0}C)	0.56(20^{0}C)
R-717	Amonyak	NH_3	-33.3	301.7(0^{0}C)	0.61(20^{0}C)
R-744	Karbondioksit	CO_2	-78.5	76.6(-40^{0}C)	0.77(20^{0}C)
R-764	Sülfürdioksit	SO_2	-10	-	-
R- 1150	Etilen	$CH_2 = CH_2$	-104.0	84.8(-40^{0}C)	0.46(-40^{0}C)
R-704	Helyum	He	-269.0	4.9(-269^{0}C)	0.126 (-269 ^{0}C)
R-728	Nitrojen (Azot)	N_2	-196.0	41.1(-220^0)	0.72 (-220^{0}C)
R-732	Oksijen	O_2	-183.0		
R-740	Argon	A	-186.0	37.1 (-220^{0}C)	1.35 (-220^{0}C)

Günümüzde birçok ev tipi buzdolaplarında yeni kullanılmaya başlanılmış olan R600a (isobutan) gazının doğal olmasının yanında yanıcı özelliği de vardır. Bu gazın kullanıldığı kompresörlerde gaz miktarı, eski gazlara nazaran azaltılmıştır. Ayrıca bu gazın sıvı halde yağın yoğunluğundan daha düşük yoğunluğa sahip olması, karışma ve ayrışma gibi sorunlarla karşılaşma problemlerini de doğurmuştur. Bu problemlerden dolayı R600a gazı üzerinde bir çok çalışma gerçekleşmektedir.

Fukuta, Yanagisawa, Omura, Ogi' nin [22] R600a ile yaptıkları çalışmada, R600a ile kullanılan parafin ve naphthenik mineral yağların bu karışım oranlarına bakılmış ve karışımların ayrışımı incelenmiştir. Bu sonuçlara göre isobutan yağ karışımının çevreci olmayan gazlara nazaran ısı aktarımının daha yavaş olduğu belirtilmiştir. Wongwises, Kamboon, ve Orachon [23]' un soğutma sistemlerinde kullanılabilecek alternatif gaz karışımı denemek amaçlı yaptıkları çalışmada ise, polialkilen glikol yağı ile birlikte propan/ butan/ isobutan gazlarının karışımlarını hermetik kompresörlerde denemişlerdir. Evaporatör sıcaklığının; kompresör gücüne,

performans katsayısına, emme ve boşaltma basınçlarına etkisini karşılaştırmışlar ve sadece propanın bu testler için uygun olduğunu saptamışlardır. R-134a gazı yerine kullanılabilecek en iyi karışımın isobutan-butan ile birlikte düşük miktarta (%3) propan olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kompresör sisteminde herhangi bir enerji zararının ve verim kaybının oluşmadığı gösterilmiştir. Ancak yapılan testlerin kompresör sistemlerinin aşınma ömürlerine ne gibi bir zarar ya da yarar sağlayacağı konusunda herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Diğer bir önemli çalışma ise Solzak and Polycarpou‘ un [24] biyel kolu ve pim ile yaptıkları çalışmadır. Bu çalışmalar sonrası kullanılan yeni doğal soğutucu gazlar ile birlikte sınır yağlı çalışan parçaların üstüne ugun kaplamaların kaplanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmalar doğrultusunda, çevreye zararları daha az olan soğutucu gazlara geçilmiştir. Ancak metal yüzeylerinde yağlayıcı özelliği olan klor iyonlarının, metal ile yaptığı film tabakasının oluşmaması sonucu kompresörlerin aşınma davranışları değişmiştir. Kompresörlerdeki soğutucu gazların değişimi ile birlikte, yeni yağlar, katkılar ve kaplamalar geliştirilmeye başlanmıştır.

3.4 Yağlayıcılar

Kompresör sistemlerinde, aşınma hasarlarını minimuma indire bilmek için çeşitli yağlayıcılar kullanılmaktadır. Hidrodinamik ve karışık yağlama ile piston ve yataklar arasındaki aşınmalar azaltılmaktadır. Ayrıca yağların çalışma koşulları sonrası meydana gelen sıcaklığı taşıyıcı ve uzaklaştırıcı özelliği vardır. Düşük hızlarda çalışan kompresör sistemlerinde sıçratma yağlaması yeterli olmaktadır. Yüksek hızlarda çalışan makinelerde ise daha fazla yağlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda ana yataklardan krankmiline, biyel kolu ve oradan pistonlara, yağ hazneleri ve uygun tasarım ile yağın dağıtılması sağlanmalıdır [6, 25]. Yağlar sadece yüzeyler arasındaki teması azaltması için kullanılmaz. Oluşan ısının taşınması, dağıtılması, temas sonucu kopan parçaların ve kirlenmenin kompresörlerden taşınması işlevleri de büyük önem arzeder. Bazı uygulamalarda yağlar kompresörün yüksek ve alçak basınç tarafları arasındaki sızdırmazlık görevini de üstlemişlerdir. Kompresör yağının yüksek oksidasyon dayanımı, geniş kullanım sıcaklık aralığı, parlamazlık özelliği ve kompresörde kullanılan malzemeler ile uyumluluğu da büyük önem taşımaktadır [15,16].

Soğutma kompresöründe kullanılan yağların özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

1) Yağ, sıkıştırılan soğutucu akışkanın basınç tarafından emme tarafına sızmasını önlemelidir.
2) Soğutucu olarak yardımcı olmalıdır, yataklardaki ısıyı almalı ve karterde biriken ısının dış cidarlara ve dolayısı ile dış çevreye iletilmesini sağlamalıdır.
3) Kompresör içindeki hareket eden parçaların meydana getirdiği gürültüyü kısmende olsa yutmalıdır.
4) Hermetik ve yarı hermetik kompresörlerde, motor sargıları yağ ile temas edeceğinden, yağın elektrik geçirgenliği çok düşük seviyede olmalıdır.
5) Ne kadar önlem alınırsa alınsın bir miktyar yağ kondenser ve evaparatöre taşınır. Önemli olan, buralarda yağın toplanıp kalmaması ve tekrar kompresör karterine dönmesidir. Bunu sağlamak üzere, yağlama yağı düşük sıcaklık seviyelerinde de yeterince akıcı olmalıdır.
6) İyi bir ısı transferi sağlaması ve kompresöre çabuk dönebilmesi için yağın tüm çevrim boyunca soğutucu akışkan ile iyi karışır özelliğini muhafaza etmesi istenir.
7) Yağ içierisinde tortu, reçine, mumlaşan vaks gibi yabancı maddeler bulunmamalıdır. Bunlar, kapiller boru veya ekspansiyon valfi yuvasını tıkayıp soğutucu akışkan geçişini engeller, evaparatör iç yüzeyine sıvaşıp ısı transferi azalır.
8) Hermetik tip kompresörlerde yağlama yağı bir defa konulur ve kompresörün ömrü boyunca yenilenmeden dayanması istenir.
9) Yağın temasta bulunduğu metal yüzeyler, motor sargılarının emaye-izolesi ve sistemde bulunabilecek daha pek çok madde ile kimyasal reaksiyona girip bozulmaması yani kimyasal yönden kararlı olması gerekir [15].

Bütün bu özellikleri yerine getirebilecek ideal bir yağın mevcut olmadığı söylenebilir. Örneğin, viskozitesi yüksek bir yağ kompresörde gaz basıncını muhafaza yönünden iyi netice verirken, gerek sistemden kompresöre dönüş zorluğu gerekse evaporatör ısı transferi azaltıcı (iç yüzeye sıvışarak) yönlerden istenmeyen durumlar meydana getirir [15]. Bu tür bir yağın sürtünmeyi azaltıcı etkisi de daha azdır. Kimyasal yönden çok dengeli olan bir yağ çoğu zaman iyi yağlama özelliklerinden uzaktır. Ayrıca bu yağların metaller ile etkileşimleri de çok önemlidir. Yatağın çalışma sıcaklığını ve yatak içerisindeki yağlayıcının viskozitesini doğru tespit etmek için her bölgedeki yağlayıcı film kalınlığının belirlenmesi önemlidir [26].

Yağlayıcı ile yatak yüzeyinin mekanik ve kimyasal etkileşiminden dolayı çatlak ve kırılma hasarı meydana gelmektedir. Bu kırılma hasarı yüzeyden başlamaktadır. Örneğin, yağlayıcıdaki oksidatif bozulma asit reaksiyonunun oluşmasına sebep olmakta, bu durumda malzemenin yorulma ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Böyle etkiler uygun oksidatif inhibitör kullanılarak önlenmeye çalışılmaktadır.

POE (polyol-ester) yağlar, kullanılan mineral yağların yerine geçebilecek en büyük aday olarak gözükmektedir. Yeni soğutucularla yapabildiği yüksek çözünebilirlik, motorun yağ ile temasını engelleyip iyi elektriksel izolasyon sağlaması bu yağları ön plana çıkartmıştır. Düşük sıcaklıklarda çözünebilmesi ise en önemli problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Wu, Liu, Tsui' nin [27] yaptıkları çalışmada; parafin yağ, motor yağı (SAE30 LB51153, SAE30 LB51163-11) ve poliester yağların, R-134a, R600a gibi soğutucu akışkanlarla etkileşimi incelenmiştir. Ayrıca piston pimi ve biyel kolu arasındaki etkileşimler de incelenmiştir. Yağlarla birlikte kullanılan CuO, TiO_2 yağ eklentilerinin metal-metal yağlamada daha iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır. Başka bir çalışmada ise parafin yağlarlar ile birlikte kullanılan sülfür olefin karışımının, sınır yağlaması yapmasına rağmen yüzeydeki metal ile oluşturduğu reaksiyonlar sonucu aşınmanın çok düşük değerlerde çıktığı kanıtlanmıştır [28].

Yağ viskozite (cST) değerleri kompresör sınıfına göre belirlenmektedir. Viskozitenin centistoke değeri; piston yağlama, ara noktalara sıçrama ve yağlama rejimini değiştirdiği için önemlidir. Yüksek viskozite değerlerinde yağın sistemde gezinmesi zorlaşmaktadır. Düşük viskozite değerlerinde ise sadece sınır yağlaması meydana gelmektedir. Çalışmalar sonucu hermetik kompresörler için en uygun viskozite değerinin ~16 mm^2/s (POE ISO VG22 @40^0C^a) olması gerektiği belirlenmiştir [29].

Çalışmalardan anlaşılacağı üzere yağlardan beklenen en önemli özellik, iki yüzey arasında belirli kalınlıkta bir film oluşturarak arayüzey yağlamasını gerçekleştirmeleridir. Ayrıca, yağın soğutucu akışkanın içerisinde çözünebilmesi özelliği önemlidir. Yağ ile birlikte kullanılan soğutucu gaz, %75 ağırlıkça yağ içermediği sürece yağlama özelliğini tam olarak yerine getiremez [30].

Günümüzde özellikle çevre dostu sentetik ester ve glikol kullanımı tercih edilmektedir. Bitkisel yağlar ise; hidrolik yağlama, kompresör yağları ve metal işleme sahasında tercih edilen yağlardır [30].

Sentetik yağlar bir çok ağır makina şartlarında en çok tercih edilen yağlardır. Mineral yağların dayanımının yetersiz olduğu çok yüksek sıcaklık ve çok düşük sıcaklıklarda, alev alma riskinin düşük olduğu bölgelerde, yüksek basınç, vakum ve nemin olduğu bölgelerde sentetik yağlar tercih edilmektedir. Maksimum 430^0C'e kadar

kullanılabilen sentetik yağlar mineral yağlardan pahalıdırlar [2]. Sentetik yağlar sınıfı içersindeki organik ester yüksek sıcaklık aralığında kullanılabilen bir yağdır. Özellikle gaz türbin motorlarında kullanılır. Poliglikol sentetik yağ ise en kararlı sınır yağlamasının gerekli olduğu alanlarda kullanılır. Yüksek sıcaklarda ayrışırken herhangi bir kalıntı katı partikül bırakmayan silikonlar ise kimyasal olarak dayanıklı, çok yüksek ve çok düşük sıcaklarda kullanılan ve elektriksel izolesi iyi olan sentetik yağlardır [11].

Mineral yağların viskoziteleri katkı bileşimlerine bağlıdır. Yüksek molekül ağırlıklı mineral bir yağ yüksek viskozite değerine sahiptir. Bu eklentiler yağın kalitesini arttırır ve ömrünün uzamasını sağlar. Oksidasyon inhibitörleri (antioksidantlar), temizleyici ve seyreltici yağ katkı maddeleri mineral yağların kullanım alanlarını genişletmektedir.

Yağlama yağları analizinde aranan diğer özellikler; özgül ağırlık, moleküler ağırlık, akma sıcaklığı, alev alma sıcaklığı, anilin noktası ve yağın soğutucu akışkanla karışmasıdır [15].

Çalışmalarımız sonucu soğutma tesisatlarında kullanılan kompresör mineral yağlarını dört ana grupta toplayabiliriz:

1) Naftenik asıllı yağlar (doymuş – sature hidrokarbonlar)
2) Parafinik asıllı yağlar (doymuş hidrokarbonlardır)
3) Aromatikler
4) Hidrokarbon asıllı olmayan yağlar (polar aromatikler veya resin'ler)

Mineral yağlar; R-13, R-22, R-502 soğutucu akışkanları ile zor karışır ve bu hem kompresöre yağın dönüşümünü güçleştirir hem de evaparatörde ısı tranferini azaltır. Bu gibi problemlerden dolayı sentetik yağların kullanılması artmıştır. En çok kullanılanlar alkali-benzenler'dir. Bu yağlama yağlarının halokarbon türü soğutucu akışkanlarda iyi çözünebilmesinin yanında yüksek sıcaklıklara ve oksidasyona karşı iyi dayanıklılık göstermektedir. Sentetik yağlardan bazıları; sentetik parafinler, poliglikoller, iki bağlı asit esterleri, neopentil esterleri, silikonlar, silikat esterleri ve florin bileşikleridir [15].

3.4.1 Katı yağlayıcılar

Yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve çevresel şartların getirdiği bazı sorunlar, organik esaslı yağlayıcıların kullanımına izin vermeyerek, katı yağlayıcıların kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Katı yağlayıcılar, dışardan herhangi bir şekilde sıvı yağlama kaynağı kullanılmadan, kendi bünyesindeki yağlama özelliği sayesinde yağlayıcı vazifesi gören kaplamalardır [31].

Çizelge 3.3 : Tribolojik uygulamalarda sıvı yağlayıcılar ile katı yağlayıcıların karşılaştırılması [32].

Uygulama Ortamı ve/veya Şartı	Katı Yağlayıcılar	Sıvı ve Gres Yağlayıcılar
Vakum	Bazı katılar , yüksek vakumda çok iyi yağlama, çok düşük buhar basıncı	Perfloropolialkalieterler (PFPE) ve Polialfaolefinler (PAO) vakuma en iyi dayanıklı olanlardır
Basınç	Çok yüksek basınçlara dayanabilir	İçerisine ilave yapılmadan yüksek basınçlara dayanamaz
Sıcaklık	Çok düşük ve yüksek sıcaklıklada işlevini sürdürebilir	Düşük sıcaklıklarda katılaşabilir, yüksek sıcaklıklarda çözünebilir ya da oksidasyona uğrayabilir
Elektriksel iletkenlik	Bazılar mükemmel elektriksel iletkenlik sağlar	Çoğu yalıtkandır
Radyasyon	Nükleer radyasyona son derece duyarsız	Zamanla radyasyonla çözünebilir ya da bozulabilir
Aşınma	Yüksek hızda sürtünme şartlarında mükemmel aşınma direnci	Yüksek hız ve sürtünme şartlarında iyi aşınma direnci
Sürtünme	Son derece düşük sürtünme değerlerine ulaşmak mümkündür	Viskoziteye, sınır filmine ve sıcaklığa bağlı
Isıl iletkenlik ve ısıyı dağıtma gücü	Metalik olanlarında mükemmel, tabakalı olanlarda zayıf	Çok iyi
Muhafazası	Çok uzun sürelerde saklanabilir	Depolama sırasında buharlaşabilir, akabilir, dökülebilir
Temizlik	Çok az yada hemen hemen hiç zararlı madde ifşası söz konusu olmadığından daha iyi, katı halde olduğu çin dökülme tehlikesi yok	Bir çok zararlı madde yayımı söz konusu, dökülme, damlama ve yanma tehlikesi var
Sulu ya da kimyasal ortamlara karşı direnç	Sulu ortamlarda, kimyasal çözeltilere, yakıtlara, bazı asti ve bazlara karşı oldukça dayanıklı	Asidik ve diğer sulu ortamlarla etkileniyor yada özelliklerini değiştiriyor

Katı yağlayıcılar, çok yüksek basınç ve/veya yüksek sıcaklıklarda sürtünme ve aşınmaya karşı su, yağ ve greslerle karıştırılıp beraberde kullanılabilir [33].

En çok kullanılan inorganik katı yağlayıcı maddeler ise, molibden sülfür, grafit, hegzagonal bornitrit ve borik asittir. Bu katı yağlayıcıların çoğu, lamelli ya da tabakalı bir kristal yapıya sahiptir. Yumuşak metaller, politetrafloraetilen, polimit, bazı oksitler, nadir toprak floritler, elmas benzeri karbonlar (DLC) ve fulerenler (karbonun grafit ve elmas haricindeki allotroplarına verilen isim, C60) gibi diğer katı yağlayıcı maddeler ise, tabakalı bir yapıya sahip olmamalarına rağmen çok iyi yağlama özelliği gösterirler. Aslında elmas benzeri karbon filmler, amorf olmalarına rağmen, katı malzemeler içerisinde en düşük sürtünme katsayısı gösteren yapılardır [31].

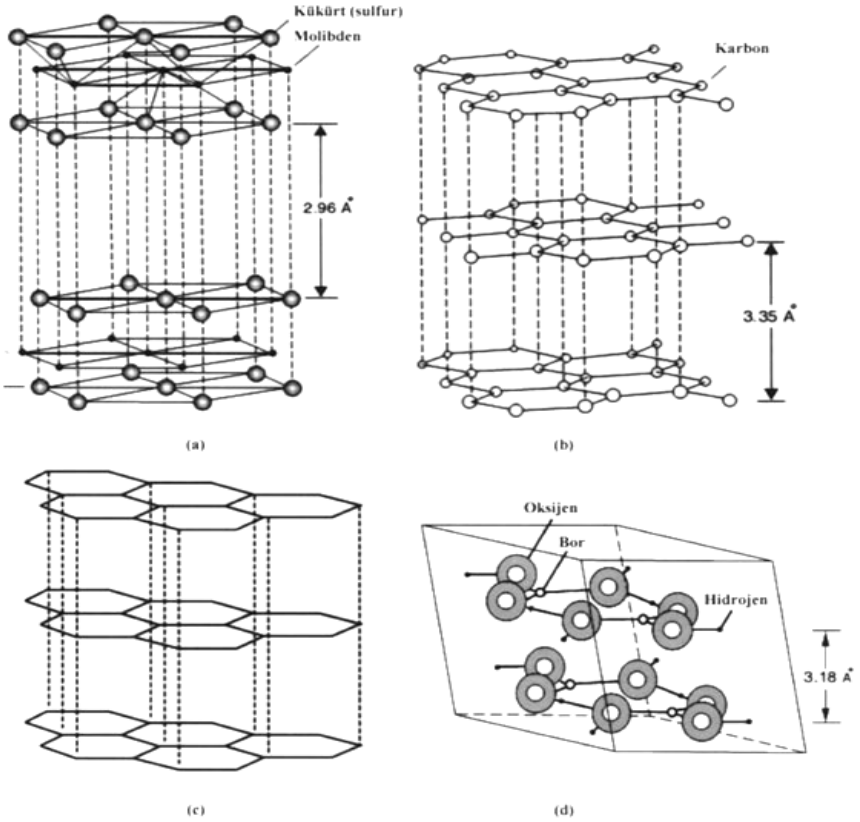
Molibden sülfür en çok bilinen hezagonal kristal yapısına sahip lamelli katı yağlıyıcıdır. Oksijen, karbon ve su buharı olmayan ortamda lamellerin birbiri üzerinde kayması daha kolay olduğu için en iyi özelliği vakum ortamında gösterirler.

Hegzagonal bir yapıya sahip olan MoS_2 genellikle uzay taşıtlarında, uydularda, serbest mekanizmalarda, hassas yatak uygulamalarında, hava sensör yataklarında katı yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Son derece anizotropik kristal tabakalı bir yapıya sahip olan MoS_2, üçgen bir prizmanın köşelerine yerleşen 6 sülfür atomu ile çevrili olan her bir molibden atomundan oluşur. Bu yapı hegzagonal bir düzen oluşturmuş lameler düzlemler meydana getirir. Sandaviç yapı olarak adlandırılan MoS_2 içerisinde güçlü bir bağ, sandaviçler arasında ise zayıf Van der Waals bağları mevcuttur. MoS_2 tabakaları arasında bu zayıf bağ yapısı kayma doğrultusunda düşük sürtünmeye neden olmaktadır. Bu durum çok kristalli yapılarda, iyi yağlama için temel kristal düzlemlerinin (basal planes) kayma yönüne paralel yönlenmesi gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. Lamelli yapının birbiri üzerinde kayması, ara yüzeye uygulanan kayma gerilmesini azaltarak kaplamanın uzun süre dayanımını sağlar. İdeal sürtünme özellikleri için MoS_2 temel düzlemlerinin (002) yönünde (type2), taban malzemeye paralel olarak yönlenmesi gerekmektedir. Sürtünme yönüne göre anizotropi gösteren MoS_2 ‘nun katı yağlayıcılık özelliği ile ilgili, iki parametrenin oldukça önemli olduğu düşünülmektedir. Bunlar; filmin taban malzemeye yapışması ve filmde kaplama sonrası meydana gelen kristallografik yönlenmedir.

Çizelge 3.4 : Kendiliğinden yağlama özelliğine sahip katı malzemeler [31].

Sınıfı	Anahtar kelimeler	Sürtünme katsayısı
Lamelli katılar	MoS_2	0.002 – 0.250
	WS_2	0.01 – 0.2
	Grafit	0.07 – 0.5
	Grafit florit	0.05 – 0.15
	H_3BO_3	0.02 – 0.2
	GaSe, GaS, SnSe	0.15 – 0.25
Yumuşak metaller	Ag	0.2 – 0.35
	Pb	0.15 – 0.2
	Au	0.2 – 0.3
	In	0.15 – 0.25
	Sn	0.2
Karışık oksitler	$CuO – MoO_3$	0.2 – 0.35
	$PbO-B_2O_3$	0.1 – 0.2
	$CoO-MoO_3$	0.2 –0.47
	Cs_2O-MoO_3	0.18
	$NiO-MoO_3$	0.2 – 0.3
	Cs_2O-SiO_2	0.1
Tek oksitler	B_2O_3	0.15 – 0.6
	MoO_3	0.2
	TiO_2	0.1
	ZnO	0.1 – 0.6
Alkali toprak metallerin tuzları ve sülfatları	CaF_2, BaF_2, $CaSO_4$, $BaSO_4$, $SrSO_4$	0.2 – 0.4 0.15 – 0.2
Karbon esaslı katılar	Elmas	0.02 – 1
	Elmas benzeri karbon	0.003 - 0.5
	Camcı karbon	0.15
	Fulerenler	0.15
	Karbon-karbon ve karbon-grafit esaslı kompozitler	0.05 – 0.3
Organik malzemeler/polimerler	Çinko sterit	0.1 – 0.2
	Mumlar	0.2 – 0.4
	Sabunlar	0.15 – 0.25
	PTFE	0.04 – 0.15
Kitle (bulk) ya da kalın film (>50μm) kompozitler	Grafit, WS_2 , MoS_2 , Ag, CaF_2 vs. içeren metal, polimet ve seramik kompozitler	0.05 – 0.4
İnce film (<50 μm) kompozitler	PTFE, grafit, elmas, B_4C , ve yağlayıcı parçacıkları içeren elektrokaplanmış Ni ve Cr filmler MoS_2 , Ti ve DLC (elmas benzeri karbon) içeren nanokompozit ya da çok tabakalı kaplamalar	0.1 – 0.5 0.05 – 0.15

Çizelge 3.4' de görüldüğü gibi MoS_2 gibi tabakalı bir kristal yapıya sahip olan katı yağlayıcılar; grafit, hegzagonal bornitrit, borik asit ve geçiş-metal dikalgojenitleridir (MX2). Şekil 3.4'de bu tabakalı kristal yapıdaki katı yağlayıcılar gösterilmiştir. GaSe ve GaS gibi bazı monokalgojenitler ise dikalgojenitlere benzer tabakalı yapı gösterir ve kayan bir ara yüzeyde düşük sürtünme sağlayabilirler [31].



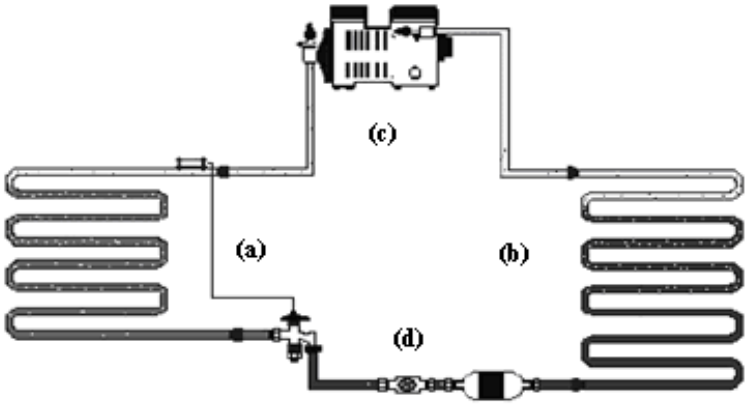
Şekil 3.4 : (a) MoS_2'nin, **(b)** Grafitin, **(c)** Hegzagonal bornitritin, **(d)** Borik asitin tabakalı kristal yapılarına ait şematik gösterimler [32].

MoS_2 hezagonal yapısı $P6_3/mmc$ uzay grubundan, a=0.3164nm, c=1.2295nm uzunluğunda bağ yapısından oluşmuştur. "C" ekseni etrafında tanelerin dönmesi sürtünmenin ilk aşamasından sonra meydana gelir. Başlangıç sürtünme katsayısından sonraki düşüş (sabit rejim) bu özelliğinden kaynaklanır.

Katı yağlayıcılar düşük sürtünme ve yüksek aşınma ömrü sağlamalarına rağmen, istenen yağlama özelliğini gösterebilmeleri için aşınma ortamının katı yağlayıcıların lehine olması gerekir. MoS_2 ve diğer dikalgojenitler; neme, oksijene ve sıcaklığa karşı son derece duyarlı oldukları için bu gibi ortamlarda bozunmakta ve yağlayıcılık özelliklerini kaybetmektedirler. Genellikle 300^0C sıcaklıklarda oksitlenerek yapıları bozulur. Fakat vakum ortamında, yağsız kayma şartlarında bile çok düşük sürtünme katsayıları (0.02–0.05) ve yüksek aşınma dayanımı gösterirler [31,32].

3.5 Ev Tipi Soğutucular

Günümüz buzdolaplarının kullandığı prensip, Jacop Perkins'in 1834 yılında mekanik buzdolabını icat etmesine dayanmaktadır. Kullanılan sistem, bir soğutucu gaz ve bu gazın hareketini sağlayan bir kompresörden oluşmaktadır.



Şekil 3.5 : Bir soğutucu sistemin genel görünüşü **(a)**yoğunlaştırıcı **(b)**buharlaştırıcı **(c)**kompresör **(d)**genişleme valfı [25].

Tipik bir buzdolabında soğutucu akışkanın, kompresör sistemini de içine alacak şekilde soğutma işlemini gerçekleştirmesi şekil 3.5. 'deki gibi olmaktadır.

Burada gaz halinde kompresörden kondansöre basılan soğutucu akışkan kondansörde yoğunlaşmaya başlar ve kondansör – regülatör ventil arasında tamamen yoğunlaşır. Soğutucu akışkan buharlaştırıcıda sıvı halde gelir ve çevreden ısı alarak buharlaşır. Buharlaşma alçak basınç altında, yoğunlaşma ise yüksek basınç altında gerçekleşir. Buharlaşma ve yoğunlaşma sürecinde basınç sabit kaldığı için sıcaklıkta değişmez. Buharlaştırıcı ve kondansörde basınç ne kadar yüksekse buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklığı da o kadar yüksektir, ne kadar düşükse buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklığı da o kadar düşüktür [16,24].

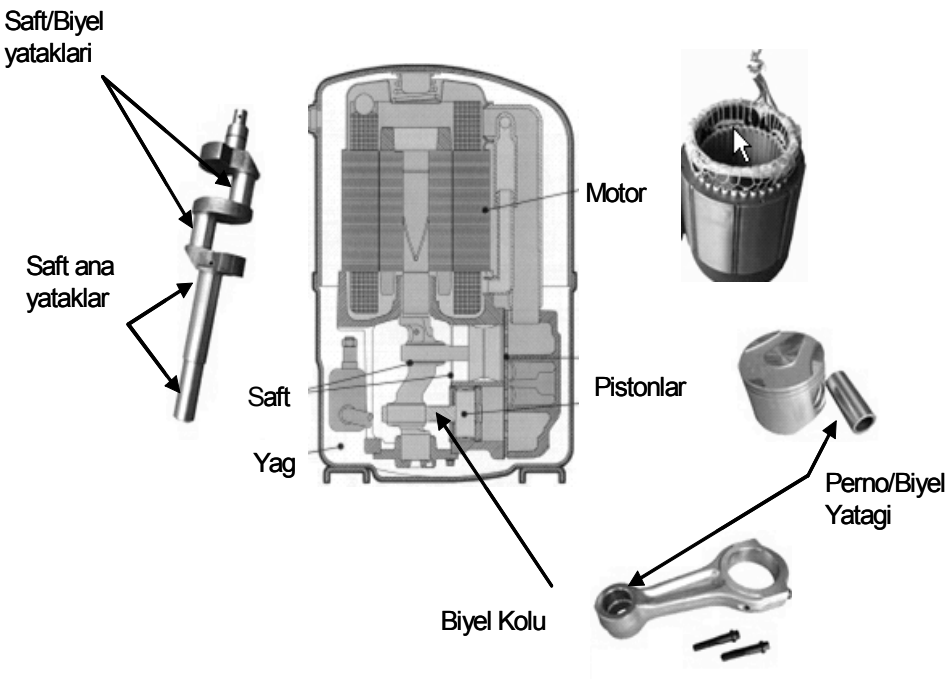
Günümüzde kullanılan modern buzdolaplarının kompresör sistemlerinin arızalanması, bu arızalar sonucu gaz, yağ kaçırması ya da eski performansının düşmesi sıkça karşılaşılan problemlerdir. Kapalı tip kompresörlerin en büyük dezavantajı yerinde tamir edilememeleridir.

3.6 Hermetik Kompresörün Çalışma Şartları ve Aşınmaların Meydana Geldiği Bölgeler

Soğutucu sistemlerin genel çalışması; ortamın ısısının, soğutucu gazın genleşme ve yoğunlaşma faz değişimlerinden yararlanarak alınıp başka yere verilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu soğutma döngüsü ise kapalı tip sıkıştırma gerçekleştiren kompresörler ile yapılmaktadır. Özellikle buzdolaplarında tercih edilen kapalı tip kompresör sistemleri içerisine uygun bir şekilde yerleştirilmiş olan elektrik motoru, bağlanan parçaların hareketini sağlayarak soğutucu gazın basıncını ve sıcaklığını arttırır. Basıncı artan soğutucu gazın sıcaklığı artar. Bobinlerden geçen bu gazın aldığı ısıyı dışarıya vermesi sağlanır. Soğutucu gaz yüksek basınç altında yoğunlaşır. Yoğunlaşmış olan gaz genleşme subabına gelir. Bu subapın bir tarafından yüksek basınçlı gaz diğer tarafa düşük basınçlı olarak geçmektedir. Sıvı fazda olan soğutucu gaz kaynar ve buharlaşır. Sıcaklığı bir anda -27 F gibi (amonyak için) çok düşük değerlere düşer. Isısı düşmüş soğutucu gaz buzdolabının içini soğutur. Bu gaz kompresör yardımı ile emilerek devre kendini tekrarlar.

Kompresör içerisindeki soğutucu gaz ve yağ karışımı sürekli devir daim yapmaktadır. Geleneksel kapalı tip (hermetik tip) kompresörlerde kloroflorokarbon, hidrokloroflorokarbon, vb. birçok soğutucu gazlar kullanılmaktadır. Bu gazlar günümüzde hala kullanılmalarına rağmen atmosfere zarar vermeyen, insan sağlığına zararsız olanlar daha çok tercih edilmektedir. Soğutucu gazların değişmesi ve bu gazlarla çözünebilecek yağ katkı maddelerinin değiştirilmesi hatta yağın değişmesi; kompresörlerde meydana gelen sürtünme mekanizmalarının artmasını, aşınmanın artmasını, bunlara bağlı olarak enerji, ısı, verim kayıplarının oluşumunu kaçınılmaz hale getirmektedir.

Şu ana kadar yapılmış olan çalışmalardan yola çıkıldığında en çok tercih edilen klor içermeyen R134a gazı ve ester tipi yağ; kompresörünün kayma sürtünmesi yapan silindirler ve pistonlar arasında, biyel kolu ile pistonun konik oturma kısmında yüksek aşınmaya neden olmaktadır. Krank mili, şaft yatağı/motor, biyel kolu yatağı/krank pimi, piston pimi/biyel kolu yatağı, piston/silindir iç yüzeyi arasında, giriş ağzı(klape)/çıkış ağzı malzemeleri yüksek aşınma görülen diğer kısımlardır [17]. Bu olaylar zinciri kompresörün performansının ve güvenebilirliğinin sağlanmasında büyük problemler oluşturmaktadır.



Şekil 3.6 : Hermetik kompresörün ana parçaları ve aşınma bölgeleri [15].

Şekil 3.6 'da gözlemlendiği gibi tipik bir hermetik kompresördeki yataklar üç grup altında toplanabilir. Bunlar;

1- Şaft ana yatakları (genellikle şaft içi yağ kanalları ile beslenir ve hidrodinamik yağlama şartlarında çalışırlar)

2- Şaft/Biyel kolu yatakları (şaft içi yağ kanalları ile beslenir ve hidroinamik yağlama şartlarında çalışırlar)

3- Perno/Biyel kolu yatakları (sıçratma yağlama ile sınır yağlama şartlarında çalışırlar)

Kritik aşınma oranlı temas yüzeyleri, 60 HRC gibi yüksek bir sertlikte ısıya dayanıklı yüksek karbon çeliğinden, uygun toleransta ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olacak şekilde imal edilmektedir. Dar tölerans ile üretilmesine gerek olmayan temas yüzeylerindeki yağ veya gresli yağlama sonucunda elastohidrodinamik (EHD) film tabakası oluşmakta dolayısıyla aşınma azalmakta hatta birçok uygulamada aşınma ihmal edilecek seviyeye düşmektedir [26].

Aşınmanın en yoğun olarak perno-biyel bağlantısında gözlemlendiği yapılan çalışmalar sonucu bulunmuştur. Bu parçalar kompresörün ilk çalışma anında yağsız, aşırı yük altında ve düşük salınım hızı altında çalışırlar. Dolayısı ile bu parçalarda

yüksek ısınma ve aşınma görülmektedir. Hermetik tip kompresörlerde kullanılan malzemeler, perno için 100Cr6 ve biyel için demir esaslı sinter malzemeleridir.

100Cr6 perno malzemeler ısıl işlem sonucunda yaklaşık 1250 HV sertliğe ulaşılır ve pistonla biyel kolu arasındaki pim olarak kullanılırlar. Yatak üzerinde yüksek temas basıncı altında kayan pim malzemesi, yataklarda güçlü bir aşınma etkisi meydana getirmektedir. Ayrıca temas açıları bu kaymanın şiddetini kritik bir şekilde etkilemektedir.

Yatak ömrü; yüksek devirdeki temas gerilmeleri altında yuvarlanan elemanların hareket yolu ile, malzemelerin önceden tahmin edilen aşınma ve yorulma davranışı referans alınarak kabul edilen standartlara göre hesaplanmaktadır**.** Ancak pürüzlülük teması çok yüksek olduğu zaman, hesaplanmış yorulma aşınması ömründen daha kısa bir ömür ortaya çıkabilmektedir. Mesela rulmandaki yuvarlanma elemanı kenarı ve makara ucu arasındaki kayma hareketi yüksekse, kritik operasyon şartlarında aşınma aniden artabilir ve meydana gelen aşınma yüksek bozulma (smearing ve scuffing) aşınmasına dönüşebilir. Bu bozulma sonucunda temas yüzeyleri üzerinde kaba metal transferi olmaktadır. Yüksek sürtünme; katı yüzey filminin kırılmasına, yüksek malzeme transferine, ses ve titreşimin artmasına neden olur [34-36].

3.7 Yatak Malzemelerinden Beklenen Özellikler

Birçok kompresör firması için yatak malzemeleri kompresörün en önemli bölgesini oluşturmaktadır. Bu malzemelerin aşınma dayanımlarının arttırılması için; karşı malzeme ile uyumluluğu, uygunluğu, korozyon dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, yorulma dayanımı ve tokluğunun geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece kompresörün daha verimli ve performanslı çalışmasına olanak sağlanır [37].

Yatak malzemesi alaşımlarının yapılarının ve kayma özellikleri arasındaki ilişkilerin tanımlanmasında, genel olarak taşıyıcı kristal kafes yapısının uygunluğu önemlidir. Yapı, yumuşak ve sert yapı elemanlarından meydana gelebilir. Yumuşak faz, belirli bir kendini yağlama özelliği gösterirken; aşınma partiküllerinin, yabancı parçacıkların yüzeye gömülmesini sağlar ve yatak ile mil malzemesinin kaynak olmasını engeller. Buna karşılık sert faz, yükü karşılar ve kuvveti üzerinde taşır [37].

Karşı malzeme ile uyumluluğu diğer bakılması gereken özelliklerinden biridir. Yağsız çalışma şartlarında kendi kayganlığı ve karşılıklı çalıştığı malzeme ile uyumluluğu değerlendirilmektedir. Bu kayganlık zaman zaman oluşan metal-metal temaslarda yatak malzemesinin aşırı ısınıp hasar görmesini önler. Fakat ekipmanın çalışmaya başlaması ve durması sırasında yağ filmi ilk anda oluşmaz ve oluşana kadar karşı malzeme yüzeyi yatak malzemesi üzerinde kayar. Karşı malzemenin

sertliği yatağa nazaran üç ile beş kat değerde ise, oyulma eğilimi daha düşük değerde olur [37].

Yatak malzemelerinin, statik ve dinamik yükleri karşılayabilmesi için yeterli sertlik ve dayanıma sahip olmaları gerekmektedir. Yumuşak yatak malzemeleri, kenar basınçlarının doğurduğu gerilmelere karşı yeterli sünekliliği gerektiren yerlerde kullanılır. Sert malzemeler ise daha çok hidrodinamik yağlamanın olmadığı, aşınma direncinin yüksek olması istenen yerlerde kullanılırlar [37].

Yatak malzemelerinin sertlik ve elastiste modülü değerleri uygulanan yükü taşıyabilmeli ama mümkün olduğunca da düşük değerde olmalıdır. Böylece geometrik hatalar tolere edilebilir. Yağın içine kaçabilen sert partiküller, yatak yüzeyini veya şaft yüzeyine fazla abrazif hasar vermeden yatak malzemesi içine gömülebilir. Yatak malzemesi bu sert parçaları içine alabilecek kadar yumuşak olmaz ise şaftın yüzeyi çizilir [37].

Yatak malzemesinin ilk çalışma koşullarında kendi kendine yağlama yapabilmesi gereklidir. Yüzeyinde yağ filminin kalıcı olması için yağ molekülleri yatak malzemesine mümkün olduğu kadar fazla yapışabilmelidir. Uygulanan kaplamalarda yüksek pürüzlülükler ve gözenek bu özelliğinin arttırılması için uygulanan bir özelliktir.

Yatağın ısısının yatak malzemesi üzerinden yatak gövdesine kolayca iletilerek sıcaklığın daha fazla yükselmesinin önlenmesi yatak ömrü açısından faydalıdır. Bu durumda yatak malzemesinin ısı iletkenlik katsayısının yüksek olması avantajlıdır. Ayrıca yatak boşluğunun emniyetli değerden daha fazla küçülmemesi için ısıl genleşmesi de az olmalıdır [37].

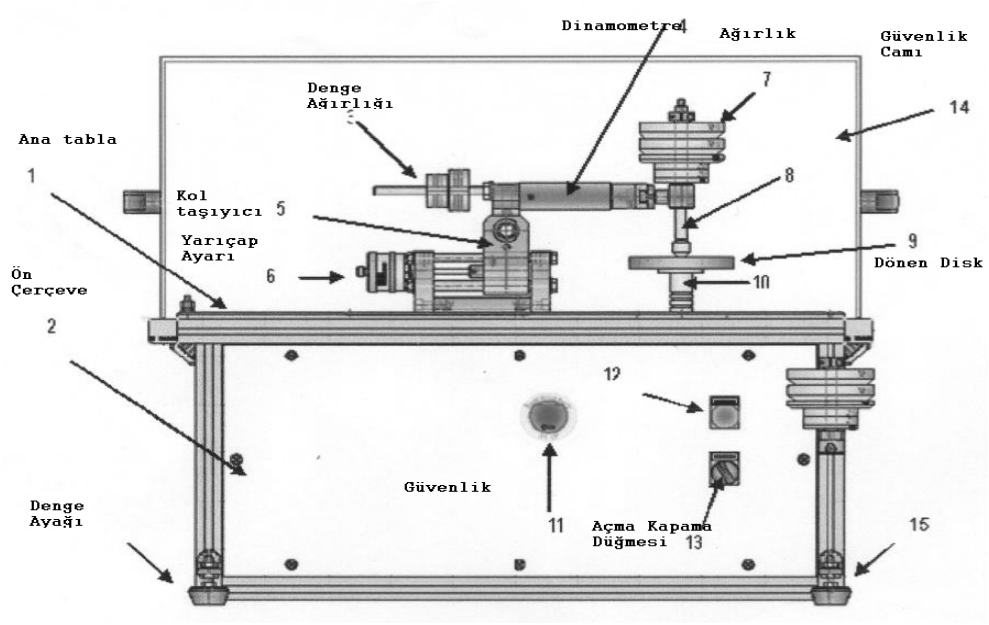
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Hermetik kompresörlerdeki yatak malzemelerinin aşınma direnci, sürtünme katsayısı ve yükleme kapasitesi gibi özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Hermetik kompresörlerin piston ve biyel kolu arasına giren pim'in yuvası buhar işlemli ve buhar işlemsiz sinter çelik malzemenin, hava ve R600a ortamında, 100Cr6 pim malzemesine karşı olan tribolojik etkileşimleri incelenmiştir. Disk üstünde pim testleri yüksek temas basınçlarında, yüksek hızlarda, yağsız ve sınır yağlı ortamlarda yapılmıştır. Malzemelerin aşınma dayanımlarının arttırılması için molibden sülfat kaplamalar kullanılmıştır.

4.1 Tribometre Test Cihazı

Malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi için "Nanovea" disk üstünde pim (pin-on-disk) test cihazı kullanılmıştır. Bu tribometre, yeni bir kontrol ve otomatik sistem yağlama cihazı ve gaz konsantrasyonu kontrol mekanizması ile uyumlu çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.1 : Nanovea tribometre cihazı.

A PCI 7352 makinenin beyni olup; dönme sayısını, hızını ve sistemin ana kontrolünü sağlayan kontrol kartıdır. Amplifikatör, motor çerçevesinin altında olup motor için gerekli akımı sağlar. Motor tarafından elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilir ve disk döner. "MT4002.12" programı makineden elde edilen verileri işleyerek, sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, zaman ve mesafe grafiklerine dönüştürmüştür.

Diskin dönme hızı 3000 dev/dak.' a çıkabilecek şekilde arttırılmıştır. Maksimum yük kapasitesi 60N'dur. Yarıçap 50mm'e kadar ayarlanabilmiştir. Yüksek ısıtıcı ile birlikte kullanılabilen tribometre test cihazına bağlı iki adet termokapl eklenmiştir. Pim sıcaklığını ölçebilmek için termokapl'ın teli, pim tutucunun içerisinden geçip pime değebilecek şekilde tasarlamıştır. Diğer termokapl ise yüksek sıcaklıkta yapılacak olan testlerde ısıtıcının içindeki sıcaklığı ölçmek için yerleştirilmiştir.

Tribometre cihazına, belirli uzunlukta kesilen silindir şeklindeki pimi tutması için pim başlığı tasarlanmıştır. Pim başlığının içerisinde pimin kaymasını ve dönmesini (rolling) engelleyen bağlantı elemanları kullanılmıştır.

4.2 Tribometre Testlerinde Kullanılan Malzemeler

Testlerde kullanılan yatak malzemeleri, yüzey buhar işlemsiz ve buhar işlemli sinterlenmiş çelik, kullanılan pim ise ısıl işlemli 100Cr6 çelik malzemesidir. Malzemelerin üretilme aşaması ve uygulanan ısıl işlemler, parçaların aşınma oranlarını değiştiren önemli etkenlerdir. Kompresörlerde kullanılan pimlerin ve yatakların mevcut kullanılan malzemeler ile aynı olması, sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Dolayısı ile hermetik kompresörlerde kullanılan orjinal pim malzemesi ve sinter çelik malzemeleri ısıl işlem yapılmış olarak testlerde kullanılmıştır.

Yüzey sertleştirme, malzemelerin aşınma ve yorulma dayanımlarını arttırmak amacıyla uygulanan ısıl işlemdir. Kütlesel sertliğin genel olarak arttırılması, gevrek kırılma tehlikesinin ortaya çıkmasına neden olacağı için sürtünen yüzeylerin yeterli kalınlıkta bir tabaka olarak sertleştirilmesi yoluna gidilmiştir. Yorulma çatlakları çoğunlukla yüzeyden başladığı için ve yorulma dayanımı statik dayanımla aynı yönde geliştiği için yüzey sertliğini arttırmak, çatlakların oluşumunu da güçleştirir. Sertleştirilen yüzey tabakasında genellikle basma gerilmesi, iç kısımda ise bunları dengeleyen çekme gerilmeleri oluşur [37].

Piston pimleri

Piston pimleri 100Cr6 vasıflı çelikten üretilmiştir. Karbürleme yüzey sertleştirme işleminden sonra 0,2 mikron toleransla taşlanmıştır.

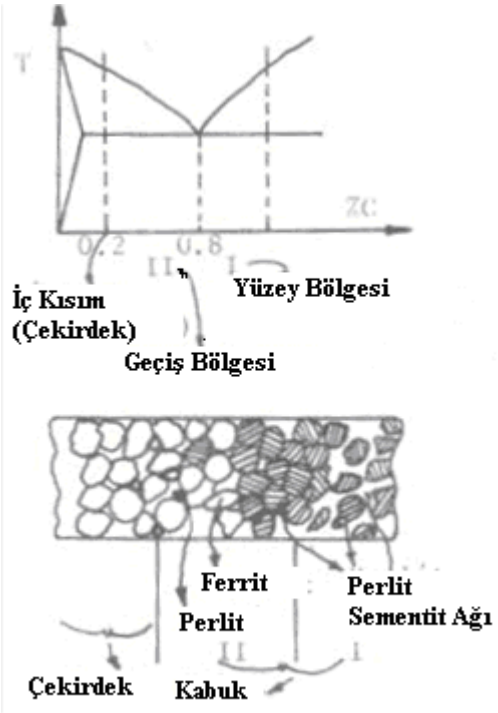
Piston pimi, biyel başına veya piston deliklerine sıkı geçecek şekilde üretilir. 4µm tölerans bırakılarak hareket etme serbestliğine sahip olacak tarzda üretilmiştir [15].

Çizelge 4.1 : 100Cr6 pim malzemesinin sertlik ve kompozisyon değerleri.

	Kimyasal bileşim (% ağ)						
Perno:100Cr6							
Sertlik (HV)	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
1250-1350	0.883	0.54	0.95	1.32	0.03	0.45	96.25

Tribometre testlerinde kullanılacak perno (100Cr6) numuneler tel erozyon işlemi ile 5mm uzunluğunda kesilmiştir. Çapı 7.93mm'dir. Pimler kesilme işleminden hemen sonra desikatörde saklanmıştır.

Karbürleme işlemi %0,10–0,25C'lu alaşımlı çeliklerin yüzeyine yüksek sıcaklıklarda karbon yayındırma işlemidir. Böylece karbon oranı %0,8-1,2 oranında yükselir. Malzeme yüzeyinde sementit miktarı büyük ölçüde artar. Karbür oluşumunun getirdiği sertik artışı yeterli olmadığı için karbürleme işlemini su verme işlemi takip eder. Böylece kabuk bölgesindeki mikroyapı martenzite dönüştürülür (şekil 4.2.).



Şekil 4.2 Normalize durumdaki 100Cr6 çeliğinin karbürleme ile değişen iç yapısı [37]

Biyel kolu yatağı

Presleme ve ardından uygulanan sinterleme ısıl işlemi yöntemi ile; toz halindeki partiküllerin yüksek basınç ve sıcaklık ile basılarak ekonomik, hassas töleranslara sahip karışık şekilli, mukavemetli, tok, gözenekli, aşınmaya dayanıklı parçalar üretilebilmektedir [38, 39].

Çizelge 4.2 : Biyel yatağı demir alaşım sinter malzemenin kimyasal yapı bileşenleri.

Biyel Fe esaslı sinter

Sertlik (HRF)		Kimyasal bileşim (% ağ)					
Sinterli	Buhar işlenmiş	C	S	Cu	Si	Mn	Fe
82-91	95-108	0.3	0.28	2.44	0.21	0.54	96.51

Sinterleme işlemi çevresel zararı olmayan yüksek tölerans ve şekillendirme işlemini gerektirmeyen bir üretim yöntemi olduğu için endüstride sıkça kullanılmaktadır. Sinterleme sonrası üretilen Fe-2.44Cu-0.54Mn–0.28S–0.21Si-0.3C kompozisyonlu malzemelerde gözeneklilik oranı 5-15% arasında değişmektedir. Gözenekliliğin çok yüksek olması (%15 ‘den büyük) mekanik özelliklerin düşük olması neden olurken [40], gözenekliliğin düşük olması (%5 ‘den küçük) yağ emme ve kendi kendini yağlama özelliğini yitirmesine neden olmaktadır.

Testlerde kullanılan ve %8 gözenekli bir yapıya sahip olan sinterlenmiş çelik malzemeler, ses yutma özelliğinin yanı sıra yağ depolama ve kendi kendini yağlama gibi çok önemli özelliklere sahiptirler. Ayrıca gözenekli sinter malzemeler kullanıldıkları yerlerde enerji sarfiyatını azaltmak gibi önemli bir özelliğe de sahiptirler [41]. Gözenekli yapı gereği yoğunluğu düşük parçalar elde edebilmek için ağırlıkların problem teşkil ettiği birçok alanda sinterlenmiş parçalar tercih edilmektedir [38,39,42,43]. Özelliklerini ve kullanım alanlarını göz önüne aldığımızda sinterli parçalar; yüksek hız, sıcaklık, basınç, aşınma dayanımı gerektiren alanlarda kullanılmalıdırlar.

Toz halindeki malzemelere ilk uygulanan işlem preslemedir. Bu yaygın sıkıştırma yöntemi ile sert metal kalıp içersinde 300-800 MPa basınç altında eksenel presleme yapılır. Tek bir operasyonla karışık şekilli parçalar üretilebilir. 800 MPa basınç altında 7.3 g/cm^3 yoğunluğa ulaşılabilirler. Sinterleme ısıl işleminde demir esaslı malzemeler için sıcaklık 1100-1150 ^{0}C’ dır. Bazı özel durumlarda 1250 ^{0}C’ye kadar yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulur. 10 ile 60 dakika arasında bekleme zamanı vardır. En yaygın kullanılan fırın çelik-tel örgülü kayışlı fırındır. Fırın içersinde oksitlenmeyi önleyen bir atmosfer gereklidir. Genellikle amonyak, endo-gaz veya azot-bazlı atmosferler kullanılır.

Sinterlemenin ana mekanizmaları yüzey ve hacim difüzyonudur. Difüzyon ile alaşım elementleri demir içerisine yayılırlar. Alaşım elemetlerinden karbon ve bakır katkısı demirin sertliğini arttırmaktadır. Fakat buhar işlemi sırasında karbonun malzemeye pozitif etkisi varken, bakır negatif olarak etkilemektedir. Bakırın oksijene olan afinitesi demirinkinden düşüktür. Buhar işlemi sırasında yüzeyde sadece demir oksitlenir [36].

Sinterli parçalarda gözeneklerin dağılımı, boyutu ve şekli aşınma dayanımlarını etkilemektedir. Ayrıca gözeneklerin boyutu ve dağılımı, arayüzey kaplamasının yüzeye yapışabilme özelliklerini de etkilemektedir.

Gözenekli yapının aşınma dayanımını azaltıcı etkisi ise boşluklara dolan partikül batmalarından ve yapışma aşınması yaratarak aşınma oranını arttırmasından ileri gelmektedir. Ayrıca gözenekler yorulma çatlağı başlangıç alanları gibi bir etki yaratabildikleri için aşınma bölgelerinde tabaka şeklinde dizilmiş aşınma partikülü izi (delaminasyon) oluşturabilmektedirler [40].

Gözeneklerin miktarının ve dağılımının ayarlanması, sinterleme sırasındaki parametrelerin değiştirilmesi ve sinterlemeden sonra uygulanan bazı ısıl işlemler ile sağlanmaktadır. Gözenekli sinter çeliklerin aşınma dayanımı testlerinin yüksek hızlarda yapılması neticesinde demiroksit oluşumu tespit edilmiştir. Literatür çalışmalarında oksitlenmiş parçaların gözeneklere dolması, gerçek temas alanının artması ve kontak basıncının düşmesi sonucu aşınmaların azaldığı belirtilmektedir [40]. Yüzey oksitinin sürtünme katsayısının azaltması gibi aşınmayı azaltıcı özelliklerinin yanısıra, gözeneklerden kaynaklanan partikül batması ile abrazif aşınmayı arttırması, ağırlık kayıplarını arttırıcı bir etki yaratabilir.

Sinterlenmiş demir malzemeler günümüzde beyaz eşya sektöründen, otomobil parçalarına, uçak motorlarına ve daha bir çok alanda geniş çapta kullanılmaktadırlar. Makinelerin motor parçaları için; eksantrik mili, krank mili, enjeksiyon pompaları, rotorlar, hidrostatik pompalar için kam halkası malzemelerinde demir esaslı sinter kullanılmaktadır [42].

Literatür çalışmalarından elde edilen veriler doğrutusunda aşınma dayanımı en yüksek olan sinter malzemeyi üretmek için; uygulanan baskı basıncı 475 MPa ve toz boyutu 5-100 μm arasında seçilmiştir [44-46]. Malzeme 0.30C, 0.0043S, 2.44Cu, 0.21Si, 0.54Mn geri kalanı demir olmakla birlikte 6,8 gr/cm^3 yoğunluğa sahiptir. 50 adet numune sadece sinterleme işlemi sonrasında kullanılmıştır.

Yüzey buhar işlemi

50 adet numune sinterleme işlemi sonrasında yüzey oksitleme buhar işlemine girmiştir. Yüzey buhar işlemi elektrik ocağında ve daha sonra özel buhar kurutucuda

yapılan 540^0C 'de 2 saat uygulanan bir oksitleme işlemidir. Bu oksitleme işlemi sonrasında malzeme yüzeyinde koyu mavi bir tabaka görülür. Oksijene afinitesi demirden daha yüksek olan empürite atomları gözeneklerde oksitlenip bu bölgeleri doldururlar. Üst yüzeyde ise demir oksit tabakası oluşmaktadır [47-49]. Bu işlem sonrasında sinter malzemenin tüm iç gözenekleri kapanır.

Yapılmış olan literatür çalışmalarında gözeneklerin bu yöntemle kapatılması veya azaltılması, yatak malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmekte ve aşınma katsayılarını azatmaktadır [39,40].

Buhar işlemi 400-600^oC sıcaklıklarda, atmosfer basıncının biraz üstündeki basınçlarda, önceden ısıtılmış parçalar üzerinde uygulanmaktadır. Sıcaklığa ve atmosfer şartlarına bağlı olarak hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4), wüstit (FeO_x) olmak üzere üç farklı demir oksit türü oluşabilmektedir.

Yüzey buhar işleminde gerçekleştirilen oksidasyon reaksiyonları şu şekilde olmaktadır;

$$3Fe + 4H_2O = Fe_3O_4 + 4H_2 \ (t < 570^0C) \quad \textbf{(4.1)}$$

$$Fe + H_2O = FeO + H_2 \ (t > 570\ ^0C\ ) \quad \textbf{(4.2)}$$

Buhar işlemi sonrasında yüzeyde magnetit (Fe_3O_4) filmi oluşması, tabakanın yüzeye iyi yapışması ve yoğun bir yapıya sahip olması istenir.

Yüzeyde oluşan bu tabaka sayesinde ;

1- Sertliği 50 HRC olan magnetit tabakası oluşumu ile malzemenin abrazif aşınmaya direnci artmaktadır. Oksit yanlızca yüzeyde değil, birbirine bağlı ağ yapısı oluşturan gözenekler boyunca bulunduğundan, aşınma etkisi ile yüzeyde bulunan oksit zarar görse de gözeneklerdeki oksit aşınma direncine katkıda bulunacaktır. İşlem şartlarına bağlı olarak malzeme sertliğinde %40-80 oranında bir artış olacaktır.

2- Oksit tabakası yüzeye iyi yapıştığı için çatlak, boşluk gibi yüzey hataları oluşumuna daha az eyimlidir.

3- Yüzeydeki 5 mikronluk bir oksit tabakası, geçirgen olmadığından dolayı korozyona direnç artar.

4- Yüksek yoğunluğa sahip sinter malzemelere buhar işlemi uygulandığında yüzeyde bulunan gözenekler tamamamen kapandığı için, sıvı ve gaz geçişi engellenir. Böylece malzemeye elektrolit kaplama yapılacaksa gözeneklere

5- Boyutsal herhangi bir probleme neden olmaz.

6- Ekonomiktir.

Buhar işlemi sonunda çekme mukavemetinde, darbe direncinde, ve süneklik değerlerinde düşüşün görülmesi ise bu işlemin dezavantajıdır [37].

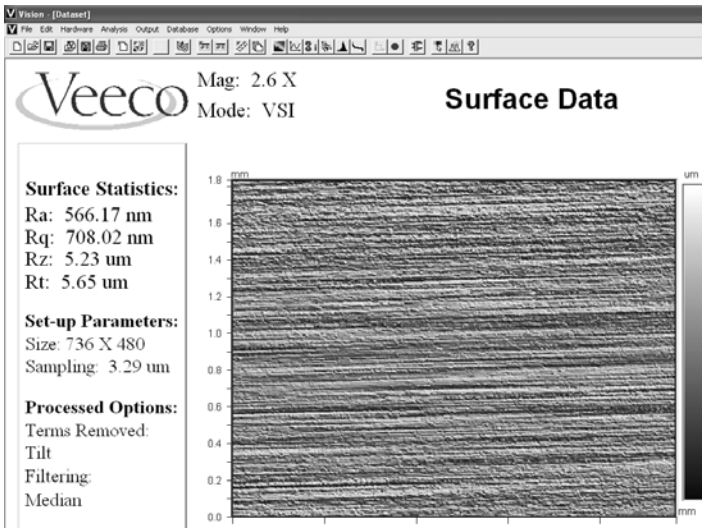
Yüksek yoğunluklu malzemelerde yüzey buhar işleminin süresi önemlidir. Gözeneklerin doluşunun sınırlı olmasından dolayı dış yüzeyin aşınma direncine katkısı önem kazanır. Orta yoğunluğa sahip malzemeler daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Buhar işlemi sırasında süre, hematit oluşumundan kaçınılarak yüksek sertlik sağlanacak ve enerji tüketimini optimize edecek şekilde seçilir [36,37].

4.2.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin gerçekte kullanılan sinter malzemenin ve perno malzemenin pürüzlülük değerleriyle aynı olabilmesi için malzemeler taşlama işlemine sokulmuştur. Taşlama işlemi sırasında pas önleyici ve su ile karıştırılan özel bir gres yağ kullanılmıştır. Taşlama işlemi sonrası yüzeyin pürüzlülük değerleri istenilen değerlere düşürülmüştür. Taşlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri "Vecoo profilometre" ile ölçülmüştür.

Yüzey buhar işlemli sinter malzemeler (%0.2) 0.002mm hassasiyette taşlama işlemine sokulmuştur. Yüzey pürüzlülük Ra değerleri 0.5 μm değerinde ölçülmüştür (şekil 4.3.)

100Cr6 pim malzemeler ise %0.1 hassasiyetle taşlanmıştır. Perno malzemelerdeki ortalama pürüzlülük ise 0.2 μm'dir.



Şekil 4.3 : Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları.

Sinter numunelerin ortalama pürüzlülük değerinin 0.56µm Ra olarak ölçülmüştür (şekil 4.3.). Rz ortalama maksimum pik yüksekliği, Rt ise yüzey pürüzlülüğünün toplam yüksekliğini ifade etmektedir.

4.3 Ölçüm Analizi (ÖSA) – Gage R&R Testleri

Yapılan testlerin doğruluğunun kanıtlanması ve tekrar sayısının yeterlilğinin belirlenmesi amacı ile "Anova" yöntemi ile deneysel tasarım yapılmıştır. Deneylerde kullanılan disk üstünde pim cihazında tek operatör kullanılarak Ölçüm Sistemi Analizi (ÖSA) ,Gage R&R testi yapılmıştır.

4.3.1 Temizleme Kademeleri

Sinter numuneler gözenekli bir yapıya sahip olduklarından taşlama esnasında yüzeyden iç kısımlara doğru kopan partiküllerin batması söz konusudur. Bu partiküllerin ultrasonik banyo içinde yapılan temizlik işlemi ile dışarı alınmasına özen gösterilmiştir. Aksi takdirde test sürecinde mikro-nano boyuttaki partiküllerin abrazif etki oluşturması söz konusu olacaktır.

Taşlama sonrası yüzeyde oluşan yağ filminin ve gözeneklerde birikmiş olan partiküllerin özenle temizlenmesi gerektiği için 15 dk. aseton hemen ardından 15 dakika etil alkol ile ultrasonik temizleme işlemleri tekrarlanmıştır. Denemeler sonrasında etil alkolun gözeneklerden uzun süre çıkmaması ve ağırlığın doğru olarak ölçülememesi nedeni ile, temizleme işlemi sonrası gözenekli sinter malzemeler desikatörde bekletilmiştir. Gözeneklere giren etil alkol tamamıyla uçurulduktan sonra test başlatılmıştır.

4.3.2 Gage R&R test sabitleri

Çizelge 4.3: Ölçüm Sistemi Analizi (ÖSA) aşınma test parametreleri.

Yük (N)	40
Yüzey Hızı (m/s)	0.262
Sıcaklık (^{o}C)	23
Süre (saat)	6
Ortam	%60 nemli hava
Yağlama koşulları	Kuru, Yağlı

Testler için yüzey hızı 0.26 m/s olarak sabitlenmiş olup ayarlanan dönme yarıçapına göre dönme hızı (dev/dak) değiştirilmiştir. Ortam sıcakllığı 23 ^{0}C olarak ölçülmüştür. İlk testler için 40 N 'luk ağırlık kullanılmıştır. Toplam test süreci 6 saat olup, 1, 2, 4 ve 6 saat sonunda numunelerdeki ağırlık kayıpları ölçülmüştür.

4.3.3 Sonuçlar

Uygulanan deneysel çalışmalar sonuçlarına göre aynı yarıçaplarda test edilen numunelerin ağırlık kayıpları birbirlerine çok yakın değerlerde ölçülmüştür. En dış yüzeyde (r: 21.90 mm) yapılan test sonuçları ile en iç yüzeyde (r: 4mm) yapılan testler arasında büyük ağırlık kayıpları farkları çıkmaktadır. Aynı yarıçap üzerinde yapılan tekrarlarda büyük bir sapma görülmemiştir. Bütün testler daha sonra en dış yüzeyde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4 : Nanovea cihazında gerçekleştirilen sinter çelik disk-100Cr6 pim aşınma testi.

Mevcut yataklardaki aşınma değerlerinin tespiti için, ilk olarak Fe esaslı sinter malzeme ile 100Cr6 pim deneyleri yapılmıştır. Deneyler dört farklı zaman aralığında altı kez tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda sinter malzemede elde edilen ağırlık kayıpları çizelge 4.4'de verilmektedir. 100Cr6 pimlerde ağırlık kayıpları çok düşük olup 6 saat sonunda 0.4-0.7 mg. olarak ölçülmüştür (çizelge 4.5).

Çizelge 4.4 : Fe esaslı sinterlenmiş çelik disk malzemesinin ağırlık kayıpları.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
Zaman (saat)	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**
1	61.8	108.0	106.4	105.0	121.5	126.0
2	233.2	256.1	288.0	270.0	305.5	358.0
4	602.3	680.0	703.0	725.0	705.5	732.0
6	1021.5	985.0	1067.5	1045.0	1082.5	1146.7

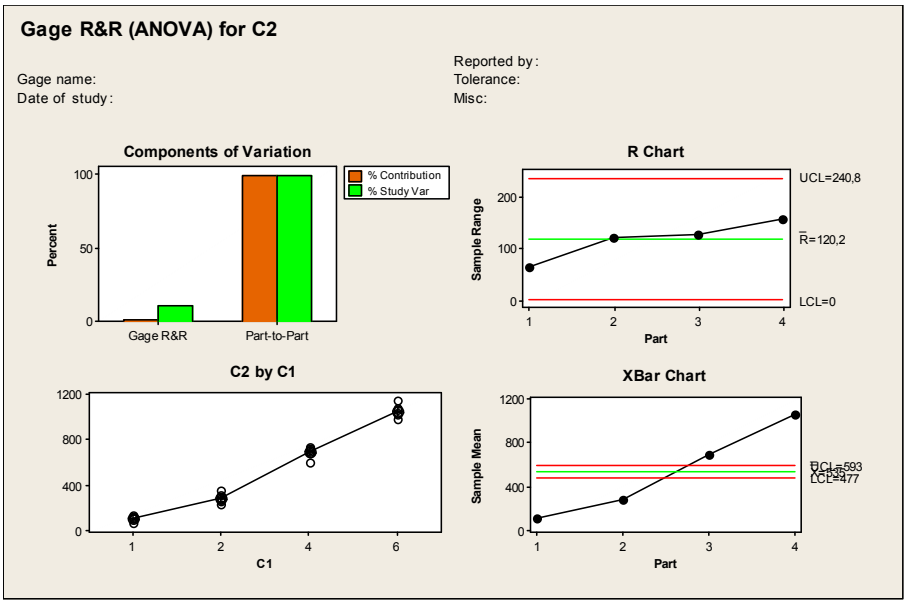
Çizelge 4.5 : 100Cr6 pim malzemesinin ağırlık kayıpları.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
Zaman (saat)	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**	**Delta m (mg)**
6	0.4	0.7	0.6	0.4	0.5	0.6

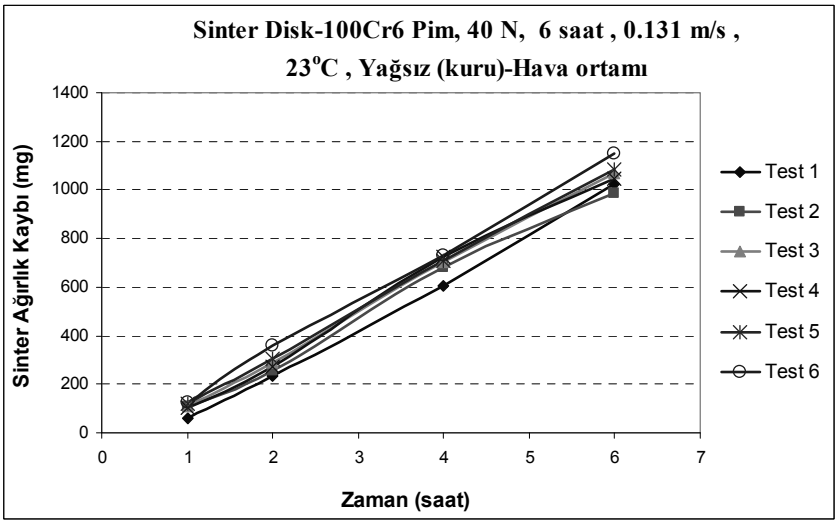
Ölçüm cihazının yeterliliğinin belirlenmesi amacıyla bir ölçüm yeterliliği analizi yapılmıştır. Analiz sırasında her bir veri noktası için yapılan altı farklı ölçümün tekrar edilebilirliği incelenmiştir. Minitab programında tek operatörle gerçekleştirilen ölçümler analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda "Total Gage R&R % Study Var." değeri %10,27 olarak elde edilmiştir. Bu analizle ölçüm sisteminin toplam değişkenliği doğrultusunda (ölçüm, –ölçüm, +ölçüm sistem değişkenliği) tekrarlanabilirlik problemlemlerinden gelen bir standart sapma bulunmaktadır. Bu standart sapmanın düşük olması istenir. Bu durumda ölçüm sisteminin yapılacak deneylerde tekrar edilebilirlik açısından yeterli olduğu ve farklı numune ve şartlarda deney yapıldığında güvenle birbirinden ayırt edilebileceği söylenebilir. Ölçüm yeterliliği için kullanılan ölçüm sayısının yeterli olabilmesi için 'Number of distinct catagories' değerinin 4'den büyük olması gerekmektedir. Analiz sonucunda bu değer 13 olarak elde edilmiştir. Bu durum ölçüm yeterliliği için yapılan ölçüm sayısının yeterli olduğunu göstermektedir. Analizler sırasında yalnız Fe esaslı sinter malzeme dikkate alınmıştır. Aşağıda Minitab programında gerçekleştirilen analiz raporu çizelge 4.6'da ve elde edilen grafikler şekil 4.5'de verilmektedir.

Çizelge 4.6 : Gage R&R Minitab programı test sonuçları.

	Study Var	%Study Var	
Source	**StdDev (SD)**	**(6 * SD)**	**(%SV)**
Total Gage R&R	43.978	263.87	10.27
Repetability	43.978	263.87	10.27
Part-to-Part	426.054	2556.32	99.47
Total Variation	428.317	2569.90	100.00



Şekil 4.5 : Anova yöntemi ile deneysel tasarım sonuç grafikleri.



Şekil 4.6 : Ö.S.A. aşınma testleri sinter disk ağırlık kayıpları.

İlk testler doğrultusunda çıkan önemli sonuçlar özetlenmiştir. Sürtünme katsayısı zaman grafiğinde, ilk temas sırasında malzemeler arası başlangıç sürtünme katsayısının düşük olduğu görülür. Metal-metal sürtünmesinin başlangıçtan 15dk. sonra gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Sürtünecek yüzeyler arasında bulunan tabaka bir çok nedene bağlı olarak malzemeler arası sürtünme katsayısını değiştirmektedir.

Bu düşük aşınma potansiyelinin nedeni, yapılan tüm temizleme işlemlerine rağmen; yüzeydeki gözenekli yapıdan kaynaklanan ve temizlenmesi çok zor olan yağ parçacıkları, tozlar ve küçük abrazif partiküllerdir. İlk temas 100Cr6 ile bu tabakalar arasında meydana gelmektedir. Yüzey temizliliği, yük taşıma kapasitesi, hız, elastik modül, ağırlıklara bağlı olarak değişen bu süre en aza indirilmelidir. Böylece ağırlık kayıpları analizlerinden daha doğru sonuçlar alınabilir..

Tabaka-metal sürtünmesi bir süre sonra yerini metal-metal temasına bırakır. Bu temas sırasında yüzeyin yapısı ilk sürtünmeye başlayan pürüzlülükler sonucu değişir. Malzemeler arasında çıkıntı deformasyonları sonucu oluşan çatlaklar; gerçek temas bölgelerinden malzeme kopması ve düz yüzeyler oluşana kadar devam eder. Metal-metal sürtünme katsayısı 0.87'e çıkıp sabit rejim (steady-state) ile devam etmiştir. Sabit rejim sürtünme katsayısı test sonuna kadar devam etmiştir

Metal–metal temaslarda; atomlar arası etkileşimler (yapışma aşınması), deformasyon sonucu soğuk sertleşme, abrazif aşınma, kopan partiküllerin batması, süpürme, oksitlenmeler, katmanlaşma gibi aşamalar görülmüştür.

4.4 Yatak Malzemelerinin Hava Ortamında Gerçekleştirilen Tribometre Testleri

Kompresörlerde kullanılan 100Cr6 pim malzemesi ve sinterlerlenmiş demir alaşım malzemelerinin; yağsız ve sınır yağlı ortamlardaki aşınma davranışlarının incelenmesi amacıyla tribometre testleri yapılmıştır.

4.4.1 Test prosedürü

Disk üstünde pim testlerine alınan pim malzemesi 100Cr6 çelik, disk malzemesi ise buhar işlemsiz ve buhar işlemli sinterlenmiş çelik malzemelerdir. Malzemeler testlere alınmadan önce 15 dakika aseton, ardından 15 dakika etil alkol çözeltisinde ultrasonik temizleme işlemi ile temizlenmiştir.

Ortam nemi %50 olup, oda sıcaklığında (23 ^{0}C) testler uygulanmıştır. Kullanılan yükler 40 N ve 50 N'dur. Kayma hızı 0.262 m/s olarak sabitlenmiştir.

7.89mm çaplı, 5mm boyutlarındaki silindirik 100Cr6 malzemesine karbürizasyon ısıl işlemi uygulanmış olup sertliği 1250 HV 'dir.

Sinter malzeme ise 5-100μm boyutlarında toz tanelerinin 475 MPa basınçta basılması, ardından N_2+H_2 atmosferinde 1120 ^{0}C'de 25 - 30 dakika sinterlenmesiyle üretilmiştir. Oda sıcaklığından soğutulan malzemelerin sertlikleri 85 HRF ölçülmüştür. Sinter malzeme 6.4 gr./cm^3 , buhar işlemli 6.7 gr./cm^3 yoğunluğa sahiptir.

Sınır yağlı testler için viskozitesi 40^{o}C'de 7cSt olan mineral yağ kullanılmıştır. Yağ püskürtme haznesine doldurulan bu kompresör yağı hava karışımı başlangıçta yüzeye 1 saniye püskürtülmüştür. 30 psi, 2 bar basınçta püskürtülen yağın ağırlığı 0.10 gr. (100 mg.) ölçülmüştür. Ölçümün doğru sonuç verdiğini görmek için 12 tekrar yapılmıştır.

Yağlı testler için ağırlık 50 N 'a çıkartılmıştır. Yüzey hızı 0.8 $m.s^{-1}$ seçilmiştir. Her bir test için yeni bir pin ve disk malzemesi kullanılmıştır. Testlerde tek operatör kullanılarak değişken sayıları azaltılmış, aynı uygulamalar her bir test için tekrarlarlanmıştır.

Çizelge 4.7 : Disk üstünde pim aşınma testi sabitleri.

Malzeme 1 (Altlık)	Malzeme 2 (Pim)	Test Sabitleri	Şartlar
Fe alaşım sinter	100Cr6	Ortam sıcaklığı: 23^0C Yük : 40 N – 50 N	Yağsız
6.4 - 6.7 gr./cm^3	7.8 gr./cm^3	Nem : 60- 70%	(0.10gr. We 7125 ~40^oC 7cSt)

Malzemelerdeki aşınma oranları ;

$$W = (M_1 - M_2) / L.\ \rho\ .\ D \quad (mm^3 / N.\ m) \qquad \textbf{(4.3)}$$

formülü ile bulunmuştur. Burada M_1 (gr.) temizleme kurutma sonrası malzemenin ilk ağırlığı, M_2 (gr.) test sonundaki ağırlık, L (N) yük , ρ (gr./mm^3) malzemenin yoğunluğu, D ise mesafe (m)' dir.

4.4.2 Sonuçlar

Malzemelerdeki 5 ve 6 saatlik ağırlık kayıpları karşılaştırmaları çizelge 4.8' de gösterilmiştir. Aşınma oranlarının saptanması, ve ağırlık değişimi etkisinin belirlenmesi için yağsız ortamda 40N ve 50N ağırlıklar denenmiş, 0.26 m/s hız yarıçapa göre sabit tutulmuştur.

Sinter malzemedeki optik mikroskop aşınma izi görüntülerinde oyuklar, çatlaklar, aşınma (debris) partikülleri, yapışmalar, katmanlaşmalar görülmüştür. Sinter malzeme için, test edilen yarıçap düşürülerek aynı sürede gidilen mesafe aynı alınabilmesi için makine hızı arttırılmıştır (teğetsel hız sabit). En iç yarıçaptaki (9.5 mm) testte bir noktadan geçen pim temas sayısı artmıştır. Dolayısı ile aşınma bölgesinin soğumasına izin vermeden sürekli bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Bu sıcaklık artışı sonucu temas bölgesinde demiroksit oluşumu gözlemlenmiştir. Sinter malzemedeki bu değişim oksitlenme sonucu ağırlık kaybının azalması şeklinde neticelenirken, pim malzemesindeki ağırlık kayıpları makine hızına göre değişmemiştir. Pim malzemesi optik mikroskop görüntülerinde yüzeye yapışmış parçalar görülmüştür.

Buhar işlemli malzemelerdeki ağırlık kayıpları, buhar işlemsiz sinterlenmiş çelik malzemeye göre 6 kat düşmüştür. Bunun nedeni, buhar işlemli çelik malzemenin

yüzeyindeki magnetit (Fe_3O_4) tabakasının sertliği arttırması, gözenekleri kapatarak mekanik özellikleri iyileştirmesidir. Ayrıca, kapanan gözenekler sonrası pürüzlülüklere binen temas basıncı düşmüştür [40]. Aşınma izlerinin optik mikroskop görüntülerinde yüzeylerin daha düzgün ve parlak olarak aşınmış oldukları görülmüştür.

Pim malzemelerin buhar işlemliye karşı olan ağırlık kayıpları 0.7-0.8 mg. arasındadır. Buhar işlemsiz çeliğe karşı ise bu sayı 0.8–1.0 mg. arasındadır. Gözenekli yapıya sahip olan buhar işlemsiz çelik malzemedeki ağırlık kaybının fazla olması, malzemelerden kopan ve soğuk sertleşen partiküllerin boşluklara dolarak yapışma ve abrazif aşınma yaratması sonucu olmuştur.

Buhar işlemli sinter malzemede yük artışı sonrası aşınma oranı, sinter malzemeye kıyasla daha az artmıştır. Pim malzemesindeki ağırlık kayıpları ise %10 oranında artmıştır.

Aşağıdaki çizelge 4.8 'de buhar işlemsiz sinter çelik malzeme için 0.26 m/s gerçek hız, 4716 m (5 saat), 5660 metre (6 saat) 40N yük ve yağsız yapılmış test sonuçları gösterilmiştir.

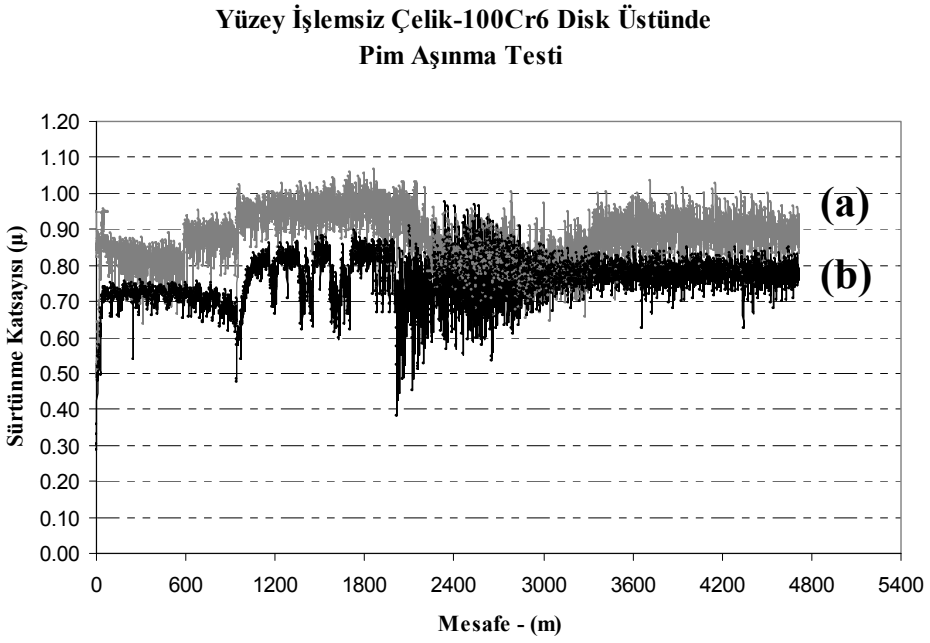
Çizelge 4.8 : Buhar işlemsiz çelik malzemesinin 40 N yükte gerçekleştirilen, yağsız hava ortamı tribometre test sonuçları. (0.262 $m.s^{-1}$, 23 ^0C)

Test No	Süre (s.)	Yarıçap (mm)	Hız (dev/dak)	Ağırlık Kaybı (mg.)	Aşınma Oranı * 10^{-4} ($mm^3 .N^{-1}.m^{-1}$)
8	6	10.37	241.0	686.9	4.70
9	6	4.00	625.0	586.5	4.55
10	6	18.00	139.0	1067.5	7.36
11	6	12.15	206.0	780.0	5.38
12	6	4.00	625.0	667.0	4.60
13	6	18.00	139.0	1082.5	7.56
14	6	12.15	206.0	1160.1	8.04
16	5	21.90	114.3	872.0	7.22
17	5	15.70	159.4	839.6	6.95
18	5	9.20	272.0	549.0	4.54
19	5	21.90	114.3	931.9	7.71
20	5	21.90	114.3	859.8	7.12
21	5	21.90	114.3	870.8	7.21
22	5	15.70	159.4	750.2	6.21
23	5	9.50	263.5	397.5	3.30
24	5	12.00	208.6	579.0	4.80
25	6	15.70	159.4	962.2	6.64
26	6	21.90	114.3	1022.6	7.05
27	6	9.50	263.5	861.4	5.94
28	6	9.50	263.5	870.2	6.00

Buhar işlemsiz sinter Fe-2.44Cu-0.54Mn–0.28S–0.21Si-0.3C çelik malzemede, yarıçapın 12 mm, hızın 208.6 dev/dak. 'daki ağırlık kayıplarının azalmaya başladığı görülmektedir.

Bu hızlarda oluşan oksit tabakası ($t<200^0C$ Fe_2O_3, $t>200^0C$ Fe_3O_4, $t>570^0C$ FeO) sürtünme katsayısını azaltarak; koruyucu, yağlayıcı tabaka gibi davranmış ve ağırlık kayıplarını düşürmüştür (şekil 4.8). Daha yüksek hızlarda sürünme katsayısı yüksek seviyede (>0.70) seyretmiştir. Aşınma yüzeyinin kritik oksidasyon sıcaklığının üstündeki değerlere yükselmesi yeni oksitlerin oluşmasına neden olmuştur.

Benzer sonuçlar 6 saatlik testler içinde görülmektedir. Bu testlerde ise minumum yarıçap 4 mm (625 dev/dak) alınmış olup, ağırlık kayıpları en dış yarıçapa göre (114.3 dev/dak) 50% oranında azalmıştır. Hız değişim ile birlikte oluşan oksit tabakasının kırılma, ve tekrar oluşma hızı makine dönme hızına bağlı olarak değişmiştir.



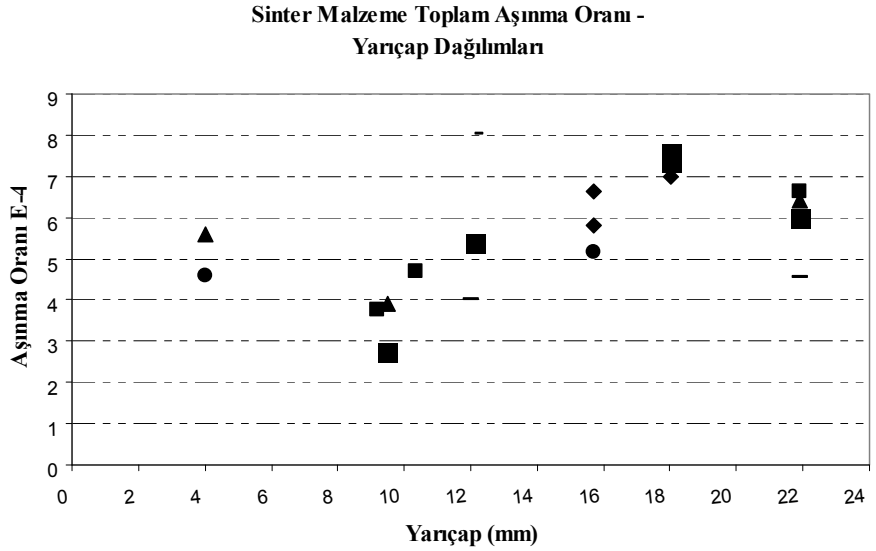
Şekil 4.7 : B. işlemsiz çelik-100Cr6 malzemesi sürtünme katsayısı (µ) – mesafe (m.) grafiği.(H.O.) **(a)** Yarıçap: 21.90 mm , Gerçek hız: 114.3 dev/dak
(b) Yarıçap: 9.5 mm, Gerçek hız: 263.5 dev/dak (0.26 m/s)

Şekil 4.7'de sürtünme katsayısı–mesafe(m.) grafiklerindeki sürtünme katsayısı değerinin ortalama 0.2 değerinde düşmesi, oksit tabakasının yüzeyde yağlayıcı bir etki yaratması sonucu meydana gelmiştir. Oksidin kırılıp tekrar oluşması süresince bu katsayı sürekli değişim göstermektedir.

Buhar işlemsiz çelik disk malzemesinden büyük boyutta ve fazla oranda kopan aşınma partiküllerinin nedeni gözenekli yapıdan kaynaklanmaktadır. Gözenekli yapı aşınma dayanımını azaltmıştır. Boşluklara dolan partikül batmaları ve yapışma

aşınması malzemenin aşınma oranını arttırmıştır. Shatsov[38], yüksek gözenekli yapılarda yorulma çatlaklarının daha kolay oluşmasının, üretim sırasında impürite atomlarının tane sınırlarından gözenek sınırlarına yığılması sonucu olduğunu belirtmiştir.

Düşük hızlarda (114.3 dev/dak) partiküller aşınma izi bölgesinde üç elemanlı abrazif aşınma yapmışlardır. Ayrıca bu partiküller süpürme ile mikro-çizikler oluşturdukları için yüzey aşınma izi daha kaba görünür.

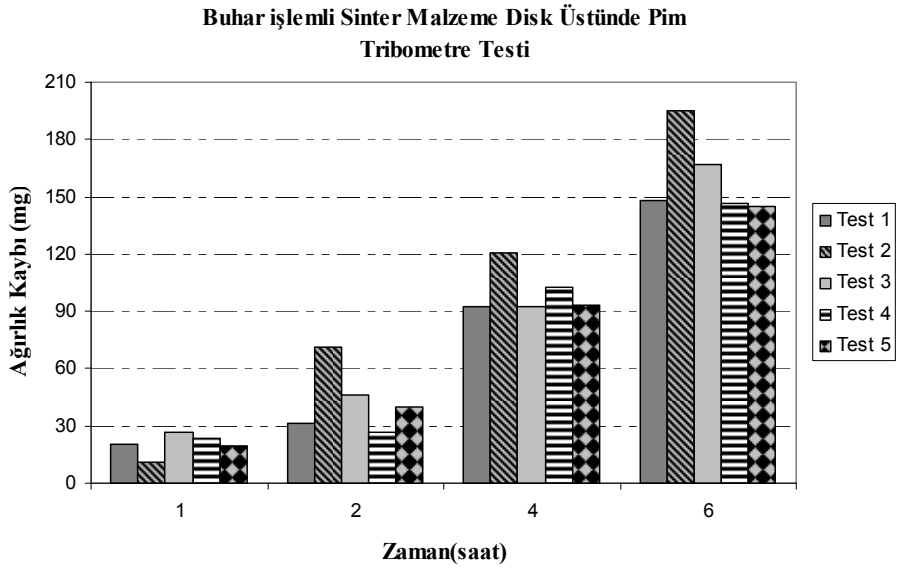


Şekil 4.8 : İşlemsiz sinter malzeme için toplam aşınma oranı x 10^{-4} (mm^3/N.m) – yarıçap(mm) grafiği.

Yarıçapın toplam gidilen mesafe sonundaki aşınma oranı grafiklerinden de anlaşılacağı gibi en yüksek aşınma oranı yarıçapın 18-21.90 mm aralığında elde edilmiştir. En iç yüzeye yaklaştıkça (r: 4mm) aşınma oranları yaklaşık %50 oranında düşmüştür.

Buhar işlemli sinter malzeme

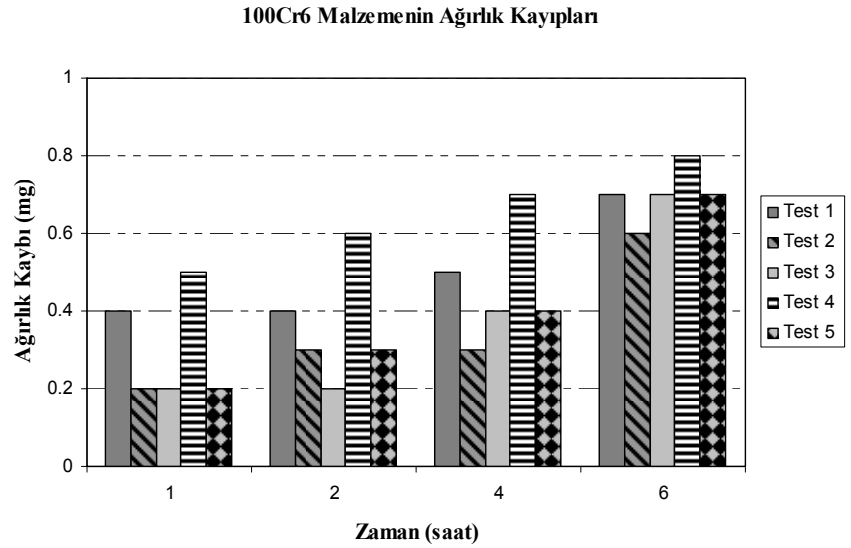
Şekil 4.9. 'da buhar işlemli malzemeler için yapılan yağsız hava ortamı disk üstünde pim test sonuçları gösterilmiştir. Testte uygulanan yük 40 N, hız 0.262 m/s , 23 ^{0}C sıcaklık , 50-60% nem şartlarında gerçekleştirilmiştir.



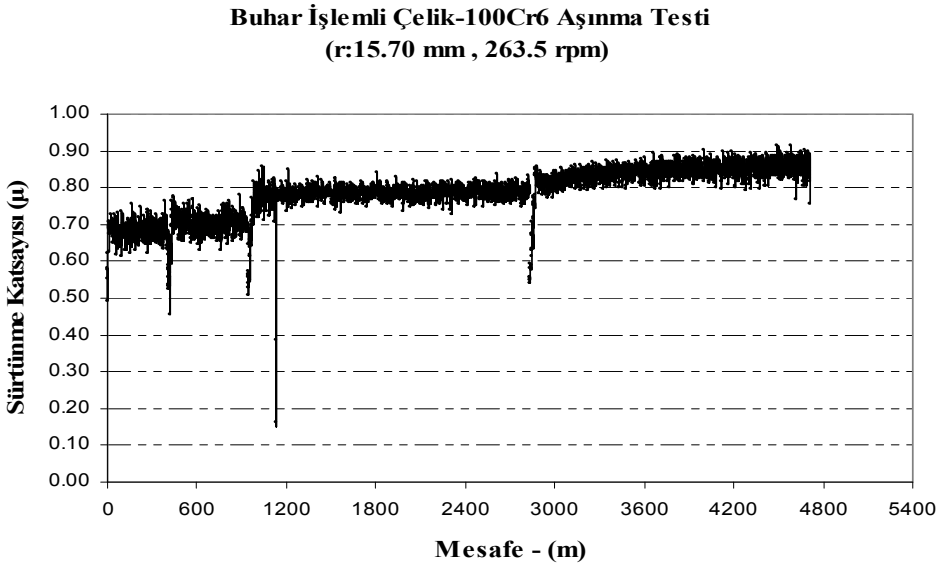
Şekil 4.9 : Buhar işlemli çelik malzemenin ağırlık kaybı (mg.)–zaman(saat) grafiği. (HO, Yağsız Testler, Nem %60)

Grafiksel olarak şekil 4.9' da buhar işlemli malzemelerin ağırlık kayıplarının zamana göre dağılımları gösterilmiştir. Buhar işlemsiz sinter çelik malzemeye göre ağırlık kayıpları çok daha az değişim göstermiştir. Yarıçapın değişimi ve dönme hızının artması yüzeydeki sert oksit tabakanın dayanımını etkilememiştir. 6 kat düşen ağırlık kayıpları ile buhar işlemli sinter malzemelerin kullanımının yağsız ortamlarda daha iyi sonuçlar vereceğini göstermektedir.

Malzemelerden kopan aşınma partiküllerinin fazla olması sürtünme katsayısını arttırır. Kopan ve aşınma yolunda biriken partiküllerin soğuk sertleşme ile karşı malzemenin daha fazla aşınmasına neden olmaktadır. Yüzeyin bu partiküllerle dolması kalıcı sürtünme katsayısının sabit bir değer alamamasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 4.10 : 100Cr6 çelik malzemesinin (b.i.sinter'e karşı) ağırlık kayıpları grafiği.

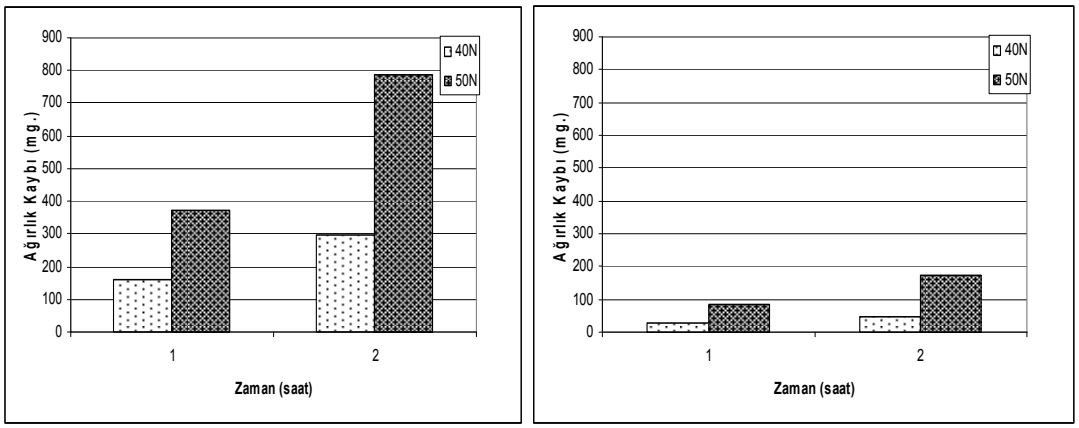


Şekil 4.11: Buhar işlemli sinter Fe-2.44Cu-0.54Mn–0.28S–0.21Si-0.3C malzemesi sürtünme katsayısı (μ) – zaman (saat) grafiği

İkinci saatten sonra 0.70' den 0.85 'e artan katsayının bu değişimi, aşınmanın devam etmesiyle birlikte yüzey altı sert oksit tabakasının 100Cr6 ile teması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Buhar işlemi sırasında oksijene afinitesi demirden fazla olan empürite atomlar oksit tabakaları oluşturup gözenekleri ilk dolduran oldukları için, yüzeyden aşağılara inildikçe sürtünme davranışı değişmektedir.

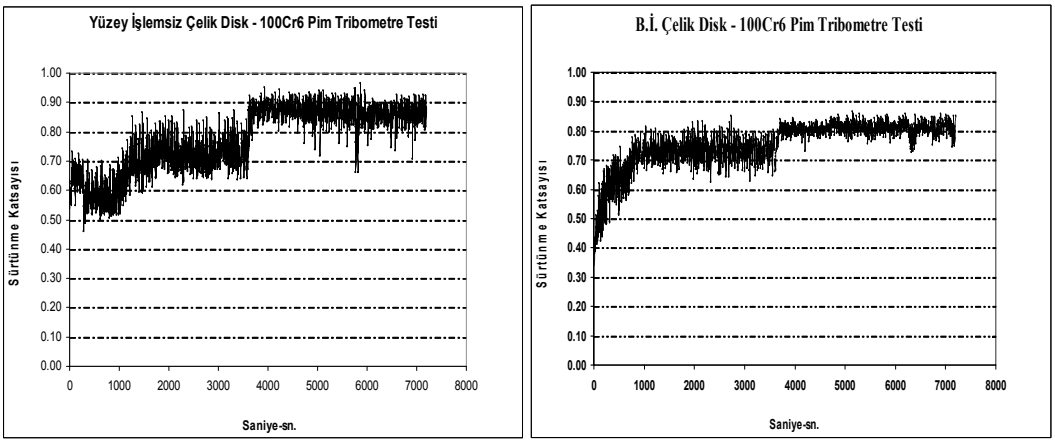
4.4.3 Uygulanan yükün arttırılması

Uygulanan yükün artması ile birlikte aşınma davranışının ve aşınma oranlarının ne yönde değişeceğini incelemek amacıyla hava ortamında buhar işlemli ve buhar işlemsiz sinter (Fe-2.44Cu-0.54Mn–0.28S–0.21Si-0.3C) malzemeye 50N yükle disk üstünde pim (pin-on-disk) testleri uygulanmıştır. Ağırlık kayıpları(mg.)-zaman(sn.) karşılaştırmaları yapılmıştır.



(a) **(b)**

Şekil 4.12: **(a)** B.işlemsiz sinter malzeme**, (b)** buhar işlemli sinter malzemenin aşınma testi sonucunda meydana gelen ağırlık kayıpları karşılaştırmaları (0.26 m/s hız, o.sıcaklığı 23^0C, yükler 40N ve 50 N).



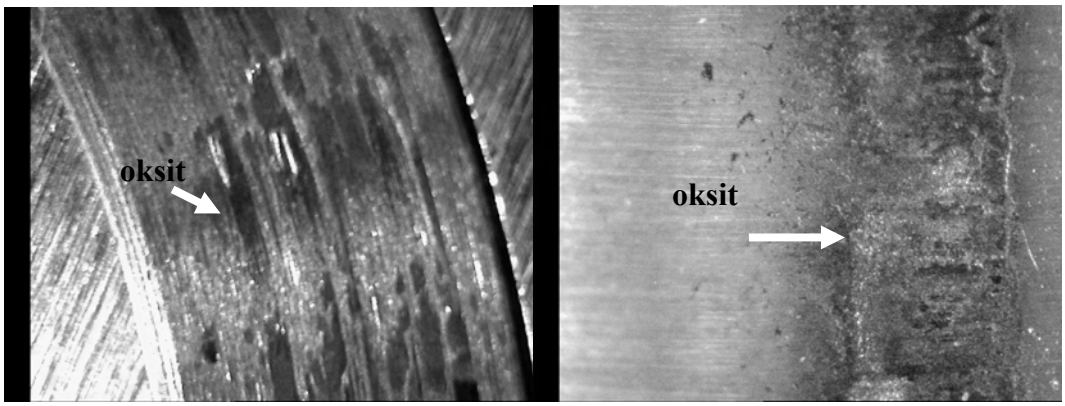
(a) **(b)**

Şekil 4.13 : **(a)** Buhar işlemsiz sinter malzeme **(b)** b.i. sinter malzemenin sürtünme katsayısı zaman (sn.) grafikleri.

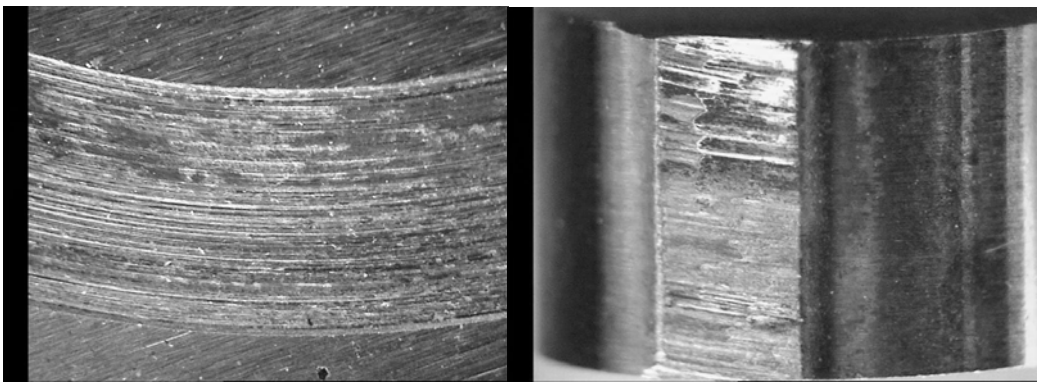
Yükün 10 N artması ile birlikte malzemelerin aşınma oranları artmıştır. Yükün artması buhar işlemsiz sinter malzemenin ağırlık kayıplarını 2.5 kat artırırken, buhar işlemli numunenin ağırlık kayıplarını 3 kat oranında arttırmıştır.

Şekil 4.14.‘de buhar işlemli ve 100Cr6 pim malzemelerinin optik mikroskop görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 4.15 ‘de ise buhar işlemsiz çelik malzemenin ve 100Cr6 pim malzemesinin yüzey görüntüleri gösterilmiştir. Buhar işlemsiz malzemedeki yüzeyin pürüzlü görüntüsü, kuru ortamda yüksek hızlarda 100Cr6 ‘a karşı meydana gelen titreşim ve salınım hareketlerinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Buhar işlemli çelik malzemede ise daha düzgün yüzey ve daha düşük titreşim görülmüştür.

Bir kompresör sisteminde titreşim ve sesin fazla olması istenmeyen bir özelliktir ve tüm sisteme özellikle piston ve yatak arasındaki tolere edilebilir açıya zarar verebilir. Bunun sonucunda tüm sistemin işleyişini etkileyen bir hasar mekanizması meydana gelir. Dolayısı ile yağsız ortamda kullanılan buhar işlemsiz sinter malzemenin, buhar işlemliye göre daha kritik aşınma problemleri doğurabileceği ortaya çıkmaktadır.

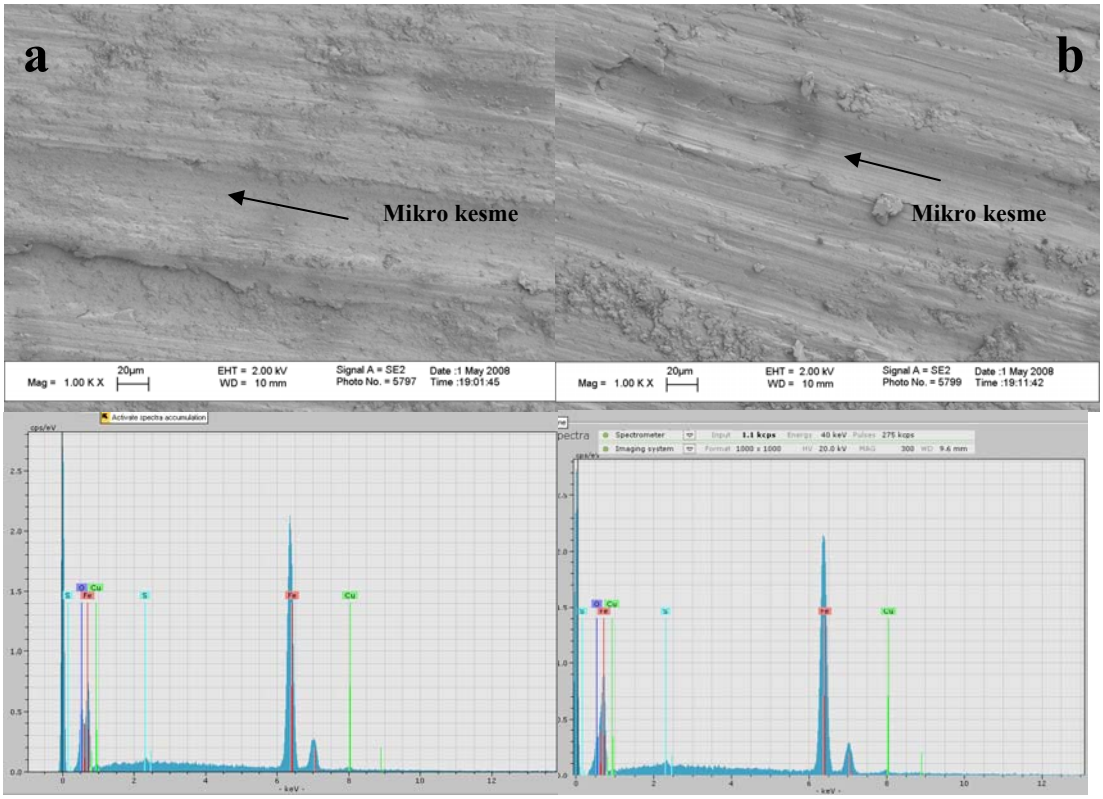


Şekil 4.14 : Buhar işlemli sinter çelik malzeme ve 100Cr6 çelik pim malzemesinin optik mikroskop altında aşınmaki izi görüntüleri (büyütme x1).



Şekil 4.15 : Buhar işlemsiz sinter çelik malzeme ve 100Cr6 çelik pim malzemesinin optik mikroskop altındaki aşınma izi görüntüleri (büyütme x1).

Buhar işlemsiz sinter malzemenin aşınma izi bölgesindeki oksidasyon şekil 4.15'de görülmektedir. Bu oksidasyon sonucu malzemenin aşınma dayanımı yükselmiştir. Sürtünme katsayısı düşerken, ağırlık kayıpları da düşmüştür. Pim malzemesinde ise karşı malzemeden yapışan oksit parçaları (koyu bölgeler) görülmektedir.



Şekil 4.16: Buhar işlemli, b. işlemsiz sinter çelik malzemenin tarama elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri (a) buhar işlemli (b)buhar işlemsiz sinter çelik malzemedir.

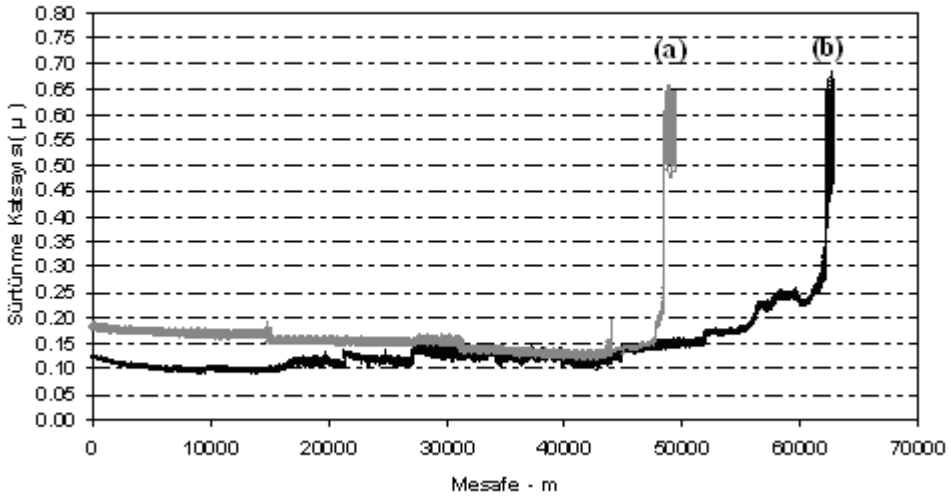
Test edilmiş malzeme yüzeylerinin SEM görüntülerinde (şekil 4.16) buhar işlemsiz numunenin mikro-kesme ile daha fazla oyuklar açılarak aşındığı görülür.

EDS spekrometre analizlerinde, buhar işlemsiz sinter malzemede görülen oksit tabaka, yüksek hızda yüksek sürtünme ısınmasından (flash sıcaklık) kaynaklanan demir oksit Fe_3O_4 ve Fe_2O_3 tabakasıdır (Şekil 4.16). Bu tabakanın kırılıp tekrar oluşması testin her aşamasında görülmüştür. Sabit rejim sürtünme katsayısının (steady state) aniden değişmesi ve bazı durumlarda aşınma izinin kızıla yakın renk alması oksidin oluştuğunu kanıtlamaktadır.

4.4.4 Sınır yağlı, hava ortamı tribometre test sonuçları

Sınır yağlama şartlarında gerçekleştirilen testler için viskozitesi 40^{o}C 'de 7cSt olan mineral yağ kullanılmıştır. Kompresör yağı test başlangıcında sadece bir kez

püskürtülmüştür. Yağ, 0.1gr. ağırlıkta malzeme yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturmuştur. Hız 0.8 m/s'e arttırılmıştır. Test sonunda ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Malzemelerin optik mikroskop görüntüleri aşınma yüzeyini incelemek amacıyla alınmıştır.

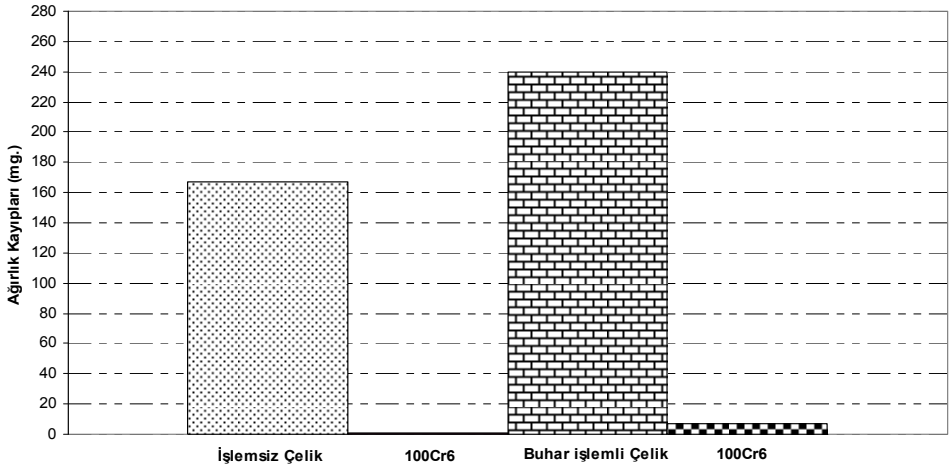


Şekil 4.17 : **(a)** Buhar işlemli sinter malzeme , **(b)** buhar işlemsiz sinter malzemenin sınır yağlı test sonucundaki sürtünme katsayısı – mesafe (m.) grafikleri (0.8 m/s ,50N, 350dev/dak, H.O.).

Sınır yağlı ve hava ortamında mevcut yatak malzemelerinin aşınma testleri sonuçları Şekil 4.17 'de verilmektedir. Bu testlerin sonunda işlemsiz sinter malzemenin aşınma ve sürtünme katsayısının yaklaşık 22 saat dengeli kaldığı ve daha sonra ani artış göstermeye başladığı görülür. Buhar işlemli malzemede ise bu süre 17 saattir.

Dengeli aşınma ve sürtünme davranışının gözlemlendiği dayanım mesafeleri işlemsiz sinter malzeme için 61804 metre, buhar işlemli sinter için ise 48447 metre olarak ölçülmüştür.

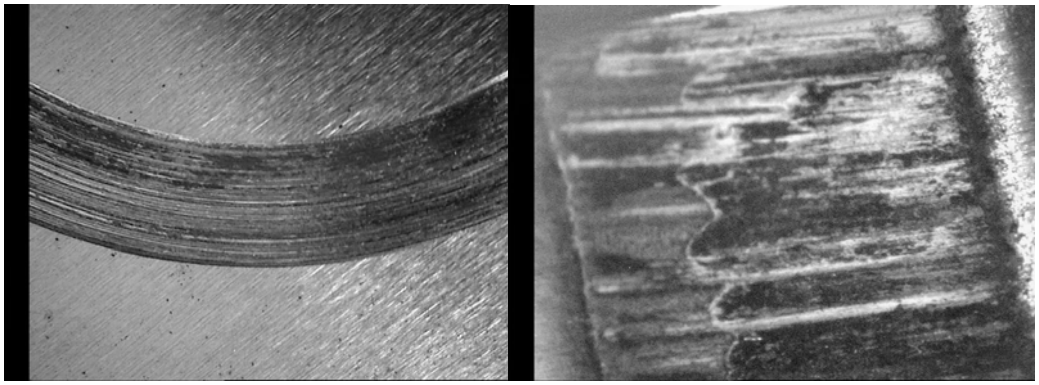
Sinter malzemenin sınır yağlı testlerinde üstün performans göstermesinin nedeni, yüksek gözenekli yapıya sahip olmasıdır. Sinter malzemenin gözenekli yapısından dolayı, yağ tutma kapasitesini artmış ve bu nedenle sürtünme katsayısı, buhar işlemli mazlemelere göre daha uzun süre yağ beslemesi olmadan dengeli kalabilmiştir.



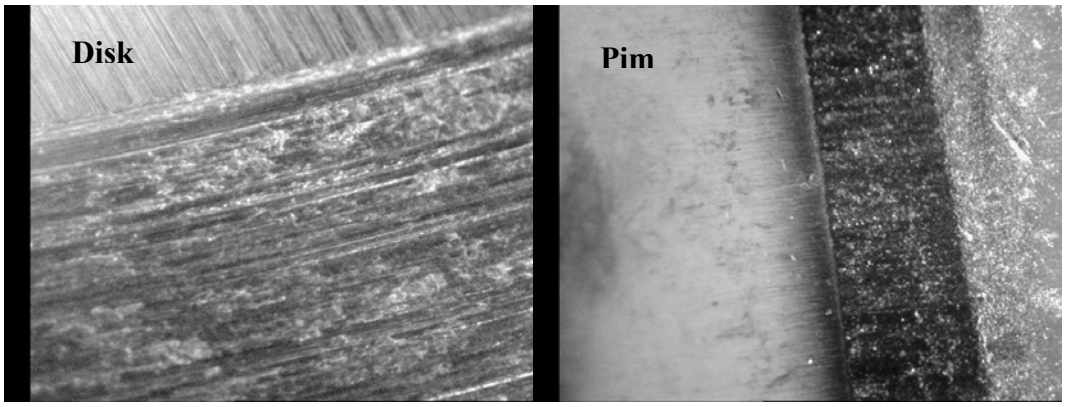
Şekil 4.18: Buhar işlemli ve b. işlemsiz sinter çelik malzemenin 50N yük, 0.8 m/s hızda yapılan sınır yağlı test sonucu ağırlık kayıpları karşılaştırmaları.

Ağırlık kayıpları grafikleri karşılaştırıldığında (şekil 4.18.), aşınmaya başladıktan sonra gidilen mesafenin (~1100m.) aynı tutulmasına rağmen buhar işlemsiz sinterin gözeneklerinden yüzey altına sızan yağ, ağırlık kayıplarının da azalmasına neden olmuştur. 100Cr6 'daki ağırlık kayıpları buhar işlemli malzemeye karşı olan testte daha fazladır.

Optik mikroskop görüntülerinde kopan partiküllerin süpürülmesinden kaynaklanan ve yüzeyde oyuklar açmasına neden olan aşınma izi görüntüsü görülmektedir (şekil 4.19., koyu bölgeler).



Şekil 4.19: Buhar işlemli sinterlenmiş çelik disk -100Cr6 malzemelerinin yağlı testi sonucundaki aşınma izi görüntüleri (büyütme x0.65 - x0.75).



Şekil 4.20: Buhar işlemsiz sinterlenmiş çelik disk -100Cr6 pim malzemenin yağlı test sonundaki aşınma izi görüntüleri (büyütme 1x).

Sınır yağlı testlerde buhar işlemli sinter malzemenin temas bölgesinde, pim malzemesinden transfer olup yapışan parçalar görülmektedir. Çift taraflı sert mikro-abrazif partikül aşındırması sonucu, buhar işlemliye karşı olan pim malzemesinde ağırlık kayıpları 3 mg. daha yüksektir.

Buhar işlemsiz sinter malzemenin 100Cr6'a karşı olan testin aşınma izi optik mikroskop görüntülerinde (şekil 4.20.); 100Cr6 yüzeyine yapışan debrisler, disk malzemesinde ise kopan partiküllerin yüzeye yığılması görülmüştür.

4.5 İsobütan (R600a) Ortamında Gerçekleştirilen Tribometre Testleri

Hermetik kompresörlerde kullanılan yeni, doğal ve çevreye zararı minumuma indirmiş doğal soğutucu gaz olan isobutanın, kompresörlerdeki aşınma problemini arttırdığı bilinmektedir. Bu ortamdaki aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için sınır yağlama şartları altında çalışan 100Cr6 pim ve pim yatağı Fe esaslı sinter malzemenin aşınma testleri yapılmıştır.

R600a gazının kimyasal formülü $CH(CH_3)_3$, kaynama sıcaklığı -11,7 ^{0}C, özgül ağırlığı 0.56 Kg/dm^3 (20^{0}C) 'dir. HC gazı tek başına kullanıldığında HFC, CFC gazlarına nazaran daha yüksek sürtünme katsayıları verdiği bilinmektedir. Bunun nedeni içersinde atmosferik zararı yüksek olan klor ve flor iyonlarının bulunmamasıdır. HC gazlarında klor iyonlarının bulunmaması, alternatif kaplama yöntemleri ile koruma yollarına gidilmesini gerektirmiştir.

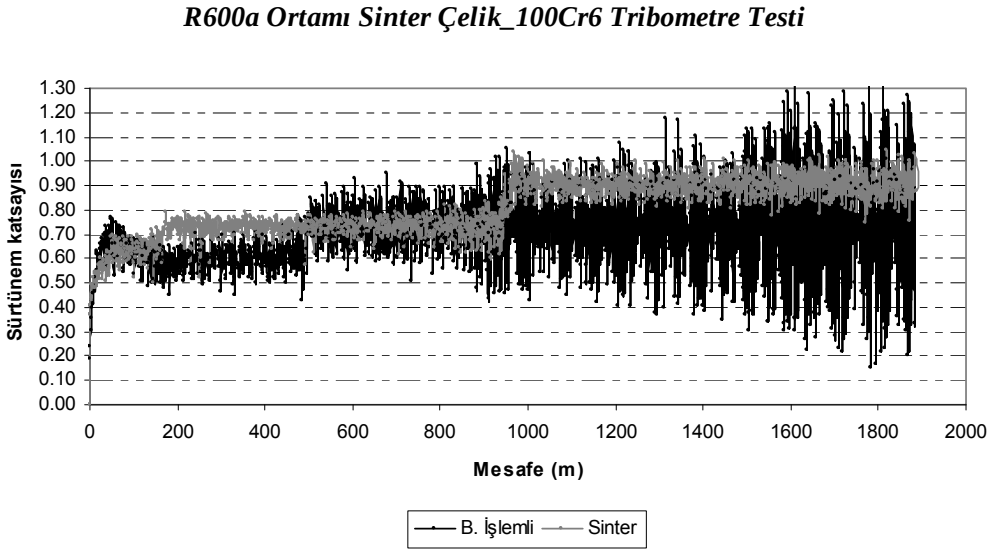
İki metalin yüzeylerinin çok iyi temizlenerek vakum ortamında birbirlerine temas etmesi sonucu yüksek yapışmanın meydana geleceği ve neticesinde yüksek aşınma katsayısı vereceği bilinmektedir [11]. Ortamın değiştirilmesi yüzeyin hemen altında emilen gazın değişmesine neden olur. Bu durum sürtünme mekanizmalarını tamamen değiştirmektedir. Yüzeyleri tamamen temizlenmiş iki metalin R600a (isobütan) ortamında nasıl tepki vereceği literatürde henüz çalışılmamış bir konudur.

4.5.1 Yatak malzemelerinin R600a ortamındaki yağsız tribometre testleri

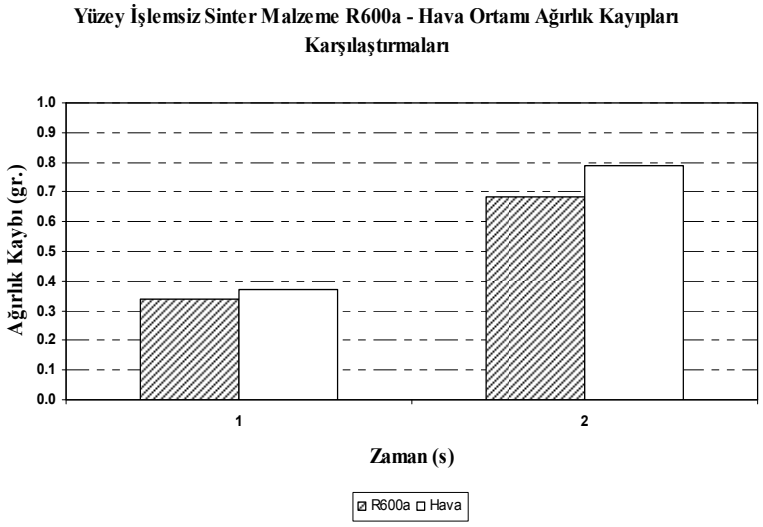
Mevcut yatak malzemelerine R600a (isobütan) soğutma gazı ortamında, yağsız, disk üstünde pim aşınma testleri yapılmıştır.

Testlerde yük 50N, gerçek hız ise 0,26 m/s seçilmiştir. Tüm testler en dış yüzeylerde (21,90mm)'de gerçekleştirilmiştir. PVC kafes içersindeki hava, kompresör ile tamamen boşaltıldıktan sonra teste başlanmıştır. Temas basıncı hava ortamındaki testler ile aynıdır (P.V.= 2.6 $MPa.m^{-1}.s^{-1}$).

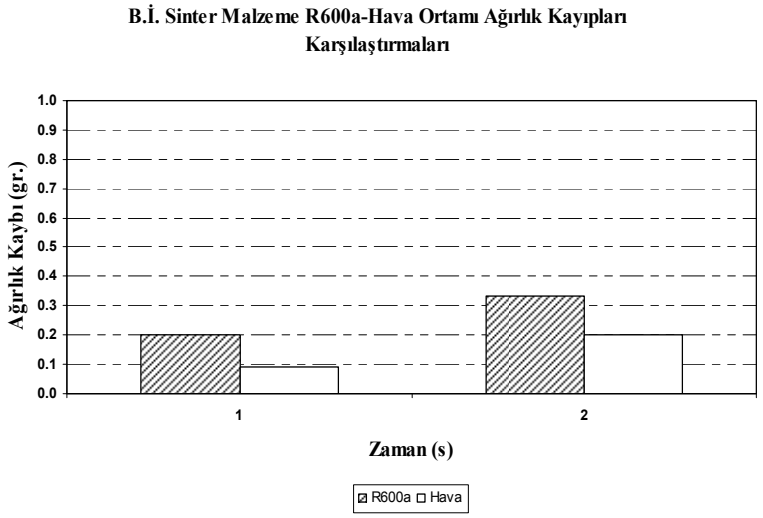
Nanovea tribomotre cihazı birer saat aralıklarla testi otomatik durdurmuştur. Toplam gidilen mesafe 1886 metre , toplam süre 2 saattir. Hem buhar işlemsiz sinter, hem de yüzey buhar işlemli sinter malzeme ile gerçekleştirilen testlerde sürtünme katsayısının hava ortamına göre 0.1 değerinde düştüğü görülmüştür (şekil 4.21). Ancak buhar işlemli numunedeki sürtünme katsayısı değeri kararsızdır.



Şekil 4.21 : Buhar işlemsiz ve b. işlemli sinter çelik -100Cr6 malzemenin R600a ortamındaki sürtünme katsayısı (μ) -mesafe (m) grafikleri.



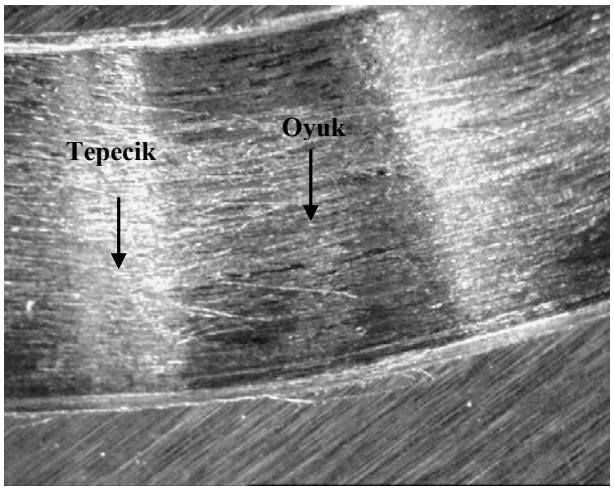
Şekil 4.22 : Buhar işlemsiz sinter çelik malzemenin, R600a ve hava ortamı ağırlık kaybı (gr.)-zaman (saat) grafikleri karşılaştırmaları.



Şekil 4.23 : Buhar işlemli sinter malzemenin, R600a ve hava ortamı ağırlık kaybı (gr.)-zaman (s.) grafikleri karşılaştırmaları.

Şekil 4.22. ve şekil 4.23. grafiklerinde, R600a ve hava ortamındaki ağırlık kayıpları karşılaştırılmıştır. Bu testler sonucunda R600a ortamının buhar işlemli sinter malzemenin ağırlık kayıplarını arttırdığı, bunun yanında sinter malzemenin ağırlık kayıplarını düşürdüğü anlaşılmaktadır.

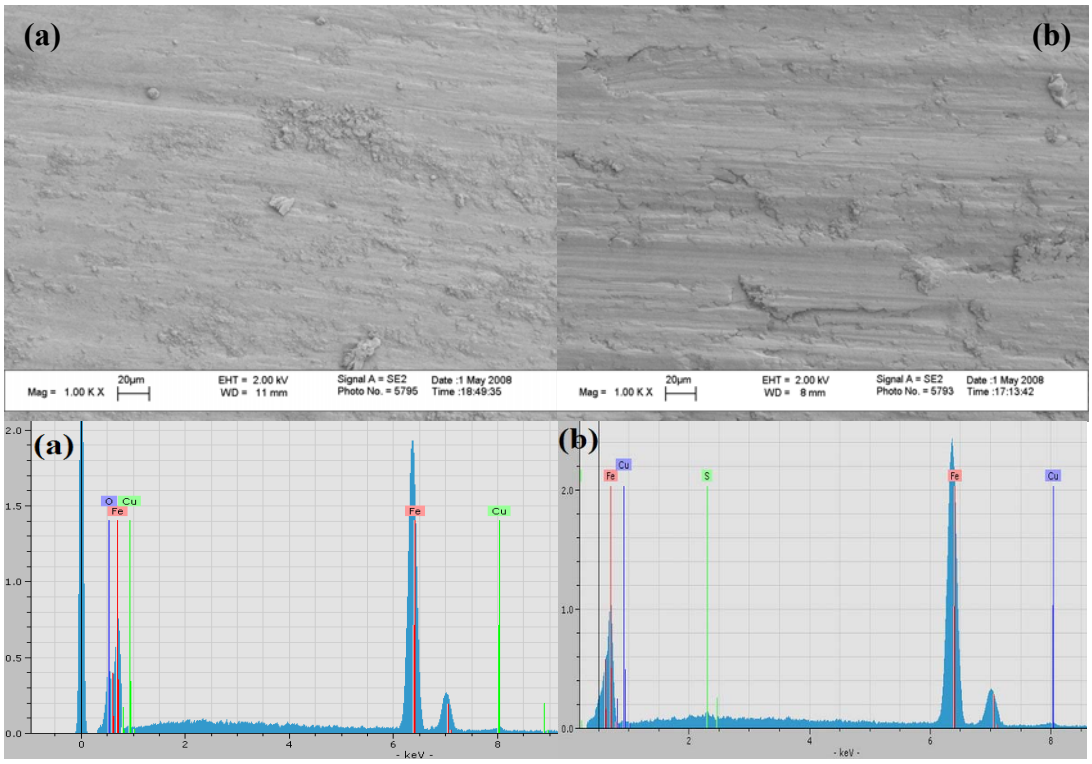
Bunun nedeni ise şekil 4.21'de gösterilmiş olan sürtünme katsayısı grafiği ile anlaşılmaktadır. Buhar işlemli sinter-100Cr6 testinde, birinci saatten itibaren sürtünme katsayısının kararsız ve değişken hale geldiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni buhar işlemli malzemedeki yapışma aşınmasının, R600a ortamında daha fazla olmasıdır. Dolayısı ile ağırlık kayıpları R600a ortamında artmıştır.



Şekil 4.24 : Buhar işlemli numunenin aşınma izinin optik mikroskop altında görüntüsü ortam R600a (x1 büyütme).

Kararsız hal sürtünme katsayısı malzemede kaba yüzeylerin oluşmasına neden olmuştur. Aşınma partikülleri R600a ortamında daha büyük boyutlardadır. R600a ortamında buhar işlemli sinter çeliğin aşınma izi bölgesine yığılan partiküllerin birikmesi ve yapışma aşınması etkisinin yüksek olması, sürtünme katsayısının dengeli rejim (steady state) almasını engellemiştir.

Buhar işlemsiz sinter malzemenin R600a soğutucu gaz ortamındaki ağırlık kayıpları, hava ortamı testlerine göre daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni, gazın düşük de olsa yüzeylerde yağlayıcı etki yaratmasıdır. Hava ortamındaki altı saatlik testlerde meydana gelen oksit tabakasının ağırlık kayıplarını azalttığı belirtilmiştir. Ancak iki saatlik testlerde oksitin oluşumuna izin verecek yüzey sıcaklık artışı meydana gelmemektedir. Dolayısı ile ağırlık kayıpları R600a ortamında daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.25: Sinter numunelerin aşınma izi bölgesinden alınan EDS ve SEM görüntüleri (test ortamı R600a). **(a)** Buhar işlemli **(b)** Buhar işlemsiz.

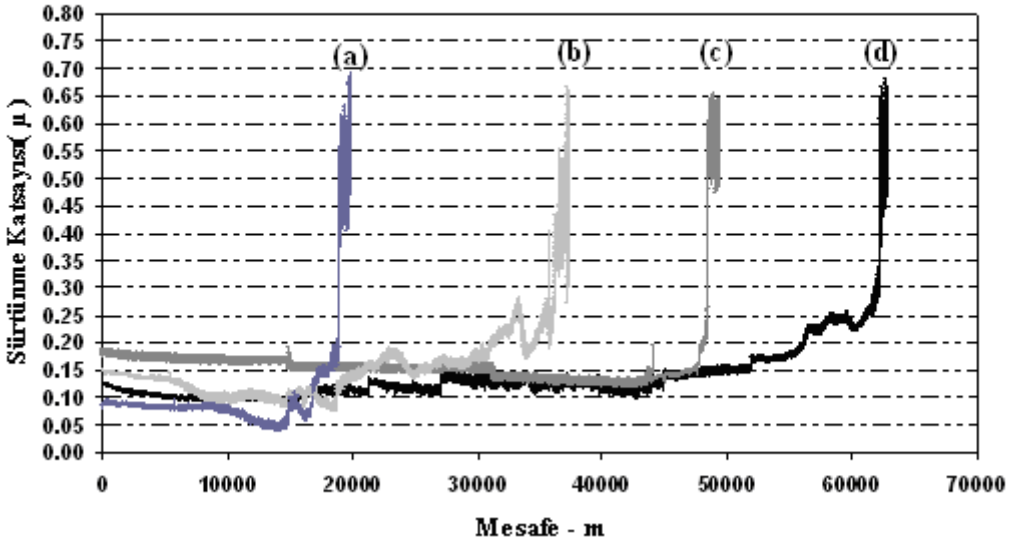
Tarama elektron mikroskobu görüntülerinde her iki yüzeyde de kopan partiküllerin süpürme (plough) ve mikro abrazif etki ile açtığı oyuklar görülmektedir (şekil 4.25).

R600a ortamında gerçekleştirilen testlerde gazın malzeme yüzeyinde oksitlenmeyi engelleyip engellemediği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda test edilmiş malzeme yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizi ile elementler belirlenmiştir (şekil 4.25). Bu analizlerden anlaşılacağı üzere, yağsız testlerde meydana gelen yüksek temas gerilmesi ve sıcaklık artışı ile oluşan oksit tabakası R600a ortamında engellenmiştir.

4.5.2 Yatak malzemelerinin R600a ortamındaki sınır yağlı tribometre testleri

Biyel kolu sinter ve perno (pim)100Cr6 malzeme çiftinin kompresör içerisinde kaplamasız olarak çalıştığı durumlarda aşınma hasarı meydana gelme süresi ve mesafesi belirlenmeye çalışılmıştır. Testler; R600a ortamında, 50N yük altında, 0.8m/s hız altında yapılmıştır. R600a konsantrasyonu her test için aynı tutulmuştur. Yağ ve hava karışımı püskürtme basıncı 30 psi, 2mbar ‘dır. Yağ ağırlığı 0.1 gr.’dır.

Testler, R600a‘nın yağın özelliklerini nasıl etkilediğini görebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu testin sonuçları şekil 4.26 ‘de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.



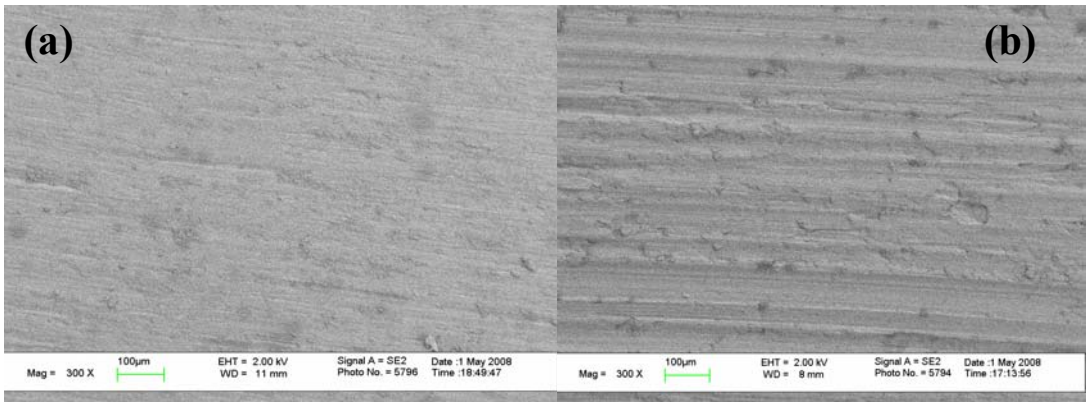
Şekil 4.26: Buhar işlemsiz sinter ve buhar işlemli sinter -100Cr6 malzemenin sınır yağlı, isobutan ortamı ve hava ortamı aşınma testleri. **(a)** Buhar işlemli R600a ortamında, **(b)** buhar işlemsiz sinter numune R600a ortamında, **(c)** buhar işlemli hava ortamı, **(d)** buhar işlemsiz sinter hava ortamında.

Hem buhar işlemli hem de buhar işlemsiz sinterli numunelerin R600a soğutucu gaz ortamdaki kararlılık süreleri (aşınma dayanımları), hava ortamındaki sınır yağlı testlere göre oldukça düşüktür. Bunun nedeni ortamdaki yoğun konsantrasyonlu R600a gazının yağın içinde çözünerek yağ viskozitesini düşürmesidir. Düşük viskoziteli yağın yüksek dönme hızlarında yüzeye tutunma özelliği azalmış ve yüzeyde oluşturduğu sınır yağ filminin dayanım ömrü düşmüştür [50-52].

Ayrıca, R600a ortamında yüzeyde oksitlenmenin engellenmesi de (şekil 4.26) sürtünme miktarının artmasında katkı sahibidir.

R600a ortamında malzemelerin dayanım süreleri üçte bir oranında düşmüştür. Buhar işlemsiz sinter malzeme ise daha iyi aşınma dayanımı göstermiştir. Malzemenin dış yüzeydeki yağ, R600a ile bir süre sonra bozulmuştur. Ancak gözeneklerden emilmiş yağın sınır yağlama şartını uzun süre devam ettirebilmesi, yağlı testlerde en iyi dayanım özelliği göstermesinin nedenidir.

En fazla kütle kaybı 0.5 gr. ile buhar işlemsiz sinter malzemenin R600a ortamındaki testinde görülmüştür. Buhar işlemli için kütle kaybı 0.3 gr. ‘dır. Pim malzemesinde 0.6 mg. gibi düşük ağırlık kayıpları meydana gelmiştir.



Şekil 4.27: B. işlemsiz sinter ve buhar işlemli sinter malzemesinin tarama elektron mikroskobu görüntüleri; (test ortamı R600a) **(a)** buhar işlemli malzeme, **(b)** buhar işlemsiz sinter çelik disk malzemedir (büyütme 300x).

Tarama elektron mikroskobu görüntülerinde (şekil 4.27) buhar işlemli sinter malzeme yüzeyinin daha az aşındığı görülmektedir. Buhar işlemsiz sinter malzemede ise kaba yüzey yapısı, mikro oyuklar ve çatlaklar görülmektedir.

Hem buhar işlemsiz sinter çelik yapıda hem de 100Cr6 pim malzemesinde meydana gelen fazla ağırlık kaybı; oksit tabakasının oluşmaması ve abrazif etkinin yanı sıra yapışma aşınma davranışının da meydana gelmesi sonucu oluştuğu düşünülmüştür.

4.6 Sinter Disk Numunelere MoS_2 (Molibden Sülfür) Yüzey Kaplama Yöntemi

Hermetik kompresörlerin dar bölgelerinde yağ filminin yetersiz olması sonucu; yüksek yük teması neticesinde oluşan sürtünme, aşınma ve malzeme kayıpları yüksektir. Bu zararların minumuma indirilmesi amacı ile bu bölgelerde kaplama yolu ile koruma yöntemi denenmiştir.

MoS_2 kaplamalar yüksek sıcaklıklarda ve vakum ortamında iyi bir katı yağlayıcı özellik göstermesi nedeni ile tercih edilirler. Atomik yapısının sürekli çalışan sistemler için üstün kaydırma ve taban malzemeye iyi yapışma özellikleri sağlaması sonucu; motorlarda, yataklarda ve daha bir çok alanda kullanımı artmaktadır.

MoS_2 katı yağlayıcısının metal yüzeyinde homojen birikmesi ve metal ile sert atomik bağ yapması için manyetik alanda dengesiz sıçratma tekniği kullanılmıştır.

Sinter ve buhar işlemli sinter çelik malzemelere uygulanan manyetik alanda sıçratma yöntemi ile oluşturulan MoS_2 ince film yapısı, malzemelerin sürtünme davranışlarını değiştirmektedir.

MoS_2 yapısının oksijen içeren ortamlarda hızla oksitlenerek bozulması kullanım alanlarını sınırlamaktadır. R600a ortamının oksitlenmeyi engellediği, yaptığımız

testler sonucu bulunmuştur. Molibden sülfür katı yağlayıcılarının bu ortamda düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma dayanımı göstermesi beklenmektedir.

4.6.1 Manyetik alanda sıçratma tekniği

Vakum ortamında katı haldeki kaplama metali yüzeyinin (hedef malzeme) enerjili iyonlarla bombardıman edilerek malzemenin buharlaştırıldığı bir sıçratma yöntemidir. Bu yöntem günümüzde ince film kaplamaların biriktirilmesinde kullanılan önemli tekniklerden biridir.

Sıçratma sistemi, negatif d.c. veya r.f. potansiyel uygulamalı bir hedef malzeme ile altmetal tutucusunun bulunduğu bir vakum odasından oluşur. Altmetal tutucusu hedef malzeme ile karşılıklıdır ve topraklanabilir, negatif potansiyel uygulanabilir veya kendi halinde bırakılabilir. Sistem basıncı, 10^{-3}–10^{-2} mbar aralığında tutulur ve plazmanın başlatıldığı bir ortam sağlamak için sıçratma gazı olarak argon ile doldurulur [53].

Katı hedef malzemenin plazmadaki pozitif iyonlar ile kimysal ortam içersinde (Ar+) bombardımanı, hedef atomlarını yerlerinden çıkarır. Hedef malzemesinin atomlarının bu şekilde malzemeden uzaklaştırılması sıçratma olarak bilinir. Sıçratılan iyonların bazısı altmetal yüzeyine giderek orada birikir ve bir film oluşturur.

Bu yöntemde hedef malzemesi, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Hedefin merkez ekseni, mıknatısın bir kutbunu oluşturur. İkinci kutbu ise, hedefin kenarlarına yerleştirilen mıknatıslar tarafından halka şeklinde oluşturulur. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların hedef üzerinde birbirine dik olmasını sağlar. Bu konfigürasyon ile sıçratma sırasında üretilen ikincil elektronlardan çoğunun manyetik alan çizgileri boyunca hedef metalden altmetale doğru gitmesi sağlanır [53].

Kapalı alan dengesiz manyetik alan sistemlerinde birden çok manyetik alan vardır. Zıt kutuplar karşılıklı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Mıknatıslar arasındaki manyetik alan çizgileri, plazma içindeki elektronlar için kapalı bir tuzak oluşturur. Alt metal bölgesinde yoğun bir plazma elde edilir.. Böylece büyüyen filmin uğrayacağı iyon bombardımanı arttırılır. Kaliteli filmler biriktirebilmek için, alt metale negatif potansiyel uygulanır (-40, -60, -80 V). Bu yöntem ile karmaşık şekilli altmetaller üzerine yüksek biriktirme hızlarında kaliteli kaplamalar yapılır [53].

4.7 Mangan Fosfat Kaplama Yöntemi

Mangan fosfatlama, metal yüzeyinde yağ tutabilme kabiliyeti yüksek bir tabaka oluşturarak yağlı ortamda metal metal sürtünmesini engellemek amacıyla yapılan kaplamalardandır. Gözenekli yapısı yağ tabakasını emerek ve yapısında tutarak yüksek hızlarda performans kayıplarının ve aşınmaların azaltılmasını sağlar. Ayrıca bu kaplamalar yüksek korozyon dayanımlarına sahiptir.

Mangan fosfat ($MnPO_4$) kaplama işlemi üç kademeden oluşmaktadır. Bunlar temizleme, rafine etme, fosfatlama kademeleridir. Temizleme ve durulama işleminden sonra rafine etme işlemi yapılır. Aksi taktirde kaba kristal yapısına sahip kalın kaplamalar elde edilir.

Mangan fosfat banyoları ortofosforik asit H_3PO_4, mangan fosfat tuzu $Mn(H_2PO_4)$, oksidanlar ve katalistleri içerir. İşlem sonunda reaksiyonlar gereğince yüzeyde $(MnFe)_5H_2(PO_4)_2$ "hureaulite" elde edilir [37].

$Fe + 2H^+ \rightarrow Fe^{+2} + H_2$

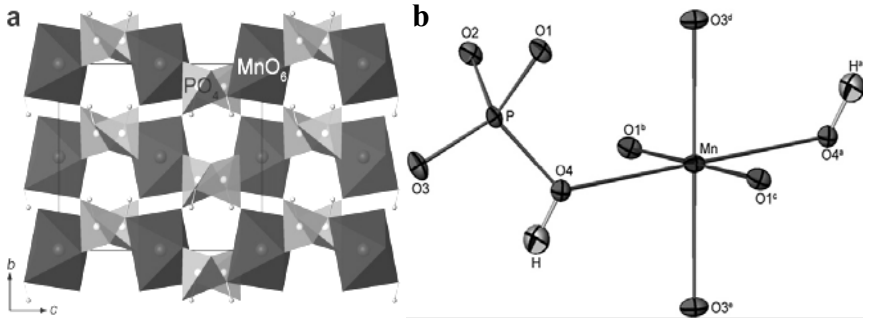
$5\ Mn^{+2} + 10\ H_2PO_4 \rightarrow Mn_5H_2(PO_4)_4 + 6H^+ + 6H_2PO^{-4}$

Mangan fosfat kaplama proses sırası; (CaMPagnie Française de Produits Industriels firmasının belirlediği standart kimyasallar) [37]

- Temizleme (Progal D92TA %4 wt. alkali çözücülerle)
- Su ile durulama (oda sıcaklığında)
- Rafine etme (Fixodine TG2A (1g/l) ve fixodine TG2B (1 g/l) T: 50 C t: 2 dakika)
- Fosfatlama (Thermogranodine 117 : %18 ve thermogranodine başlatıcı 780CF: 2g/l T:75 ^{0}C t: 10dk.)
- Su ile durulama (oda sıcaklığında)
- Kurutma (T: 50 ^{0}C t: 10dk.)
- Yağlama (T: 25 ^{0}C, t:3 dk.)
- Kurutma (T: 50 ^{0}C t: 10dk.)

İşlemlerinin yapılması sırasındaki sıcaklık, oksidasyona neden olması ve yapının oluşumunu zorlaştırması nedeni ile önemlidir. Mangan fosfat kaplamanın çelik malzemeye yüksek yapışma özelliğinin sağlanabilmesi için kaplamanın ince kristalli bir yapıya sahip olması ve iyi bir arıtma banyosunun kullanılması gerekmektedir. Arıtma banyolarında en çok Mn, Mg, veya Na fosfat çözeltileri kullanılmaktadır [37].

Malzeme yüzeyinde oluşan mangan fosfat yapısı bir mangan atomu, bir fosfat atomu, dört oksijenden oluşur. Yapı monoklinik uzay grubu C2/c (No.15) yapısından meydana gelmiştir.



Şekil 4.28: (a) Mangan fosfat bağ yapısının {100} doğrultusu izdüşüm görüntüsü, **(b)** mangan, fosfor atomlarının tetrahedral ve oktahedral yerleşimleridir [54].

4.8 MoS_2 Kaplama Parametreleri ve Kaplamaların Çizik (Scratch) Testleri

Tribometre testlerinden önce yapılacak olan kaplamaların yapışma kuvvetlerinin belirlenebilmesi amacı ile çizik testleri yapılmıştır. Bu testler, biyel kolu malzemesi ile en iyi bağ yapabilen kaplama ve kaplama parametresini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Böylece uygulanacak olan tribometre testleri azaltılmış, diske en iyi yapışan kaplamalar belirlenmiştir.

Çizik testlerinde hata mekanizması sadece kaplamaya bağlı olmamakla birlikte, kaplanacak olan numunenin özelliğine, kaplama ile ana malzeme arasındaki atom atoma etkileşime [55] ve kaplama tekniğine bağlıdır. Ana malzemenin uygulanan yüke karşı plastik deformasyon göstermesi sonucu oluşan çizik izleri ile, kaplamanın yüke karşı ana malzemeye yapışarak verdiği parçalanma şekilleri önemli seçim kriterini oluşturmaktadır [56]. Ayrıca kullanılan çizik test cihazının kaplamaya uyguladığı gerilmeye göre kaplamanın parçalanma şekilleri de değişmektedir [57]. Bunlarla birlikte bazı çalışmalarda ise çizik testlerinin sonuçlarının aşınma test sonuçları ile doğrudan ilişkili oldukları sonucuna dahi varılmıştır [58].

Tüm magnetron sıçratma tekniğinde kaplama parametrelerinin değişmesi, kaplanan malzemenin sertliğinin değişmesi ve gözenekli bir yapıya sahip olması, MoS_2 kaplamasının yapışma kuvvetini etkilemektedir. Biyel kolu küçük deliği ve karşı malzeme olan 100Cr6 pim için en iyi kaplamalar elde edilebilmek amacıyla yapılacak olan kaplamanın, sinter disk ile oluşturduğu bağ kuvveti hem de tribolojik özelliğinin incelenmesi gereklidir.

MoS_2 kaplama parametreleri ve bu parametrelerle değişen kaplama kalınlıkları çizelge 4.10' da gösterilmiştir.

Test isimlendirmeleri bu çizelgelere göre yapılmış olup, numuneler "Run x-y" kodu ile numaralandırılmıştır. Burada "x" deney numarasını, "y" ise numune özelliğini göstermektedir. Taban malzemesinin buhar işlemsiz sinter malzemesini temsilen "y" 1-5 arasında, buhar işlemli sinter numune için "y" 16-20 arasındadır. Örneğin; run 9-20 için deney numarası 9, taban malzemesi ise buhar işlemli sinter malzemedir.

Çizelge 4.9: CFUBMS prosesinde herbir deney için Pulsed-dc durumunda kullanılanılacak çalışma şartları.

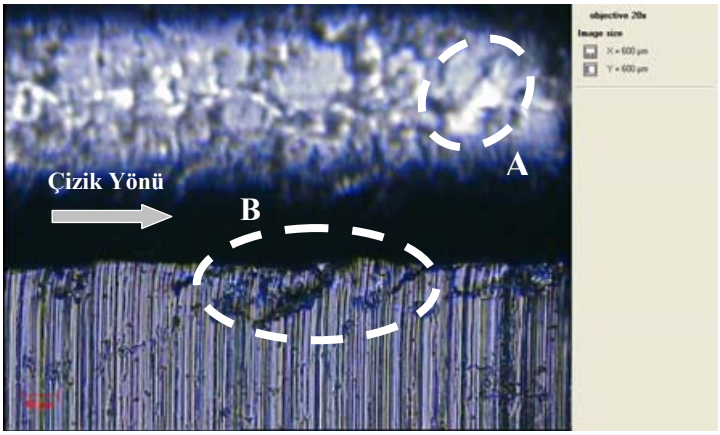
Parametreler			Seviyeler		
			1	**2**	**3**
A	Çalışma basıncı	*(Pa)*	0.26	0.33	0.4
B	Taban malzemesi gerilimi	*(-V)*	40	60	80
C	Magnetron akımı, (MoS_2)	*(A)*	0.3	0.6	0.9

Çizelge 4.10: CFUBMS prosesinde herbir deney için Pulsed-dc durumunda kullanılanılacak şartlar ve oluşan kaplama sertlikleri.

Deney No	**Hedefler**	**Taban Malzeme**		**Çalışma Basıncı (Pa)**	**Kaplama Kalınlığı (µm)**
	3xMoS_2 (A)	**Biased-dc (-V)**	**Pulsed-dc**		
1	0.3	40		0.26	1.8
2	0.6	60		0.26	2.1
3	0.9	80		0.26	2.4
4	0.6	40	T:1.5 µs	0.33	2.0
5	0.9	60	F:150 kHz	0.33	2.5
6	0.3	80		0.33	1.6
7	0.9	40		0.4	2.5
8	0.3	60		0.4	1.8
9	0.6	80		0.4	2.0

Yapılmış olan çizik testleri sonucunda birbirlerine yakın çıkan sonuçlar karşısında ana seçim kriterinin oluşturacak bazı küçük veriler, literatür çalışmaları sonucunda belirlenmiştir.

Testler sonunda, akustik emisyon (AE), uygulanan yük (Fn), sürtünme kuvveti (Ft), sürtünme katsayısı, ve her artan yük için yüzey profilleri belirlenmiştir.

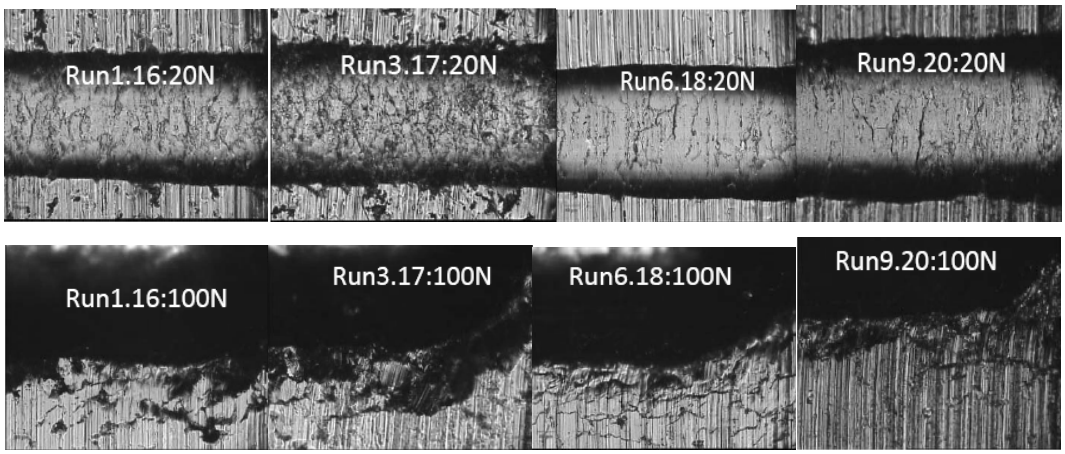


Şekil 4.29: Çizik testi sonunda elde edilen yüzey görüntüsü.

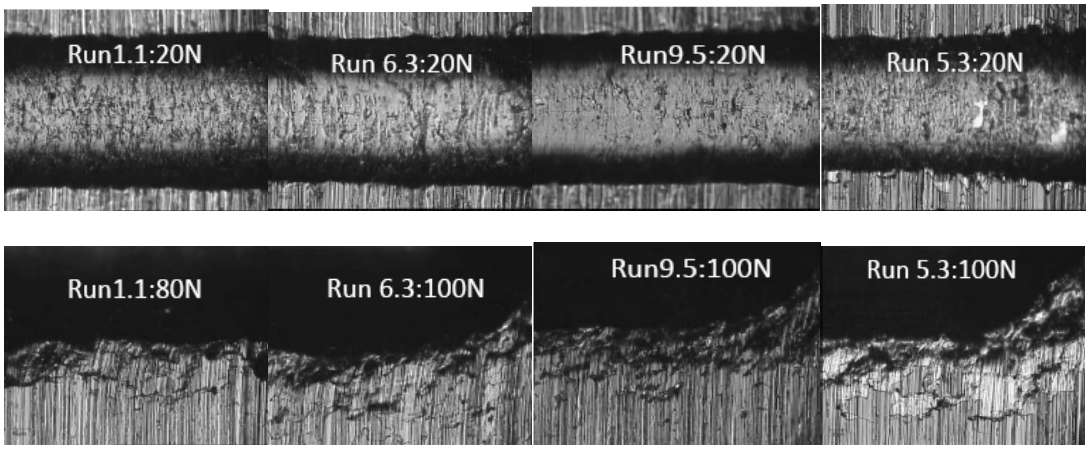
Tüm testler 10 mm çizik uzunluğu (scratch length), 10 mm/min çizik hızı (scratching speed), 100 N/min yüklenme oranı (loading rate) ile 200 μm yarıçaplı (tip radius) Rockwell uç ile yapılmıştır. Şekil 4.29'da, çizik yönünde artan yükle birlikte uç altında kaplama film incelmeye maruz kalırken, "A" ile gösterilen bölgede/noktada taban malzemeye ulaşmıştır. Diğer tondaki görüntülerde ise kaplama film taban malzeme üzerindedir.

"B" ise çizik kenarlarına uygulanan yük değerine bağlı olarak oluşan mikroçatlaklardır. Bunların büyüklük ve sıklığı, çizik yönünden ters yönde meydana gelmeleri, yapışmanın önemli bir işareti olarak değerlendirilir.

Bazı örneklerde, yukarıdaki verilenin aksine kenarlarda pul pul dökülme (spalling, buckling) ve filmin taban malzemeden büyük boyutlarda ayrıldığı gözlenmiştir. Bu şekildeki deformasyon zayıf yapışmanın bir işareti olarak değerlendirilir. Çizik iç profilinde film incelmeye devam ederken belli yük değerine ulaşılıncaya kadar kenarlarda herhangi bir çatlak oluşumu gerçekleşmemektedir. Bu da yapışmanın iyi olduğuna işaret eder.



Şekil 4.30: Buhar işlemli üzerine kaplanan MoS_2 kaplamaların çizik testi sonundaki yüzey görüntüleri [1].

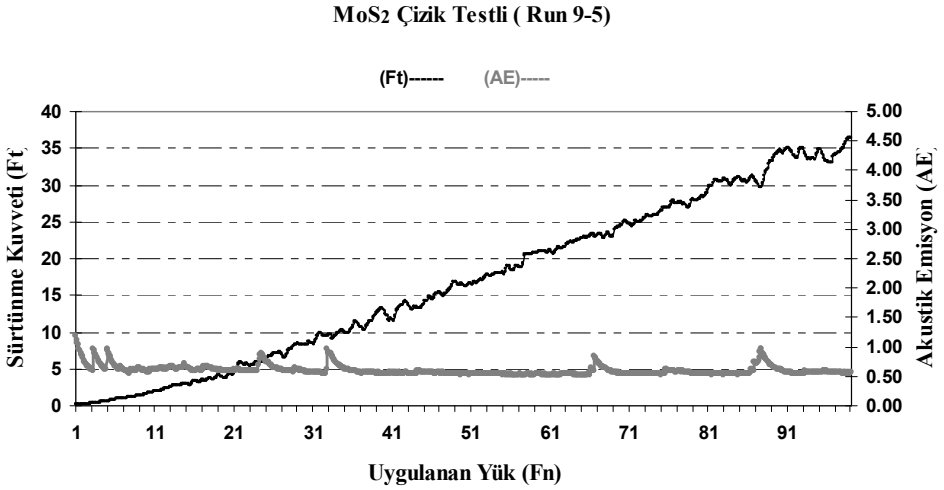


Şekil 4.31: İşlemsiz sinter malzeme üzerine kaplanan MoS_2 kaplamaların çizik testi sonundaki yüzey görüntüleri [2] [3].

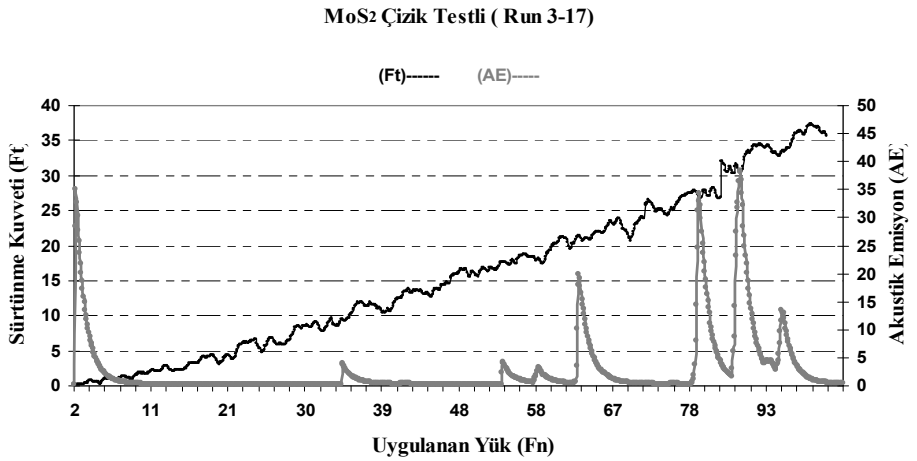
Her yük için çizik izleri görüntüleri şekil 4.30. ve şekil 4.31.'de gösterilmiştir. Yapılan tüm çizik testleri içersinde en iyi sonuçları veren testler gösterilmiştir. "Run 1.16" ve "run 5.3" testleri yüzey görüntülerinden anlaşılacağı üzere pul pul dökülme ve çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklar ve pullanmalar yapışmanın düşük olduğu kaplama parametreleri için meydana gelmektedir. Bu kaplamalar düşük yapışma özellikleri nedeni ile testlere alınmadan elenmiştir. Geri kalan izler ise birbirlerine çok yakın ve ayırt edilemeyecek kadar iyi özellikler göstermişlerdir. Bu durumda bakılacak olan kaplama özelliği; akustik emisyon, sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti grafikleridir. Bu grafiklerden düşük akustik emisyon gösteren ve sürtünme katsayısında hızlı bir değişim görünmeyen en iyi kaplamalar seçilmiştir.

[1] Run 9-20 : Kaplama deney no 9 (çizelge 4.11) , numune no 20 (buhar işlemli)
[2] Run 9-5 : Kaplama deney no 9 (çizelge 4.11), numune no 5 (işlemsiz sinter)
[3] Run 1-1 : Kaplama deney no 1 (çizelge 4.11) , numune no 1 (işlemsiz sinter)

Şeçilmiş olan kaplamaların çizik testleri sonundaki akustik emisyon ve sürtünme katsayıları grafikleri şekil 4.32 ve şekil 4.33'de gösterilmiştir.



Şekil 4.32: Çizik testi sonundaki akustik emisyon, uygulanan yük ve sürtünme katsayısı grafikleri (Run 9-5 / ısıl işlemsiz sinter çelik üzerine MoS_2 kaplama, kaplama deney numarası: 9).



Şekil 4.33 : Çizik testi sonunda akustik emisyon, uygulanan yük ve sürtünme katsayısı grafikleri (Run 3-17 / buhar işlemli çelik üzerine MoS_2 kaplama, kaplama deney numarası: 3)

Şekil 4.33' de 60N yük uygulanırken akustik emisyon grafiğinin artması, kaplamanın o yükte kırıldığının ve taban malzemesine ulaşıldığının bir göstergesidir. "Run 9-5" ve "Run 9-20" kaplama grafiklerinde herhangi bir ani artış görülmemiştir. En iyi kaplamalar tribometre testlerine alınmıştır.

4.9 Molibden Sülfür ve Mangan Fosfat Kaplamaların Tribometre Testleri

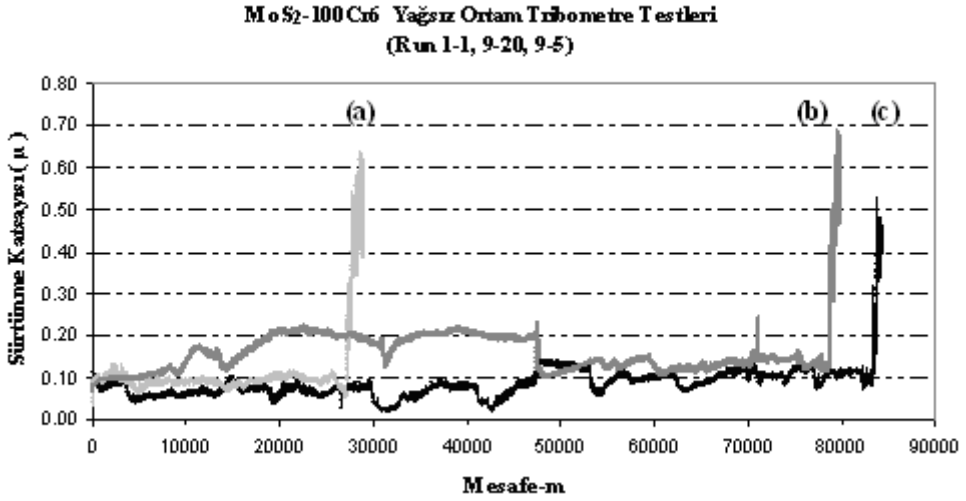
Kaplama malzemesi olarak seçilen molibden sülfürün manyetik sıçratma tekniği ile kaplanması sırasında belirtilen parametrelerin, kaplama üzerindeki etkilerini anlayabilmek için tribometre testleri yapılmıştır.

Kaplama sonrasında taban malzemenin yoğunluğu 0.64 gr./cm^3, ağırlıkları ise 100 gr. ölçülmüştür. Kaplama kalınlığı 2-3 µm arasındadır.

Yüzey hızı 0.8 m/s'dır. Bu hız, yağsız ve R600a ortamında gerçekleştirilmiş testler ile aynıdır. Bu testler disk üzerinde pim test cihazında yapılmıştır. Kullanılan yük 50N 'dur. P.V.(Basınç x hız) ise 8 MPa.m.s^{-1} 'dir. Temizleme için 10 dakika etanol ile ultrasonik temizleme cihazı kullanılmıştır. Numuneler test öncesi ve sonrası desikatörde saklanmıştır.

4.9.1 Kaplamaların R600a ortamındaki yağsız test sonuçları

Kaplanmış olan numunelerin hepsi R600a oramında test edilmiştir. Gaz konsantrasyonu her test için aynı değere ayarlanmıştır.



Şekil 4.34: MoS_2 kaplanmış numunelerin R600a ortamında, 100Cr6 pim' e karşı olan yağsız tribometre test sonuçları; **(a)** Run 1-1, işlemsiz sinter üzerine kaplanmış MoS_2, **(b**) Run 9-20, b.i. üzerine kaplanmış MoS_2,**(c)** Run 9-5, b. işlemsiz sinter üzerine kaplanmış MoS_2 kaplamadır.

"Run9-20" ve "run9-5" için gösterilen dayanım mesafesi, sürtünme katsayısı grafiklerinden (şekil 4.34) anlaşılacağı üzere, buhar işlemsiz sinter kaplı MoS_2 numune 28 saat süre dayanmış, buhar işlemli sinter çelik üzerine kaplanmış olan MoS_2 numune 26 saatlik bir dayanım süresi ve 78 km'lik dayanım mesafesi

göstermiştir. “Run 1-1” ise çizik testi ile elde edilen sonuçların doğruluğunu kanıtlamak amacıyla teste alınmıştır. Nitekim kaplama, tekrarlanan gerilmeler ve yorulmadan kaynaklanan çatlaklar sonucu teste uzun süre dayanamamıştır.

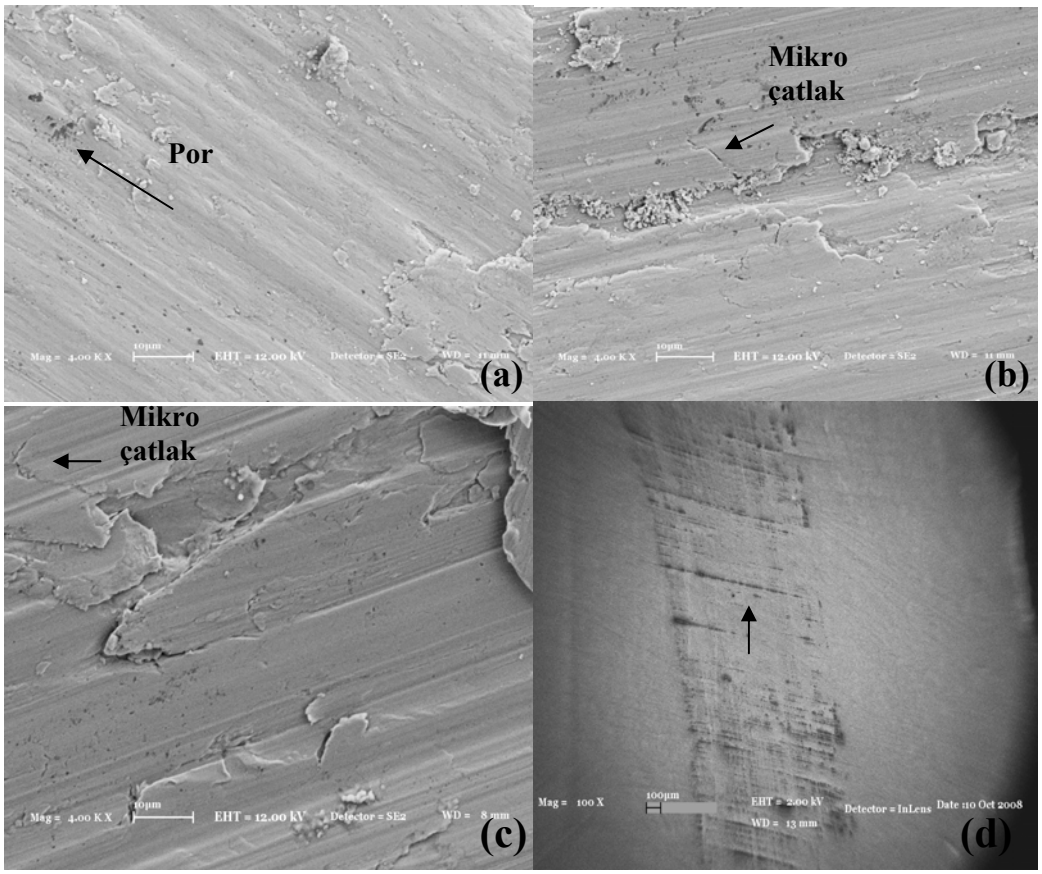
Buhar işlemsiz sinter malzemede MoS_2 difüzyonu daha fazla gerçekleşmiştir. Gözenekli yapısından kaynaklanan bu olay, aşınma dayanımını arttırmıştır. Kaplama parçalansa bile sürtünme katsayısı değeri 0.4’ü geçmemiştir.

Kaplamanın parçalanması üç aşamada meydana gelmektedir. İlk temas sırasında kaplama kalınlığının ~2 µm olması, taban malzemesinde elastik deformasyona neden olmuştur. Bu aşamada kaplama çıkıntıları, sert 100Cr6 malzemesi tarafından koparılır. Bu küçük parçalar sürtünen yüzey boyunca akarak plastik akış sağlayan bir tabaka oluşturur. Ayrıca bu tabaka 100Cr6 yüzeyine yapışarak MoS_2‘e karşı MoS_2 sürtünmesine neden olur. Başlangıç sürtünme katsayısındaki düşüşün nedeni bu şekilde açıklanabilir. Bu olay sonucunda yüzeylerde çok az bir hasar meydana gelir. MoS_2 ‘nin kayma yönüne tercihli yönlenmesi sürtünme katsayısının düşmesinin diğer bir nedenidir.

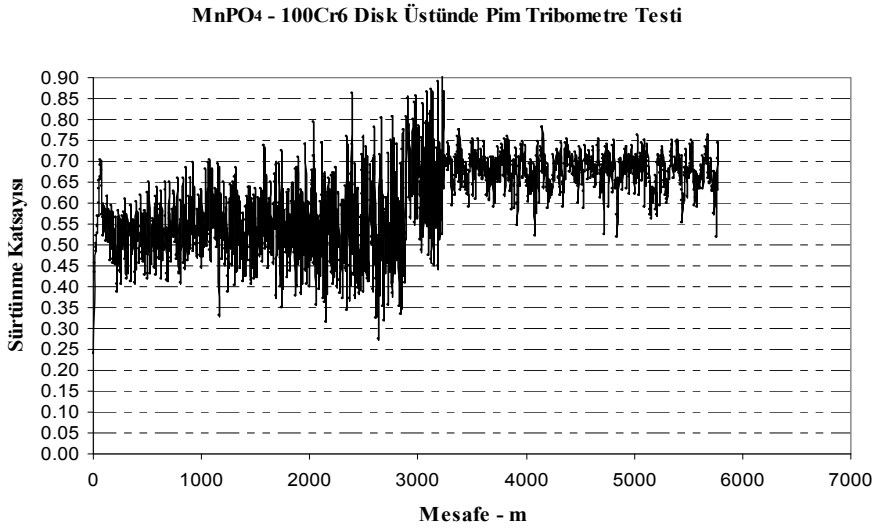
Sürtünme katsayısının belirli bir kalıcı rejim değerini alarak parçalanana kadar devam etmesi, R600a‘nın oksitlenmeyi önleyici yapısından kaynaklanmaktadır. R600a‘nın hem yüzeyin fazla ısınmasına izin vermemesi hem de oksiti engellenmesi MoO_3 yapısının oluşmamasını sağlamıştır. Katsayının aniden artıp kaplamanın parçalanması; çatlak başlaması ve ilerlemesi sonucu meydana gelmiştir.

Kaplamanın bozulmaya başlama aşamasından önce yüzeye paralel yorulma çatlaklarının oluştuğu görülmüştür (şekil 4.35). Buhar işlemli sinter malzemede bu çatlakların başlaması ile ilerlemesi çok daha hızlı olmuştur. Kaplama altında uniform olmayan gerilmeler ve iç kusurlar kaplamanın tabaka halinde parçalanmasına neden olmuştur [59].

En son aşamada ise metalik çıkıntılar 100Cr6 ile temas eder. Bu aşamada sürtünme katsayısı, metal-metal temasının olduğu değere kadar hızla artar.



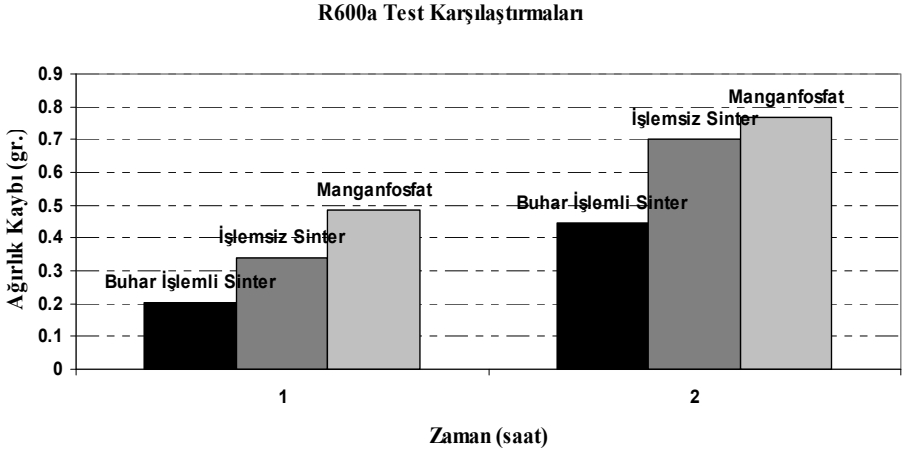
Şekil 4.35: Kaplamaların aşınma izlerinin SEM görüntüleri ;
(a) mangan fosfat kaplamanın 8. saat sonundaki aşınma izi görüntüsü,
(b) buhar işlemli sinter üzerine kaplı MoS_2 kaplamadaki yorulma çatlağı,
(c) buhar işlemsiz sinter çelik kaplı MoS_2 kaplamadaki yorulma çatlağı,
(d) MoS_2 kaplamanın 6. saat sonundaki aşınma izi görüntüsüdür.
(4.000x).



Şekil 4.36: Mangan fosfat kaplı buhar işlemli çelik numunenin 100Cr6 pim malzemesine karşı olan sürtünme katsayısı grafiği (ortam R600a, 0.8m/s).

Mangan fosfat kaplı buhar işlemli numune ise R600a ortamında sadece 800 metre gibi bir mesafe dayanmış ve yaklaşık 10 dakika sonra tamamen numune yüzeyinden kopmuştur (şekil 4.36.). Toplam iki saatlik test sonucunda; 0.76 gr. disk numune kaybı, 2 mg.'lık pim malzemesi ağırlık kaybı oluşmuştur.

Mangan fosfat kaplı numunelerin sürtünme katsayısı, kaplamasız numunelere göre daha düşük değerlerde çıkmıştır. Kopan parçaların sertlikleri yüksektir. Bu partiküller süpürme mekanizması ile pim önünde birikmiştir. Bu mekanizma titreşime ve yüzeyin buhar işlemli gibi pürüzlü yapıda görünmesine neden olmuştur.



Şekil 4.37: Malzemelerin R600a ortamındaki yağsız aşınma testlerinin ağırlık kayıpları karşılaştırmaları.

Şekil 4.37 'deki sonuçlardan, mangan fosfat kaplamanın tek başına yağsız ortamda kullanılmasının aşınma engelleyici herhangi bir etkisinin bulunmadığı anlaşılmaktadır.

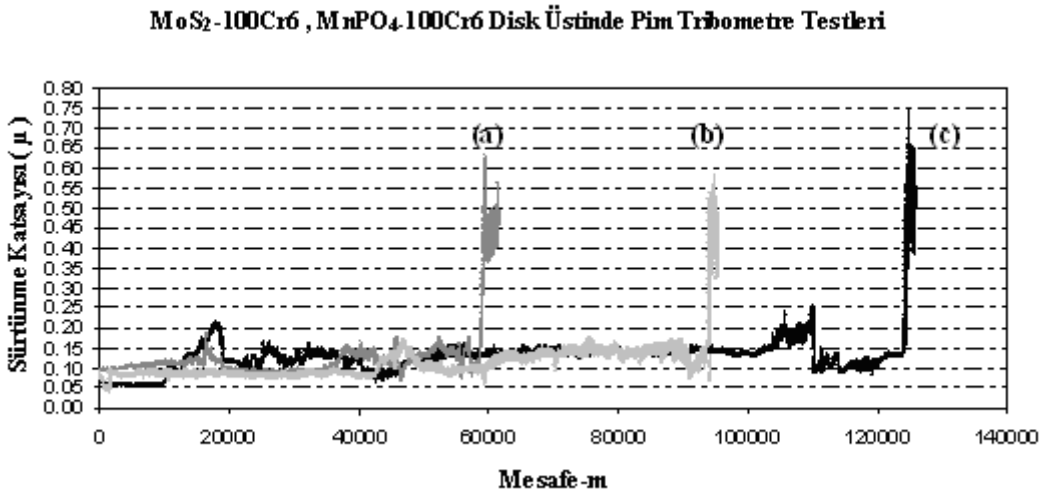
4.9.2 Kaplamaların R600a ortamındaki sınır yağlı test sonuçları

Run9-5 ve run 9-20 kaplama parametreleri ile kaplanmış ve mevcut sistemlerde kullanılan mangan fosfat kaplı numunelere R600a ortamında sınır yağlı tribometre testleri yapılmıştır. Her testin başlangıcında disk yüzeyine 30 psi basınçlı hava-yağ karışımı püskürtülmüştür. Uygulanan yük 50 N 'dur. Gerçek hızı 0.8 $m.s^{-1}$ alınmıştır.

Testlerden önce kaplı numuneler ve 100Cr6 malzemesi 15 dakika aseton ve ardından 15 dakika etanol ile ultrasonik olarak temizlenmiştir. Yağın uçucu olmasından dolayı teste hiç durdurulmadan devam edilmiştir.

Kaplamalar yapılarından dolayı yağlı testlerde üstün yağ emme ve aşınma dayanımı göstermişlerdir. Sürtünme katsayıları 0.08 gibi çok düşük değerlerde başlamış ve aynı değerlerde uzun süre devam etmiştir.

Tribometre testleri sonuçlarının daha önce uygulanmış olan çizik testleri (scratch) sonuçları ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Kaplanan malzemenin buhar işlemi uygulanmamış gözenekli sinter olması, kaplama atomlarının yüzey altına daha çok difüze olmasını ve malzeme ile daha iyi atomik bağ yapmasını sağlamıştır. Dolayısı ile run 9-5 tribometre testlerinde en yüksek kaplama dayanım performansını göstermiştir (şekil 4.38).



Şekil 4.38: Molibden sülfat ve mangan fosfat kaplamaların sınır yağlı aşınma testleri sonucundaki sürtünme katsayısı(μ)-mesafe(m) grafikleri (ortam R600a).
(a) Buhar işlemli çelik disk üzerine kaplanmış MoS_2 (run 9-20).
(b) Buhar işlemli çelik disk üzerine kaplanmış mangan fosfat.
(c) Buhar işlemsiz sinter çelik disk üzerine kaplanmış MoS_2 (run 9-5).

Seçilen yüksek hız (488 dev/dak) düşürülen iz yarıçapına göre ayarlanarak gidilen mesafenin aynı olmasını sağlarken, kaplamanın daha hızlı yüzey yorulma çatlakları sonucu bozulmasına neden olmuştur.

Mangan fosfat kaplamanın, büyük tane boyutundan kaynaklanan pürüzlü ve gözenekli yapısı vardır. Bu yapı yağı emerek uzun süre bünyesine hapsetmiştir. Sınır yağlı ortamda kaplama, kendi kendini yağlama özelliği kazanmıştır. Bu olay kaplamada uzun süre görülebilir aşınma meydana gelmemesinin ana nedenidir.

Sürtünmenin başlaması ile birlikte sürtünme katsayısının (μ =0.08) çok düşük değerde olması sınır yağlama şartlarından ileri gelmektedir. Bu katsayının bir süre sonra düşerek kalıcı rejim alarak devam etmesi (μ =0.06), ince MoS_2 tabakasının bağ yaptığı diğer şerit moleküller üzerinde kolay kayma yaparak yağlama etkisi oluşturması sonucudur. MoS_2 'nin kısa lameler yapıda olması ve kayma yönüne paralel yönlenmesi, yüksek aşınma direncinin nedenidir [60].

Manyetik püskürtme metodu ile üretilen bu yoğun ve sıkı yapı yaklaşık 0.3 nm 'lik Van Der Waals bağları ile tabakalar halinde dizilerek oluşmuştur. Kaplama sırasında

güçlü basal düzlemlerin kayma eksenine paralel yönlendirilmesi (type 2), MoS_2 yapısının uzun süre dayanmasının diğer bir nedenidir [61].

Magnetron akımının seçilen üç seviyeden en iyi 0.6A, taban malzemesi gerilimlerinden -80V ve çalışma basıncının 0.4 Pa olması molibden disülfür güçlü basal düzlem yönlenim yapısı oluşturmuştur [61]. Taban malzemesi geriliminin (-V) artması, S adatom mobiletisini arttırarak, plazma iyon bombardımanından daha düzenli ve sıkı bir yapı elde edilmesini sağlamıştır.

Düşük argon basınçlarında iyonların yol alma süreleri (mean free path) artmıştır. Püskürtülen atomların yüksek enerjili durumları hedef malzemeye varana kadar azalmaktadır. Bazı argon atomları hedefe çarptıktan sonra, enerji kaybederek geri yansımaktadır. Geriyansıyan bu nötr atomlar taban malzeme yüzeyindeki S zayıf bağlı atomları ile çarpışırlar ve onların tercihi püskürtülmesine neden olurlar. Böylece düşük argon basıncında ve yüksek taban malzemesi geriliminde sülfür atomları kaplanan malzeme yüzeyine düşük oranda tutunabilir. [62].

Yüksek argon basınçlarında ise geri yansıyan argon atomları, plazmadaki kısa hareket yolundan dolayı (short mean free path) enerjilerini kaybederler. Düşük enerjili argon atomları ana malzeme yüzeyindeki (substrate surface) S atomları bağlarını koparabilecek kadar yeterli kuvvete sahip olmazlar [62]. Dolayısı ile seçilen argon basıncı ve taban malzeme gerilimi, malzeme üzerinde iç yapı kusuru olmayan bir kaplama düzeni oluşturmuştur. Bu yapı disk üstünde pim testlerinde en iyi aşınma dayanımı göstermiştir.

Kaplamaların sert taban malzemesine daha iyi yapışma özelliği gösterdiği ve plastik deformasyonu daha iyi karşılayarak kaplamanın ömrünü uzattığı bir çok bilim adamı tarafından belirtilmiştir [56,58,59]. Taban malzemesinin sert olmasının, yüksek kayma gerilimlerini karşılayarak kaplama dayanımını arttırması beklenirken, daha düşük sertlikteki buhar işlemsiz sinter çelik malzeme bu gerilmelere karşı daha iyi dayanıklılık göstermiştir. Buhar işlemsiz sinter üzerine kaplanan MoS_2 kaplama, yüksek dayanım ömrü ve kaplama kırıldıktan sonra bile düşük sürtünme katsayısı vermiştir. Bunun nedeni gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Kaplama sırasında S-S-Mo atomik yapısı numune içerisine daha iyi difüze olmuş ve çelik ile daha sıkı bağ yapısı oluşturmuştur.

5 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günümüzde bir çok alanda kullanılan kompresörlerin dayanım ömürleri, yeni kullanılmaya başlanan çevreye duyarlı hidrokarbon soğutucularla birlikte azalmıştır. Kompresör yatak malzemesi olan Fe esaslı sinter ve pistonu biyel koluna bağlamak için kullanılan 100Cr6 pim malzemesi arasında oluşan yüksek sürtünmenin azaltılması için yataklar üzerine molibden sülfür kaplamalar kaplanmıştır. Bu kaplamalara, çizik ve disk üstünde pim testleri yapılmıştır.

Hava ortamında yapılan kaplamasız testlerin sonuçları;

- 50 N yük ve 1886 metre mesafede buhar işlemsiz sinter çelik malzemedeki ağırlık kayıpları, buhar işlemli çelik malzemenin yaklaşık 6 katıdır. Bunun nedeni buhar işlemi sonunda oluşan sert oksit tabakasının abrazif aşınma etkisini azaltmasıdır.
- Metal-metal sürtünmesi sırasında aşınma izi bölgesinde yüksek hız ve ağırlıklarda meydana gelen ısı, demiroksit tabakası meydana getirmiştir. Oksit tabakası yüzeydeki sürtünme katsayısını ~0.2 düşürmüştür. Ağırlık kayıpları azalmıştır.
- Buhar işlemsiz sinter malzeme yüzeyindeki gözenek bölgeleri çatlak başlangıçlarını oluşturarak daha fazla ve büyük boyutta partiküllerin kopmasına neden olmuştur. Diğer bir sonuç ise gözeneklerin oksitlenmiş aşınma partiküllerini tutarak gerçek temas bölgesini arttırması ve yüzey oksit tabakası oluşumunu hızlandırarak aşınma etkisini azaltmasıdır.
- Buhar işlemli ve buhar işlemsiz sinter malzemelerin, R600a (isobutan) ortamında disk üstünde pim (100Cr6) testleri yapılmıştır. Bu testler soncunda buhar işlemli sinter çelik malzemenin sürtünme katsayısında ~0.2 değerinde düşüş görülmüştür. Buhar işlemli sinter malzemede ise aşırı titreşim ve ses sonucu belirli bir katsayı elde edilememiştir. Bu titreşimin nedeni kopan partiküllerin boyutlarının büyümesi ve ortam gazının bu partikülleri aşınma bölgesine yığmasıdır. Buhar işlemli sinter malzemenin tarama elektron mikroskobu görüntülerinde kopan partiküllerin boyutunun daha büyük olduğu görülmüştür. Büyük partiküllerin ara yüzeye yığılması daha fazla düzensiz

- R600a ortamında yapılan yağsız testler sonucunda çıkan diğer bir sonuç ise hava ortamında görülen oksitin, R600a ortamında görülmemiş olmasıdır. Dolayısı ile R600a soğutucu ortamı oksit oluşumunu engellemektedir.
- Düşük yağlı püskürtmeli testler için Arçelik A.Ş.'den temin edilen kompresör mineral yağı ile 100Cr6 'a karşı buhar işlemli ve buhar işlemsiz sinterlenmiş çelik malzemelerin aşınma testleri yapılmıştır. Buhar işlemli sinter malzeme yüzeyinde 17 saat süre ile herhangi bir aşınma görülmez iken, buhar işlemsiz sinter malzeme 22 saat teste dayanmıştır. Bu üstün dayanım özelliği gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Yapının gözenekli olması, yüksek yağ tutma ve emme özelliği ile üstün dayanım performansı göstermesine neden olmuştur.
- R600a gazının mineral yağ içinde çözünmesi sonucunda oluşan yağ filmi, malzemelerin aşınma dayanımlarını düşürmüştür. Buhar işlemli sinter malzeme bu ortamda aşınma izi görülmeden 7 saat, buhar işlemsiz sinter malzeme 13 saat dayanmıştır. Bunun nedeni, isobutanın yağın viskozitesini düşürmesi ve yağın yüzeyde tutunabilme özelliğini azaltmasıdır.
- Sinterlenmiş çelik yatak malzemelerine kapalı alanda dengesiz manyetik alan püskürtme yöntemi ile molibden sülfür (MoS_2) kaplanmıştır. Kaplanmış malzemelere çizik testleri uygulanmıştır. Bu testlerin amacı, taban malzemeye en yüksek yapışma kuvveti ile bağlanan kaplamayı ve en iyi kaplama parametresini belirlemektir. Kaplamanın yapışma özelliğinin bilinmesi tribometre testlerine alınan numune sayısını azaltmıştır. Çizik testlerinden çıkan sonuçlara göre en iyi MoS_2 kaplama; uygulanan taban malzemesi geriliminin en düşük -80V, manyetik akımın 0.6A, ortam basıncının ise 0.4 Pa olduğu kaplamalardır. Doğru alt taban malzemesinin seçilmesi ise tribometre testleri sonucu ortaya çıkmıştır.
- Buzdolabı kompresörlerinde kullanılan mangan fosfat kaplamalar ise yanlızca buhar işlemli sinterlenmiş çelik malzemeler üzerine kaplanmıştır. Yağsız, R600a ortamında yapılan testlerde yüke dayanamamıştır ve parçalanmıştır. Sınır yağlı testlerde 90km'lik dayanım mesafesi göstermiştir. 100Cr6 pim malzemesindeki ağırlık kayıpları en fazla bu kaplamada meydana gelmiştir.

- MoS_2 kaplamalar R600a ortamında sınır yağlı testlerde yüksek dayanım göstermişlerdir. Özellikle gözenekli yapıya sahip buhar işlemsiz sinter çelik üzerine kaplı molibden sülfür kaplama, 124 km 'lik dayanım performansı ile en iyi sonucu vermiştir. Bunun nedeni; taban düzlemlerinin kaplama sırasında disk malzemesine paralel büyümesi ve sürtünme sırasında bu düzlemlerin tabakalar halinde kayarak yağsız ortamda dahi aşınmayı engellemesidir. R600a ortamında MoO_3 oluşumunun engellenmesi de dayanıma etki eden önemli bir faktördür.
- Çalışmalardan çıkan genel sonuç, günümüzde hermetik tip kompresörlerde mevcut kullanılmakta olan buhar işlemli sinter çelik yatak numuneleri üzerine kaplanmış mangan fosfat kaplamaların yerine, buhar işlemsiz sinter çelik disk üzerine kaplı molibden disülfat (MoS_2) kaplamaların kullanılması ile bu bölgelerdeki meydana gelen aşınma ve hasarların engellenebileceğidir.

KAYNAKLAR

[1] **Akkaş, O.,** 1998. TİN kaplama parametrelerinin aşınma davranışı üzerindeki etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] **Brushan, B.,** 2002. Introduction To Tribology, John Wiley & Sons, New York.

[3] **Holmberg, K. and Matthews**, **A.** 1994. Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering, *Tribology Series*, **28**, Elsevier, New York.

[4] **Ludema K.C**., 1996. Friction, Wear Lubrication: A Textbook in Tribology, CRC Press, Boca Raton.

[5] **Nilüfer, B.**, 1998. Molibden Nitrür Kaplamaların Aşınma Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi* , İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] **Andersson, P., Tamminen, J. and Sandström, C.E.,** 2002. Piston Ring Tribology, Helsinki University of Technology, Internal Combustion Engine Laboratory, VTT.

[7] **Yıldız, T., ve Gür, A.K.**, 2006. Aşınma sistemleri, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları.

[8] **Kato, K. and Adachi, K.,** 2001. Modern Tribology Handbook, *Tribology International*, **1**, pp. 279, Eds. Bhushan, B., CRC Pres, UK.

[9] **Kayalı, E., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoğlu, H.,** 1997. Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB, İstanbul.

[10] **Rabinowicz, E.,** 1995. Friction and Wear of Materials, John Wiley & Sons, New York.

[11] **Hutchings, I.M.,**1992. Tribology: Friction and Wear of engineering Materials, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, England.

[12] **Chang, Y.P., Chu, H.M., and Chou, H.M**., 2007. Effects of mechanical properties on the tribo-electrification mechanisms of iron rubbing with carbon steels, *Wear* **262;** 112-120.

[13] **Arnell, R.D., Davies, P.B.,Halling, J.,and Whomes T.L.,** 1991. Tribology: principles and design applications, Macmillan Education Ltd., London.

[14] İ.Ü. TBMYO İklimlendirme Soğutma Programı **<http:// www. istanbul.edu. tr /yuksekokullar/ teknikbilimler/ yed/>**, 20.06.2007.

[15] **Özkol, N.,** 1992. Soğutma Tekniği 1, Maya yayıncılık, TMMOB, Ankara.

[16] **Zorkun, M. E., Ardıç, A. R.,** 1980., Soğutma Tekniği ve Klima , Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.

[17] **Garland, N.P. and Hadfield, M.,** 2005. Tribological Analysis of Hydrocarbon Refrigerants Applied to the Hermetic compressor, *Tribology International*, **38**, 732– 739.

[18] **Wongwises, S. and Chimres, N**., 2005. Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator, *Energy conversion and Management,* **46**, 85-100.

[19] **James, R.W., Missenden, J.F.,** 1992. The use of propane in domestic refrigerators, *Int. J. Refrigeration*, **15**, 95–100.

[20] **Richardson, R.N., and Butterworth, JS.,** 1995. The performance of propane/isobutene mixtures in a vapour-compression refrigeration system. *Int. J. Refrigeration*, **18**, 58–62.

[21] **Jung, D., Park, B., and Lee, H.,** 1999. Evaluation of supplementary/retrofit refrigerants for automobile air-conditioners charged with CFC12. *Int J. Refrigeration*, **22**, 558–568.

[22] **Fukuta, M., Yanagisawa, T., Omura, M., and Ogi, Y.** , 2005. Mixing and separation characteristics of isobutane with refrigeration oil, *International Journal of Refrigeration*, **28**, 997-1005.

[23] **Wongwises, S., Kamboon, A., and Orachon B.**, 2006. Experimental investigation of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in an automotive air conditioning system, *Energy Conversion and Management*, **47**, 1644–1659.

[24] **Solzak, T.A., and Polycarpou, A.A.,** 2006. Tribology of WC/C Coatings For Use in oil-less piston-type Compressor, *Surface and Coating Technology,* **201**, 4260-4265.

[25] **Tuomas, R.,** 2006. Properties of oil and refrigerant mixtures, Lubrication of ball bearings in refrigeration compressors, *Doctoral Thesis*, Lulea University of Technology, Dept. of Applied Physic and Mech. Engineering, Sweden.

[26] **Bağcı, M.,** 2006. Yuvarlanmalı Yataklardaki Aşınma Olayı, Selçuk Üniversitesi Müh.–Mim. Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Konya.

[27] **Wu, Y.Y., Tsui, W.C. and Liu T.C.,** 2007. Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives, *Wear* **262,** 819-825.

[28] **Xiaa, Y., Liub, W., Xueb, Q.,** 2005. Comparative study of the tribological properties of various modified mild steels under boundary lubrication condition, *Tribology International,* **38**, 508–514.

[29] **Ciantar, C., Hadfield, M., Smith, A.M. , and Swallow, A**., 1999. The influence of lubricant viscosity on the wear of hermetic compressor components in HFC-134a environments, *Wear* **236**, 1–8.

[30] **Florea, O., Luca, M., Constantinescu, A., and Popescu, D**., 2002. Environmentally acceptable lubricating greases, *Journal of Synthatic Lubrication*, John Wiley & Sons, New York.

[31] **Bülbül, F.**, 2001. Katı Yağlayıcılar, *SCI,* Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Ocak 12.sayı.

[32] **Erdemir. A. and Bhushan, B. (Ed.),** 2001. Modern Tribology Handbook, II, CRC Press.

[33] **Erdemir, A.,** 1995. Lubrication from Mixture of Boric Acid with Oils and Greases, U.S. Patent No: 5, 431, 830.

[34] **Demas, N. G., Polycarpou, A.A., and Conry, T. F.,** 2005. Tribological Studies on Scuffing Due to the Influence of Carbon Dioxide Used as a Refrigerant in Compressors, *Tribology Transactions*, **48**, 336-342.

[35] **Yoon, H., Sheiretov, T. And Cusano, C.**, Scuffing of Area Contacts Under Starved Lubrication Conditions, *Tribology Transactions*, **43:4**, 722 – 730.

[36] **Yoon H., and Cusano, C**., 1999. Scuffing Under Dry Sliding Conditions - Part I: Experimental Studies, Todor Sheiretov, *Tribology Transactions* **41:4**, 435 – 446.

[37] **Duru, İ.N.** , 2000. Literatür çalışmaları, Arçelik A.Ş.

[38] **Shatsov, A. A.,** 2003. Powder Materials, Mechanical Properties Of Porous Materials, *Metal Science and Heat Treatment,* **45**, 11 – 12.

[39] **Wang, W.F.,** 2006. Effect of powder type and compaction pressure on the density, hardness, and oxidation resistance of sintered and steam-treated steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **16**, 533–538.

[40] **Wang, J., He, Y., and Danninger, H.,** 2003. Inflence of porosity on the sliding wear behaviour of sintered Fe-1.5Mo-0.7C steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **12**, 339-344.

[41] **Kostornov, A. G. and Fushchich, O. I.,** 2007. Exchange Of Experince Sintered Antifriction Materials, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **46**, 9-10.

[42] **Rau, G. and Krehl, M**.,1999. Sintered parts for automobile weight reductions, *PM ThyssenKrupp Conference*, Germany.

[43] **Kryachek V. M.,** 2004. Sintered Metals And Alloys Friction Composites: Traditions And New Solutions, I. Powder Materials, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **43**, 11-12.

[44] **Silva, W.M., Binder, R., and Mello, J.D.B.,** 2005. Abrasive wear of steam-treated sintered iron, *Wear,* **258**, 166-177.

[45] **Mello, J.D.B., and Hutchings, I.M.,** 2001. Effect of processing parameters on the surface durability of steam-oxided sintered iron, *Wear* **250**, 435-448.

[46] **Mello, J.D.B**., **Henara, L., and Binder C.R.** , 2007. Friction and wear behaviour of steam-oxided sintered iron components coated with manganese phospate, *Wear* **263:1-6**, 842-848.

[47] **Fainshmidt, E.M., Baskakov, A.P., Pumpyanskaya, T.A., and Zyryanov, V.G**., 1998. Anomalous oxidation of sintered porous steels in the process of steam oxide treatment, *Metal Science and Heat Treatment*, **40**, 7 – 8.

[48] **Song, H.J., Zhang Z.Z. and Luo, Z.Z**., 2006. Effects of solid lubricants on friction and wear bevaviours of the phenolic coating under different friction conditions, *Surface Coatings Technology*, **201**, 2760-2767.

[49] **Murakami, T., Kaneda, K., Nakano, M., Mano, H., Korenaga, A. and Sasaki, S.,** 2007. Friction and wear properties of Fe-Mo intermetallic compounds under oil lubrication, *Intermetallics,* **15,** 1573-1581.

[50] **Tuomas, R. and Jonsson, U.,** 2000. Influence of refrigerant viscosity and pressure-viscosity coefficient of refrigeration compressor lubricants, *Thinning Films and Tribological Interfaces*, **38**, 419-423.

[51] **Fukuta, M., Yanagisawa, T., Shimasaki, M. and Ogi, Y**. 2006. Real-time measurement of mixing ratio of refrigerant/refrigeration oil mixture, *International Journal of Refrigeration*, **29**, 1058-1065.

[52] **Zhelezny, P., Zhelezny, V., Procenko, D. and Ancherbak, S**. 2006. An experimental investigation and modellinf of the thermodynamic properties of isobutane-compressor oil solutions: some aspects of experimental methodology, *International Journal of Refrigeration*, **30**, 433-445.

[53**] Cansever, N.** 2005. Manyetik alanda sıçratma yönteminde son gelişmeler, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ders Notları.

[54] **Yang, T., Zhang, Y., Xiong, M., Liao, F. and Lin, J.,** 2008. Hydrothermal synthesis, structure and antiferromagnetism of $Mn[P_2O_5(OH)_2]$, *Solid State Sciences*, **10:12**, 1886-1890.

[55] **Zhang, T.H. and Huan, Y.**, 2005. Nanoindentation and nanoscratch behaviours of DLC coatings on different steel substrates, *Compos. Sci. Tech*., **65**, 1409-1414.

[56] **Bull, S.J.,** 1997. Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test. *Tribology International*, **39**, 491-498.

[57] **Arslan, E., Baran, Ö., Efeoglu, I. and Totik, Y**. 2008. Evaluation of adhesion and fatigue of MoS_2-Nb solid-lubricant films deposited by pulsed-dc magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology*, **202**, 2344-2348.

[58] **S. J. Bull,** 1999. Can scratch testing be used as a model for the abrasive wear of hard coatings?, *Wear* **233–235**, 412–423.

[59] **Xu, J., Zhou, Z.R., Zhang, C.H., Zhu, M.H. and Luo, J.B.,** 2007. An investigation of fretting behaviours of bonded solid lubricant coatings, *Journal of Materials Processing Technology*, **182**, 146-151.

[60] **Xia, Z.Z., Tu, J.P., Lai, D.M., Zhang, L.L., Wang, L.L., Wang, Q., Chen, L.M. and Chen W.X.,** 2006. Microstructure and tribological characterization of magnetron sputtered MoS_2 film deposited using nested structure material, *Surface Coatings Technology,* **201**, 1006-1011.

[61] **Arslan, E., Bülbül, F., Alsaran, A., Çelik, A. and Efeoğlu, I.** 2005. The effect of deposition parameters and Ti content on structural and wear properties of MoS_2-Ti coatings, *Wear,* **259**, 814-819.

[62] **Bülbül, F., Efeoğlu, I., and Arslan, E.**, 2007. The effect of bias voltage and working pressure on S/Mo ratio at MoS_2-Ti composite films, *Applied Surface Science*, **253**, 4415-4419.

ÖZGEÇMİŞ

Kemal SARIİBRAHİMOĞLU 1982 yılında İstanbul' da dünyaya gelmiştir. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde dört yıllık eğitimini başarı ile tamamlamıştır. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans Eğitimine başlamıştır. Halen İstanbul Teknik Üniversitesinde Yüksek Lisans Eğitimine devam etmektedir.

Yayın Listesi :

- **Sarıibrahimoğlu, K**. , Kızıl, H., Akşit, M.F., Efeoğlu, İ., Birol, F.S. "Tribological Behavior of Sintered Steel Under Starved Lubrication in R600a Environment" , İCAT 2008 , Singapore, December 2008

- **Sarıibrahimoğlu, K.** , Kızıl, H., Akşit, M.F., Efeoğlu, İ., Birol, F.S. "A study on wear rates of 100Cr6 steel running against sintered steel surfaces under dry and starved lubrication" , COM 2008, Winnipeg, Manitoba Canada, August 2008