

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİNİN AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Murat ERGÜLER**

Anabilim Dalı : MÜHENDİSLİKTE İLERİ TEKNOLOJİLER

Programı : MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2005

**BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİNİN AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Murat ERGÜLER
(706021011)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2005**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mustafa ÜRGEN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ali Fuat ÇAKIR (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç.Dr. Levent TRABZON (İ.T.Ü.)**

ŞUBAT 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında, çok değerli fikirleriyle yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen sevgili hocam Prof. Dr. Mustafa Ürgen'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, çalışmanın her aşamasında değerli mühendislik tecrübesi ve bilgilerini benimle paylaşan ve motive eden Sn. Dr. Feriha Sertçelik Birol, Sn. İrem Duru, Sn. Dr. Hüsnü Kerpiççi ve Sn. Fatih Özkadı'ya çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışma sırasındaki yardımlarından dolayı, Sn. Turgay Gönül, Sn. Fikri Çavuşoğlu, Sn. Necati Sönmez başta olmak üzere tüm Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi çalışanlarına teşekkür ederim.

Her türlü bilgi ve malzeme ihtiyacının zamanında ve eksiksiz olarak karşılanmasındaki desteklerinden dolayı başta Sn. Ersin Öztaş, Sn. Yusuf Şahin ve Sn. Bora Abdik olmak üzere tüm Arçelik A.Ş. Eskişehir Kompresör İşletmesi Ürün Geliştirme Bölümü çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca malzeme teminindeki yardımlarından dolayı Tozmetal A.Ş. ve Bimed A.Ş. çalışanlarına teşekkür ederim.

Başta Sn. Avni Büyüközer, Sn. Barış Ünal ve Sn. Serkan Yüzer olmak üzere, bu iki yıllık süreçte yardım ve desteklerini esirgemeyen tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Son olarak ve en önemlisi, aileme çok teşekkür ederim. Yakınımda değil ama hep yanımda oldukları için..

İstanbul, Şubat, 2005

Murat ERGÜLER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL TRİBOLOJİK KAVRAMLAR	3
2.1. Sürtünme	3
2.2. Aşınma Tanımı ve Çeşitleri	5
2.2.1. Adhesif Aşınma (Yapışma Aşınması)	7
2.2.2. Abrasif Aşınma	10
2.2.3. Yorulma Aşınması	11
2.2.4. Kazımalı Aşınma	13
2.2.5. Korozif Aşınma	13
2.2.6. Erozif Aşınma	14
2.3. Aşınmayı Etkileyen Parametreler	15
2.3.1. Tasarım Parametreleri	16
2.3.1.1. Temas Geometrisi	17
2.3.1.2. Hareket Şekli	18
2.3.2. Yağlama Parametreleri	18
2.3.2.1. Hidrostatik Yağlama	20
2.3.2.2. Hidrodinamik Yağlama	20
2.3.2.3. Elastohidrodinamik Yağlama	21
2.3.2.4. Karışık Yağlama	21
2.3.2.5. Sınır Yağlama	22
3. HERMETİK KOMPRESÖRLERDE AŞINMA PROBLEMİ	23
3.1. Hermetik Kompresörlerin Çalışma Prensipleri :	23
3.2. Kompresör Mekanik Sisteminin Tanıtılması	24

3.3. Kompresör Yataklarında Karşılaşılan Aşınma Problemi :	26
3.4. Aşınma Probleminin Çözümüne Yönelik Uygulamalar	26
3.4.1. Biyel Üzerine Uygulanabilecek Yüzey İşlemleri	26
3.4.1.1. Buhar İşlemi	27
3.4.1.2. Mangan Fosfat Kaplama	28
3.4.2. Perno Yüzeyine Uygulanabilecek Yüzey İşlemleri	29
3.4.2.1. Gaz Nitrürleme	29
4. AŞINMA – SÜRTÜNME DENEY DÜZENEKLERİ	31
4.1. Pin on Disk Test Cihazı	32
4.2. Pin & V Block Test Cihazı	33
4.3. Ball on Flat Test Cihazı	34
4.4. Block on Ring Test Cihazı	35
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
5.1. Block on Ring Cihazı Test Ünitesi	37
5.1.1. Yağ Haznesi Tasarımı	38
5.2. Block on Ring Cihazı Kontrol Ünitesi	38
5.2.1. Sıcaklık Kontrolü	39
5.2.2. Hız Kontrolü	39
5.2.3. Sürtünme Katsayısı Ölçümü Çalışmaları	39
5.3. Blok ve Halka Numunelerinin Hazırlanması	42
5.4. Malzeme Karakterizasyonu Çalışmaları	43
5.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	43
5.6. Sertlik Ölçümleri	43
5.7. Aşınma Deneyleri	44
5.7.1. Blok Aşınma Hacmi Ölçümü	44
5.7.2. Halka Aşınma Derinliği Ölçümü	45
5.7.3. Sürtünme Katsayısı Ölçümü	46
6. DENEY SONUÇLARI	47
6.1. Malzeme Karakterizasyonu Çalışmaları	47
6.1.1. Kimyasal Bileşimlerin Belirlenmesi	47
6.1.2. Mangan Fosfat Kristal Yapısı	47
6.1.3. Nitrür Tabakası	48
6.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	49
6.3. Sertlik Ölçümleri	49
6.4. Aşınma – Sürtünme Katsayısı Ölçümleri	50

7. SONUÇLAR VE İRDELEMELER	52
KAYNAKLAR	60
EKLER	62
ÖZGEÇMİŞ	76

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 5.1 Deney parametreleri	44
Tablo 6.1 Blok ve Halka numunelerinin kimyasal bileşimleri	47
Tablo 6.2 Blok ve halka numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri.	49
Tablo 6.3 Blok numunelerinin sertlik değerleri	49
Tablo 6.4 Halka numunelerinin sertlik değerleri	49
Tablo 6.5 Buhar işlemi uygulanmamış blok – ısıtılmış ve nitrürlü halka deney sonuçları.	50
Tablo 6.6 Mnfosfat kaplı blok – ısıtılmış ve nitrürlü halka deney sonuçları.	50
Tablo 6.7 Blok aşınma hacmi ve aşınma izi derinliklerinin karşılaştırması.	51

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 2.1 Kayma veya yuvarlanma sırasında hareketin gerçekleşmesi için gerekli olan sürtünme kuvveti.....	4
Şekil 2.2 Süre ve yer değişiminin fonksiyonu olarak sürtünme kuvveti.....	4
Şekil 2.3 Tribolojik sistemin şematik görüntüsü	6
Şekil 2.4 Tipik aşınma prosesleri	7
Şekil 2.5 Adhezif aşınma sonucu aşınma partikülünün oluşumu	8
Şekil 2.6 İki elemanlı ve üç elemanlı abrasif aşınmanın şematik gösterimi	10
Şekil 2.7 Yüzey altında oluşan çatlaklar nedeniyle gerçekleşen yorulmalı aşınma... ..	12
Şekil 2.8 Korozif aşınma modeli	14
Şekil 2.9.a. Erozif aşınma b. Kavitasyonla aşınma mekanizmaları	14
Şekil 2.10 Aşınma ve sürtünmeyi etkileyen parametreler.	16
Şekil 2.11 (a) Konform ve (b) Konform olmayan temas geometrileri.....	17
Şekil 2.12 Hareket şekillerinin şematik gösterimi.	18
Şekil 2.13 Yağlama mekanizmalarının sınıflandırılması	19
Şekil 2.14 Stribeck eğrisi	20
Şekil 2.15 Hidrodinamik yağlamada basınç oluşumu.....	21
Şekil 2.16 Sınır yağlayıcıların işleyiş mekanizması	22
Şekil 3.1 Soğutma çevriminin şematik görüntüsü.....	23
Şekil 3.2 Kompresör mekanik sistemi komponentleri	25
Şekil 3.3 Kompresör mekanik sisteminin kesit görüntüsü.....	25
Şekil 3.4 Nitrürlenmiş tabaka boyunca aşınma direncinin değişimi.....	30
Şekil 4.1 Tribolojik deney kategorileri	31
Şekil 4.2 Pim ve disk numunelerin temas geometrileri	32
Şekil 4.3 Pin & V Block test cihazı standart pim ve V bloğu numuneleri.....	33
Şekil 4.4 Pin & V Block test cihazının çalışma mekanizması	34
Şekil 4.5 Ball on flat test cihazı şematik görünüşü	35
Şekil 4.6 Falex Block on Ring cihazı standart blok ve halka numuneleri	36
Şekil 5.1 Falex Block on Ring cihazı test ünitesi, numune ve adapter görüntüleri ...	37
Şekil 5.2 Yağ haznesi şematik çizimi ve bağlantı görüntüleri	38
Şekil 5.3 Block on Ring cihazı kontrol ünitesi	39
Şekil 5.4 Deney düzeneğindeki yük akışının şematik görünüşü.....	40
Şekil 5.5 Load cell kalibrasyon verileri	40
Şekil 5.6 Veri alma sistemi tarafından toplanan sürtünme kuvveti (mV).....	41
Şekil 5.7 Newton'a dönüştürülen ve filtrelenen veriler kullanılarak	41
Şekil 5.8 Blok numunelerinin teknik resim görüntüsü.....	42
Şekil 5.9 Halka numunesinin teknik resim görüntüsü	43
Şekil 5.10 Blok numunesi aşınma izi görüntüsü.....	45
Şekil 5.11 Basılan sertlik izinin (a) deney öncesi, (b) deney sonrası görüntüsü.....	46
Şekil 6.1 1 no.lu blok malzemesi üzerine yapılan mangan fosfat kaplamanın	48
Şekil 6.2 Nitrürlenmiş halka numunesinin kesit görüntüsü	48
Şekil A.1.1 Mnfosfatlı 1 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (700x)	62
Şekil A.1.2. Mnfosfatlı 1 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (1500x).....	62

Şekil A.2.1. Mnfosfatlı 2 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (700x).....	62
Şekil A.2.2. Mnfosfatlı 2 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (1500x).....	62
Şekil A.3.1. Mnfosfatlı 3 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (700x).....	62
Şekil A.3.2. Mnfosfatlı 3 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (1500x).....	62
Şekil B.1. Blok numunelerinin aşınma hacimlerinin karşılaştırma diyagramı.....	63
Şekil B.2. Blok numunelerinin aşınma iz derinliği karşılaştırma diyagramı.....	64
Şekil B.3. Halka numunelerinin aşınma iz derinliği karşılaştırma diyagramı.....	65
Şekil B.4. Sürtünme katsayısı verilerinin karşılaştırma diyagramı.....	66
Şekil C.1. Mnfosfat kaplı 1 no.lu blok - ısıtma işlemli halka sürtünme katsayısı eğrisi.....	67
Şekil C.2. Mnfosfat kaplı 2 no.lu blok - ısıtma işlemli halka sürtünme katsayısı eğrisi.....	67
Şekil C.3. Mnfosfat kaplı 3 no.lu blok - ısıtma işlemli halka sürtünme katsayısı eğrisi.....	67
Şekil D.1. Mnfosfat kaplı 1 no.lu blok - nitrürlü halka sürtünme katsayısı eğrisi.....	68
Şekil D.2. Mnfosfat kaplı 2 no.lu blok - nitrürlü halka sürtünme katsayısı eğrisi.....	68
Şekil D.3. Mnfosfat kaplı 3 no.lu blok - nitrürlü halka sürtünme katsayısı eğrisi.....	68
Şekil E.1. Kaplamsız 1 no.lu blok numunesinin genel görüntüsü (500x).....	69
Şekil E.2. Kaplamsız 2 no.lu blok numunesinin genel görüntüsü (500x).....	69
Şekil E.3. Kaplamsız 3 no.lu blok numunesinin genel görüntüsü (500x).....	69
Şekil F.1.1. Isıtma işlemli halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	70
Şekil F.1.2. Isıtma işlemli halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	70
Şekil F.2.1. Isıtma işlemli halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	70
Şekil F.2.2. Isıtma işlemli halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	70
Şekil F.3.1. Isıtma işlemli halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	70
Şekil F.3.2. Isıtma işlemli halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	70
Şekil G.1.1. Nitrürlü halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	71
Şekil G.1.2. Nitrürlü halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	71
Şekil G.2.1. Nitrürlü halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	71
Şekil G.2.2. Nitrürlü halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	71
Şekil G.3.1. Nitrürlü halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	71
Şekil G.3.2. Nitrürlü halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	71
Şekil H.1.1. Isıtma işlemli halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	72
Şekil H.1.2. Isıtma işlemli halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	72
Şekil H.2.1. Isıtma işlemli halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	72
Şekil H.2.2. Isıtma işlemli halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	72
Şekil H.3.1. Isıtma işlemli halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	72
Şekil H.3.2. Isıtma işlemli halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	72

Şekil I.1.1. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	73
Şekil I.1.2. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	73
Şekil I.2.1. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	73
Şekil I.2.2. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	73
Şekil I.3.1. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	73
Şekil I.3.2. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu blok numunesi (aşınma izi - 1000x).....	73
Şekil J.1.1. Kaplamasız 1 no.lu blok ile çalışan ısıtılmış halka numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	74
Şekil J.1.2. Kaplamasız 1 no.lu blok ile çalışan ısıtılmış halka numunesi (aşınma bölgesi - 1000x).....	74
Şekil J.2.1. Mnfosfatlı 1 no.lu blok ile çalışan ısıtılmış halka numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	74
Şekil J.2.2. Mnfosfatlı 1 no.lu blok ile çalışan ısıtılmış halka numunesi (aşınma bölgesi - 1000x).....	74
Şekil J.3. Isıtılmış halka numuneleri yüzeyinde görülen çatlak izi (aşınmamış bölge - 700x).....	74
Şekil K.1.1. Kaplamasız 3 no.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	75
Şekil K.1.2. Kaplamasız 3 no.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi - 1000x).....	75
Şekil K.2.1. Mnfosfatlı 3 no.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi - 200x).....	75
Şekil K.2.2. Mnfosfatlı 3 no.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi - 1000x).....	75

SEMBOL LİSTESİ

μ	: Sürtünme katsayısı
F	: Teğetsel kuvvet
W	: Normal kuvvet (Yük)
F_s	: Statik sürtünme katsayısı
F_k	: Kinetik sürtünme katsayısı
μ_s	: Statik sürtünme katsayısı
W_{ad}	: Aşınma oranı
K	: Aşınma katsayısı
V	: Aşınma hacmi
L	: Kayma mesafesi
η	: Yağlayıcı vizkozitesi
v	: Kayma hızı
P	: Temas basıncı
σ	: Karşılıklı çalışan yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğü
h	: Sıvı film kalınlığı
h_{min}	: Minimum film kalınlığı
R_a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
R_z	: En yüksek 5 tepe ile en derin 5 vadi arasındaki uzaklık
t	: Blok genişliği
b	: Ortalama aşınma iz genişliği
D	: Halka çapı
d_o	: Sertlik izi köşegeninin aşınma deneyi öncesi boyutu
d_f	: Sertlik izi köşegeninin aşınma deneyi sonrası boyutu
C	: Sertlik deneyinde kullanılan uca bağlı sabit
z	: Aşınma iz derinliği

BUZDOLABI KOMPRESÖR YATAKLARININ AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde daha verimli ve daha sessiz buzdolabı kompresörleri üretilmesi amacıyla yapılan çalışmalar temelde, termodinamik, mekanik ve titreşim - akustik bilim dalları altında sürdürülmektedir. Bu üç araştırma dalı arasında mekanik kısım, yatak adı verilen ve hareketli parçalar arasında yük taşıma görevini yerine getiren makine elemanlarının, sürtünme ve yağlama problemleri nedeniyle gerçekleşen kayıplarını incelemektedir. Bu amaçla, yağlama ve yağın kimyası ile ilgili çalışmalar ile birlikte sürtünme ve aşınmayı azaltacak kendinden yağlamalı yatak malzemeleri, yüzey işlemleri ve kaplamalar araştırılmaktadır. Bu çalışmada yağlama ve yağlayıcılar ile ilgili konulardan çok, uygun malzeme ve yüzey işlemi seçimi üzerinde durulmuştur.

Çalışmanın amacı, kompresör yatakları arasında aşınmanın yoğun olarak görüldüğü biyel – perno çifti için, tribolojik özelliklerinin tanımlanması ve geliştirilmesidir. Bu amaçla, ilk olarak triboloji biliminin temel kavramları olan sürtünme, aşınma ve yağlama hakkında bilgi verilmiş, ardından bu temel bilgiler ışığında kompresördeki aşınma problemi tanımlanmıştır.

Kompresörde yetersiz yağlama nedeniyle gözlemlenen aşınma problemini laboratuvar şartlarında simüle edebilecek, tribometre olarak da adlandırılan aşınma – sürtünme deney düzenekleri hakkındaki genel bilgi çalışmanın dördüncü bölümünde özetlenmiştir.

Bu bölümü takip eden deneysel çalışma kısmında, kullanılan block on ring tipi aşınma – sürtünme deney düzeneğinin kompresör şartlarını daha iyi simüle etmesi için gerçekleştirilen modifikasyonlar ile birlikte deneyler sırasında kullanılan malzeme ve yüzey işlemleri ile ilgili özet bilgi bulunmaktadır.

Çalışmanın son bölümü ise gerçekleştirilen bütün ölçümlerin sonuçlarının verilmesi ve bu sonuçların irdelenmesi için ayrılmıştır.

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF REFRIGERATION COMPRESSORS

SUMMARY

Nowadays, the work done for producing more efficient and silent refrigeration compressors can be classified in three areas, namely thermodynamics, mechanics and vibration – acoustics. Among these headings, mechanical part is interested in losses occurring by lubrication and frictional problems of bearings. To lessen frictional losses and wear on refrigeration compressor bearings, beside subjects like lubrication and chemistry of oils, self-lubricating surface treatments and coatings are also being focused. This work mainly concentrates on last part, which is about convenient material and surface treatment selection.

The aim of this project is identifying the wear problem of most worn bearing materials on compressors, namely connecting rod – wrist pin, and improving tribological properties of this pair. To do this, fundamental subjects of tribology science are primarily introduced and with these data, wear problem on compressor bearings is better identified.

Probable friction and wear testing machines which may be used for simulating the wear problem of compressors due to loss of lubrication, are summarized in the forth chapter of thesis work.

In the next chapter, in experimental part, modifications made on the block on ring type friction and wear test machine to better simulate compressor working conditions are described. In addition to those mentions, specimen, material types, surface treatment and coatings are also being focused in this part.

Finally, the results of all these measurements are introduced and discussed in the last section of this work.

1. GİRİŞ

Buzdolabı kompresörlerinde, tribolojik anlamda çözülmesi veya iyileştirilmesi istenen temel iki sorun yatakların daha iyi yağlanması ve yatak malzemelerinin ömrünün artırılmasıdır. Tasarım ile ilgili yapılabilecek yeniliklerin yanı sıra, yatak malzemesi olarak kendinden yağlama özelliğine sahip malzeme ve/veya yüzey işlemlerinin kullanılması her iki problem için de alternatif çözüm yöntemlerinden birisidir.

Kompresör yataklarında, özellikle biyel perno deliği – perno yatağında karşılaşılan ana problem, yağın kalkış anlarında bu yatağa yeteri miktarda ulaştırılmaması ve bunun neticesinde yatak yüzeylerini birbirlerinden ayıracak kalınlıkta yağ filminin oluşmamasıdır. Metal – metal temasının baskın olduğu bu durumda ara yüzeydeki aşınma mekanizmasının belirlenmesi sorunun çözümü açısından önemli ipuçları verebilir. Yüzeylerin teması sırasında, bir yüzeyden kopan aşınma partiküllerinin diğer yüzeye sıvanması sonucunda adhezif, yüzeylerden birinin diğerini çizmesi durumunda abrasif veya tekrarlı yüklerin uygulanması sonucunda yorulmalı aşınma v.b. mekanizmalar baskın olabilir.

Tribolojik bir sistemi, ağırlaştırılmış şartlarda simüle ederek, yukarıda belirtilen aşınma mekanizmaları, aşınma miktarı, sürtünme katsayısı, v.b. parametreleri göreceli olarak karşılaştırmaya yarayan pek çok aşınma – sürtünme deney düzeneği bulunmaktadır. Bu çalışma için, literatürde bulunan standart test cihazlarının hemen hemen hepsi araştırılmış ve ulaşılabilir durumda olanlar arasından en uygunu olan block on ring tipi test cihazı, kompresör şartlarını daha iyi simüle etmesi için çeşitli modifikasyonlardan geçirilmiştir.

Eş zamanlı olarak gerçekleştirilen literatür çalışmaları neticesinde, üretimde kullanılan sinter biyel malzemesine alternatif alaşımlar belirlenmiştir. Ayrıca, toz metalürjisi ile üretilmiş malzemelerin aşınma direncinin arttıran, kendinden yağlama özelliğine sahip mangan fosfat kaplama işlemi buhar işlemi ile beraber araştırılmış ve deney planı içerisinde yer almıştır. Perno malzemesi için ise, ısıl işlem (su verme) ve nitrürlemenin aşınma özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Yukarıda adı geçen malzeme ve yüzey işlemlerinin her birisi, Falex Corp. şirketine ait #1 Block on Ring aşınma – sürtünme deney cihazı yağlı ortam koşullarında, kompresör çalışma şartlarına benzer ortam ve ağırlaştırılmış yük koşullarında test edilmiştir. Deneyler sırasında biyeli temsil eden blok numuneleri c farklı sinter malzemededen, pernoyu temsil eden halka numuneleri ise 100Cr6 (AISI 52100) eliğinden hazırlanmıştır. Deneyler öncesinde sinter esaslı blok malzemelerinin gözenek yapısı, mangan fosfat kaplamanın kristal yapısı, ısıl işlemlili ve nitrürlü halkaların yüzey görüntüleri çekilmiş; aynı zamanda her bir blok ve halka numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve sertliği ölçümü gerçekleştirilmiştir.

2. TEMEL TRIBOLOJİK KAVRAMLAR

Yunanca “tribo” (sürtünme) kelimesinden türetilmiş olan triboloji, birbiri ile temas halinde relatif olarak hareket etmekte olan yüzeyleri inceleyen bilim ve teknoloji dalı olarak tanımlanabilir ve sürtünme, aşınma, yağlama konularını kapsamaktadır [1].

Yüksek oranda sürtünmenin tercih edilir olduğu otomobil fren sistemi ve lastikleri ile yüksek miktarda aşınma istenen metalik yüzeylerin parlatılması gibi birtakım istisnai uygulamaların dışında, sürtünme ve aşınma, mekanik sistemlerin ömrünün, veriminin artırılması ve enerji tasarrufu sağlanması amacıyla önüne geçilmesi gereken iki önemli mühendislik problemidir [1]. Bu iki problemi çözmeye yönelik olarak, malzeme, tasarım, yağlama parametreleri ile çevre şartlarının optimizasyonu gerekmektedir. Malzeme ile ilgili değişikliklere vakum altında yapılan sert seramik kaplamalar ve kendinden yağlama özelliğine sahip katı yağlayıcıların kullanılması verilebilir. Tasarım ile ilgili parametreler ise parçaların çalışma şartları (yük, hız, titreşim v.b.) içermektedir. Bunun yanında yağ viskozitesi ve yağın, kuru sürtünme bulunan bölgelere daha etkin bir biçimde iletilmesi de sürtünme ve aşınma problemlerinin engellenmesine yardımcı olacaktır. Son olarak parçaların çalışma anındaki sıcaklık, nem, atmosfer şartlarının da göz önünde bulundurulmaları gerekmektedir [2].

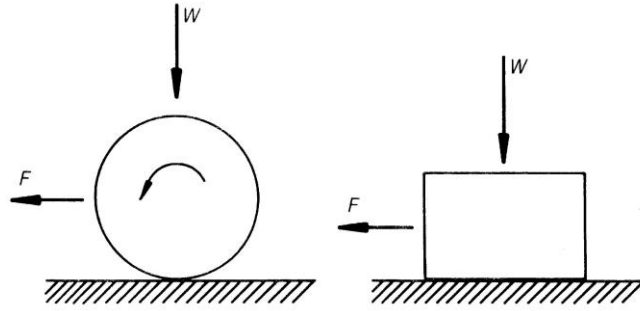
Çalışmanın bu bölümünde triboloji biliminin temelini oluşturan sürtünme, aşınma, yağlama terimleri ve bunları etkileyen parametreler anlatılacaktır:

2.1. Sürtünme

Sürtünme, birbiri ile temas halinde bulunan yüzeylerden katı yüzeylerden birinin diğeri üzerinde gerçekleştirdiği kayma veya yuvarlanma hareketine karşı gösterilen dirençtir. Hareket yönüne tamamen zıt yönde görülen bu direnç kuvveti, sürtünme kuvveti olarak adlandırılır. Şekil 2.1.’deki gibi ideal kayma veya yuvarlanma şartlarında, üstte bulunan cisim sabit karşı yüzey üzerinde hareket ettirebilmek için teğetsel bir kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teğetsel kuvvet (F) ile cisim üzerine

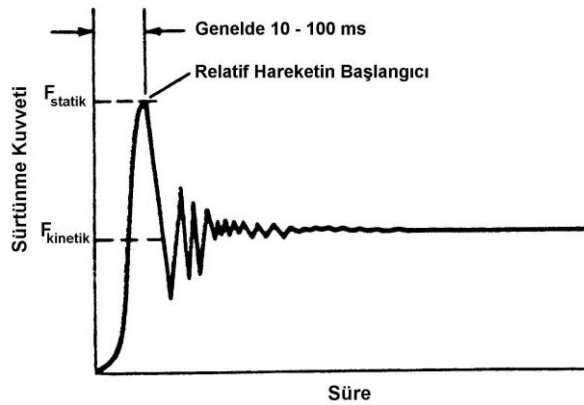
uygulanmakta olan kuvvet (F_N) arasındaki oran μ sembolü ile belirtilen sürtünme katsayısı değerini vermektedir [1,3].

$$\mu = F/F_N \quad (2.1.)$$



Şekil 2.1 Kayma veya yuvarlanma sırasında hareketin gerçekleşmesi için gerekli olan sürtünme kuvvetleri [1].

Üzerine yük uygulanmakta olan iki katı yüzey arasında hareketin başlaması için gerekli olan teğetsel kuvvete statik sürtünme kuvveti (F_{statik} veya F_s); gerçekleşmeye başlayan bu hareketin devam edebilmesi için gerekli olarak kuvvete ise kinetik sürtünme kuvveti (F_{kinetik} veya F_k) adı verilir. Genelde kayma başladıktan sonra sürtünme kuvveti değerlerinde bir azalma gözlenmektedir. Bu nedenle statik sürtünme kuvveti dinamik sürtünme kuvvetinden eşit büyük veya ona eşittir. Şekil 2.2.'de statik ve dinamik sürtünme kuvvetleri sürenin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir [3].



Şekil 2.2 Süre ve yer değişiminin fonksiyonu olarak sürtünme kuvveti [3]

Sürtünmenin pek çok uygulama için geçerli olan ve Amonton kanunları adı verilen 2 önemli kuralı bulunmaktadır. Bunlar;

- Sürtünme kuvveti cisim üzerine uygulanan kuvvet ile orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti görülen temas alanından bağımsızdır.

Bu kanunlardan ilki, (2.1.)’deki formülü ifade etmektedir ve sürtünme kuvvetinin uygulanan yük değerinden bağımsız bir sabit olduğunu belirtir. θ açısına sahip bir düzlemde kaymakta olan bir cisme ait $\mu_s = \tan\theta$ eşitliği de bu kanunu doğrulamaktadır. Bu eşitliğe göre, cisim üzerine uygulanan yük miktarında herhangi bir değişim olmadan düzlemin eğimini değiştirerek cismin harekete başlamasını veya durmasını sağlamak mümkündür [3].

İkinci kanun ise, sürtünme kuvvetinin birbirine temas etmekte olan iki yüzey arasındaki temas alanından ve cisimlerin fiziksel büyüklüklerinden bağımsız olduğunu bildirmektedir. Bowden ve Tabor tarafından ahşap bir malzemenin çelik yüzeyine yağlayıcının bulunmadığı bir ortamda sürtülmesi ile yapılan deneylerde temas alanının 250 kat artması durumunda bile sürtünme katsayısının sabit olduğu görülmüştür. [1]

Diğer ikisinden daha az bilinmekle birlikte, sürtünme ile ilgili bir üçüncü kanun daha bulunmaktadır. Buna göre, kayma hareketinin başlaması için gerekli olan sürtünme kuvveti (F_s), hareketin sürdürülmesi için gerekli olandan (F_k) daha fazladır. Ayrıca yine üçüncü kanuna göre, kayma hareketi başladıktan sonra kayma hızında meydana gelen değişimler dinamik sürtünme katsayısı değerini etkilemez.

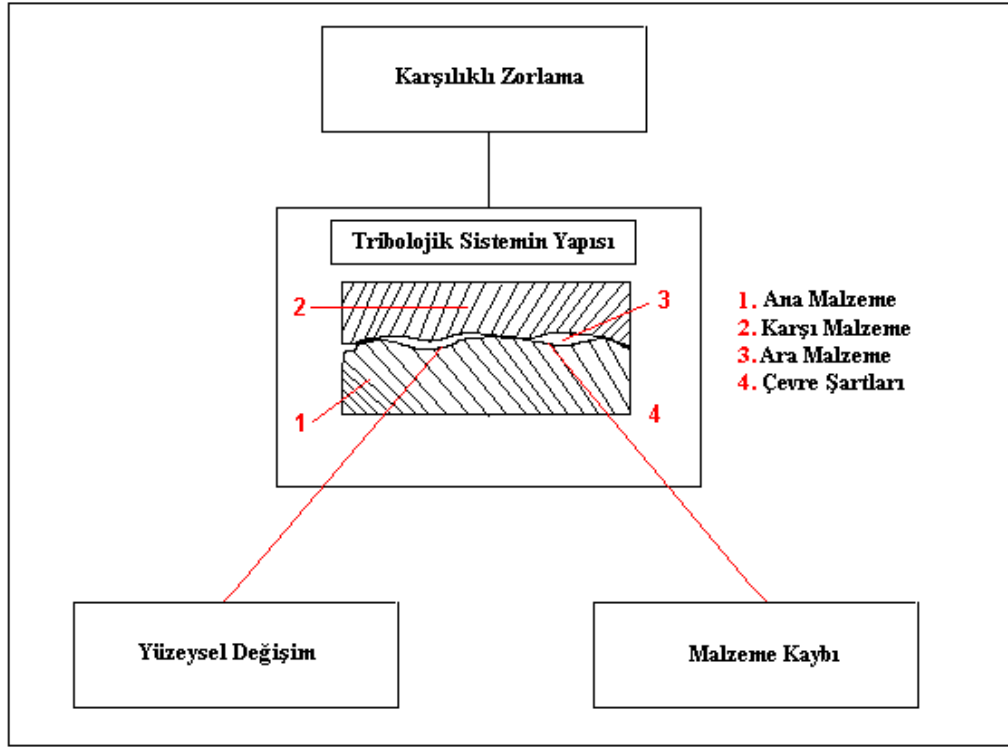
2.2.Aşınma Tanımı ve Çeşitleri

Birbirine temas eden mühendislik malzemelerinin, birbirlerine sürtünmesi neticesinde meydana gelen aşınma, kullanılan makine ve teçhizat üzerinde önemli ekonomik kayıplara sebep olabilmektedir. Aşınma, en genel tanımıyla, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır [4].

Aşınma sistemini oluşturan temel unsurlar,

- Ana Malzeme (Aşınan),
- Karşı malzeme (Aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük,
- Hareket

başlıkları altında toplanabilir. Bu unsurların tamamı Şekil 2.3.'de şematik olarak gösterilen "tribolojik sistemi" oluşturmaktadır. Bu unsurları aynı zamanda aşınmaya etki eden faktörler başlığı altında da toplamak mümkündür. Her bir parametrenin etkisi ile ilgili detaylı bilgi "aşınmayı etkileyen parametreler" başlığı altında anlatılacaktır.






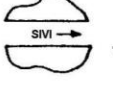


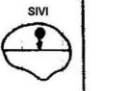
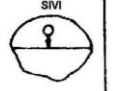

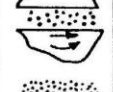

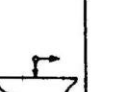
Şekil 2.3 Tribolojik sistemin şematik görüntüsü [4]

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir: Bunlar bölgesel aşınmalar, kimyasal çözünme ve parçaların yüzeyden fiziksel olarak ayrılmasıdır. İleriki bölümlerde açıklanacak olan kompresörlerdeki aşınma problemi de dahil olmak üzere pek çok mühendislik uygulamasında yüzeyden fiziksel olarak ayrılan malzemelerin sebep olduğu hasarlar olarak gözlemlenmektedir [4].

Farklı kişilere farklı anlamlar ifade eden pek çok aşınma mekanizması bulunmaktadır. Bunlara, adhezif, abrasif, yorulma, korozif, kazımalı aşınma ve katı-sıvı partiküllerinin neden olduğu erozif aşınma örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte aşınma prosesinin tanımı kesin değildir ve vurgulanmak istenen özelliğe göre farklı şekillerde anlatılabilir. Örneğin, tozlu bir atmosferde karşılıklı olarak çalışmakta olan malzeme çiftinde görülen aşınma, kuru aşınma, metalik aşınma, kaymalı aşınma, kazımalı aşınma veya abrasif aşınma şeklinde tanımlanabilir. Aşınma ilgili terimlerdeki bu belirsizlik nedeniyle, aşınma türlerini sınıflayan bir

şemaya ihtiyaç duyulmuştur. Literatürde Siebel tarafından hareket şekline bağımlı olarak ve Burwell ve Bhushan tarafından aşınma mekanizması türüne göre yapılmış olan sınıflandırmalar bulunmaktadır [5].

Aşınan ve aşındıran malzemelerin temasına bağılı olarak yapılan sınıflandırma Şekil 2.4.'de bulunmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre, tek fazlı aşınmada, kayma yüzeyine bağılı olarak hareket eden katı, sıvı veya gaz molekülleri yüzeyden malzeme kaybına neden olur. Çok fazlı aşınmada da malzeme kaybı bir yüzey boyunca hareket eden katı, sıvı veya gaz nedeniyle meydana gelir ancak bu durumda katı, sıvı veya gaz molekülleri aşınmayı oluşturan ikinci bir fazı (çıkıntı, sıvı damlası, gaz kabarcığı gibi) taşıyıcı olarak görev yapar [5].

Taşıyıcı ↓	TEK FAZLI AŞINMA	ÇOK FAZLI AŞINMA					
		KATI PARTİKÜLÜ		SIVI PARTİKÜLÜ		GAZ BUHARI PARTİKÜLÜ	
		AŞINMA YÜZEYİ HAREKETLİ	TAŞIYICI ve PARTİKÜL HAREKETLİ	AŞINMA YÜZEYİ HAREKETLİ	TAŞIYICI ve PARTİKÜL HAREKETLİ	AŞINMA YÜZEYİ HAREKETLİ	TAŞIYICI ve PARTİKÜL HAREKETLİ
KATI	1 	4 	5 	10 —	11 —	16 —	17 —
SIVI	2 	6 	7 	12 —	13 	18 —	19 
GAZ	3 	8 	9 	14 —	15 	20 —	21 —

Şekil 2.4 Tipik aşınma prosesleri [5]

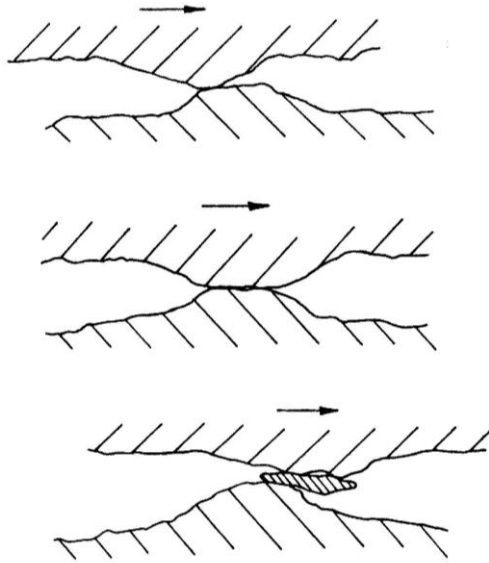
Aşağıda detaylı olarak incelenecek olan aşınma mekanizmaları birbirinden oldukça farklı ve bağımsız 6 ana başlığa ayrılmıştır. Bunlar sırasıyla; *adhezif*, *abrasif*, *yorulmalı*, *kazımalı*, *korozif* ve *erozif* aşınmadır.

2.2.1. Adhezif Aşınma (Yapışma Aşınması)

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen oluşması ve ardından geçen sürede hasarı hızlandırıcı etkisi bulunmaz. Adhezif aşınma genel olarak, birbiri üzerinde kayma sürtünmesi

gerçekleştiren metal – metal çiftlerinde, iki yüzeyin birinden kopan partiküllerin diğer yüzeye yapışması sonucunda gerçekleşir [4].

Temas halindeki yüzeylere normal bir yük uygulandığında, çıkıntı noktalarındaki basınç değerleri oldukça yüksek değerlere çıkar. Bazı durumlarda akma gerilmesi değerini aşarak, gerçek temas alanı uygulanan yükü kaldırabilecek duruma gelene kadar plastik deformasyona uğrar. Bu durumda ara yüzeyde bulunan bir film tabakası plastik deformasyona uğrayan yüzeylerin birbirlerine yapışmasına engel olacaktır ancak relatif hareket sırasında malzeme yüzeylerinin birbirinden bir film tabakası ile ayrılamaması durumunda soğuk kaynaklaşma meydana gelebilir. Devam eden kayma hareketi birleşme noktalarının yırtılmasına ve yeni birleşme noktalarının oluşmasına sebep olur. Bu prosesin çalışma koşullarında birçok kez tekrarlanması ile bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi yani adhezif aşınma kendini hissettirecek boyutlara ulaşacaktır. Şekil 2.5.'de adhezif aşınmanın oluşma mekanizması şematik olarak görülmektedir [4,5].



Şekil 2.5 Adhezif aşınma sonucu aşınma partikülünün oluşumu [5]

Adhezif aşınma karşılıklı olarak çalışmakta olan farklı malzeme çiftlerinin birbirleriyle katı çözeltiler veya metaller arası bileşikler oluşturma eğilimleri ile doğrudan ilgilidir. Metallerin birbirleri içerisinde çözünübilirliği veya metalürjik uyumluluğu, temas halindeki malzemelerin atomlarının birbirlerini çekme derecesini göstermektedir. Bağ yapıları açısından göz önüne aldığımızda ise malzeme transferi, bağ yapısı zayıf olandan kuvvetli olana doğru gerçekleşecektir. Bunların yanı sıra

malzeme çiftinin elektronik ve kristal yapısı ile kristal yönlenmesi de ara yüzeyde meydana gelecek adhezyonda etkin rol oynamaktadır [5].

Adhezif aşınma prosesi neticesinde oluşan aşınma, 2.2. no.lu eşitlikteki Archard denklemi ile açıklanmıştır. Buna göre;

W_{ad}: Aşınma oranı

K: Aşınma katsayısı

V: Aşınma hacmi

L: Kayma mesafesi

W: Normal yük

H: Daha yumuşak olan malzemenin sertliği olmak üzere,

$$W_{ad} = \frac{V}{L} = K \frac{W}{H} \text{ 'dir.} \quad (2.2.)$$

Bu denklem, aşınma oranı hesabı için sertliği tek malzeme özelliği olarak kabul etmektedir. Fakat aşınma katsayısı K karşılıklı çalışan malzemelerin pek çok özelliğine bağlıdır. Buna rağmen aşınma katsayısını basit kantitatif bir eşitlikle tanımlamak mümkün değildir [5].

Archard eşitliği daha sonradan Hornberg tarafından geliştirilmiş ve kırılma tokluğu da bir malzeme parametresi olarak yeni eşitliğin içerisinde yer almıştır. Hornberg kurduğu modelle, artan relatif aşınma hızlarını metalik malzemelerin azalan toklukları ile açıklamıştır [5].

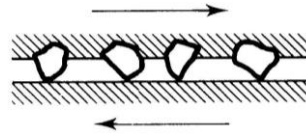
Yukarıda özetle açıklanmaya çalışılan adhezif aşınmanın engellenmesine yönelik önlemler şu şekilde sıralanabilir:

- Adhezif aşınma, sıcaklığın bölgesel olarak yüksek olduğu noktalarda meydana geldiğinden, yağlayıcılar yardımıyla fazla ısı uzaklaştırılabilir ve mikro – kaynak oluşumuna neden olacak metal – metal teması engellenmiş olur [6].
- Birbiri içerisinde çözünmeyen metallerin kullanılması da yapışma ve mikro kaynaklaşma neticesinde oluşan adhezif aşınmanın engellenmesinde rol oynayacaktır. Bu nedenle karşılıklı çalışacak malzemelerin seçilmesinde farklı kristal yapısı ve kimyasal özelliklere sahip olmasına dikkat etmek gerekmektedir [5,6].

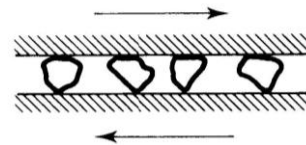
- Düz ve pürüzsüz yüzeylerin kullanılması mikro boyutta gerçekleşen çıkıntı temasını minimize eder ve adhezif aşınma oluşma riskini azaltır. Bununla birlikte bazı uygulamalarda yağ haznesi görevi görebilecek pürüzlü ve dalgalı yüzeyler tercih edilmektedir [5].
- Yüzeyde kasıtlı olarak oluşturulan kimyasal film tabakaları ve kaplamalar metal – metal temasının engelleyerek adhezif aşınmayı önler. Kimyasal film ve kaplamalara örnek olarak, yağlama özelliğine sahip klorür içeren yüzey filmlerini veya yağ haznesi görevi gören fosfat kaplamaları vermek mümkündür [6].

2.2.2. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, malzeme yüzeyinin kendisinden daha sert bir malzeme tarafından hasara uğratılması olarak tanımlanabilir. Bir sıvı içerisinde süspansiyon halinde bulunan veya malzeme yüzeyinden kopan sert partiküllerin yük altında hareket etmeleri sonucunda yüzeyde meydana getirdikleri hasardır. Yüzeyde gerçekleşen hasarın şiddetine bağlı olarak, *çizilme*, *çentik oluşturarak aşınma* ve *oyuk şeklinde aşınma* şeklinde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmanın yanı sıra hasarın oluşma mekanizmasına bağlı olarak *iki elemanlı* ve *üç elemanlı* abrasif aşınma olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.6.a.'da şematik olarak gösterilen iki elemanlı abrasif aşınma, karşılıklı olarak çalışan malzemelerden sert olanın karşı yüzeyi çizmesi şeklinde gerçekleşir. Üç elemanlı abrasif aşınmada ise, sert yüzey üçüncü bir cisimdir; diğer iki yüzey arasında sıkıştırılmış ve onlardan birini veya her ikisini birden aşındıracak kadar sert, genellikle küçük bir parça aşındırıcı veya taşıtır [1,5].



a. İki Elemanlı Abrasif Aşınma



b. Üç Elemanlı Abrasif Aşınma

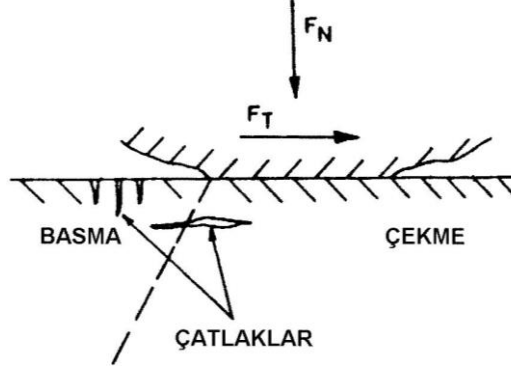
Şekil 2.6 İki elemanlı ve üç elemanlı abrasif aşınmanın şematik gösterimi [1]

Abrasif aşınmayı etkileyen başlıca faktörler aşındırıcı partikül, metal yüzeyleri arasındaki sertlik farkı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Bu parametrelere bağlı olarak abrasif aşınmanın engellenmesi veya hızının azaltılmasına yönelik olarak aşağıdaki yöntemlere başvurulabilir:

- Abrasif aşınmanın engellenmesinde en etkili yol, malzeme yüzey sertliğinin artırılmasıdır, fakat bu durum malzemenin gevrek kırılma riskini de arttırdığından tokluk değerlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Sünek malzemelerin üzerine uygulanacak sert kaplamalar yüksek sertlik ile birlikte tokluğun da elde edilmesine sağlayabilmektedir [6].
- Ara yüzeyde bulunan hava, su yağ gibi maddeler yabancı partiküllerin toplanması ve sistemden uzaklaştırılmasına yardımcı olarak abrasif aşınma riskini azaltırlar[6]. Ayrıca ara yüzeyin en sert partiküllerden daha kalın bir film tabakası ile yağlanması da aşınmayı azaltıcı rol oynar[5].
- Pratikte en çok kullanılan yöntemlerden biri de aşınan parçaların değiştirilmesi ve parçanın kolay şekilde değiştirilmesine olanak sağlayacak tasarımların yapılmasıdır [4].

2.2.3. Yorulma Aşınması

Yorulmalı aşınma, tekrarlı yüklemeler sonucunda yüzeyde veya yüzeyin altında oluşmaya başlayan çatlakların belirli bir devir sayısından sonra büyük parçalar halinde kopması neticesinde gerçekleşir. Kritik nokta olarak adlandırılabilen bu devir sayısına kadar, adhezif ve abrasif aşınmanın tersine, önemli oranda aşınma gözlenmez. Bu nedenle yorulma aşınma için kritik olan parametre diğer pek çok örnekte olduğu gibi aşınma neticesinde yüzeyden kaldırılan malzeme miktarı değil; aşınmanın gerçekleşmeye başladığı ana kadar geçen süre veya devir sayısıdır. Aşağıda, tekrarlı yüklemeler sonucunda yüzey altında oluşan çatlak nedeniyle gerçekleşen yorulmalı aşınma mekanizması şematik olarak gösterilmektedir [3].



Şekil 2.7 Yüzey altında oluşan çatlaklar nedeniyle gerçekleşen yorulmalı aşınma [5]

Dönme ve kayma temasındaki tüm tekrarlı gerilmeler aşınma hasarına yol açabilirler. Yorulma aşınmasına neden olabilecek etkiler, yüzeylerle doğrudan bir fiziksel temas gerektirmeden, yüzey altındaki gerilme hareketlerine dayanır. Sadece dönme hareketinin gerçekleştiği bir temas koşulunda kayma gerilmesi yüzeyin biraz altında bir noktada maksimum olacağından dolayı hasar bu bölgede başlar. Dönme hareketi ile birlikte kaymanın da gerçekleşmesi durumunda maksimum gerilmenin pozisyonu yüzeye daha yakın bir noktaya ötelenir. Hasarın oluşma ve ilerlemesinde maksimum gerilme konsantrasyonu bölgesinin yanı sıra, malzeme içerisinde bulunan inklüzyon, porozite, mikro çatlaklar ve daha pek çok faktör rol oynamaktadır [5].

Yorulma aşınmasını mikro çatlak oluşumunun yavaşlatılması veya durdurulması ile mümkündür. Malzemenin sertliğinin artırılması yüzey altı deformasyonunu azaltır ve böylece çatlak oluşma oranını yavaşlatır. Bununla birlikte tokluğun artırılması da çatlak büyüme hızını azaltır. Fakat tek bir mikro yapıda malzemenin hem sertliğinin hem de tokluğunun artırılması mümkün değildir [5].

Sertliğin artırılması amacıyla yapıya ikinci bir fazın eklenmesi durumunda çatlak oluşumu çok kolay bir şekilde gerçekleşebilecek duruma gelir. Bu nedenle ikinci fazı çok küçük yaparak onun çatlak oluşum bölgeleri meydana getirmeyecek şekilde sertliği artırması sağlanmalıdır. Diğer bir olasılık, sert partiküllerin hacimsel oranını, matris metal toplam hacminin çok küçük bir bölümünü oluşturacak şekilde arttırmaktır.

Aşınma direncini artırmanın diğer bir yolu ise yüzeyi çok sert kaplamalar ile kaplamak veya malzemeyi, yüzeyinde plastik deformasyon gerçekleşmeyecek bir yüzey işleminden geçirmektir. Bu işlemler sırasında da kaplamanın iyi yapışmasına ve mikro çatlaksız olmasına dikkat edilmelidir [5].

2.2.4. Kazımalı Aşınma

Parçalar yüksek frekansta çok küçük relatif titreşime maruz kaldığında “fretting” olarak da adlandırılan kazımalı aşınma meydana gelir. Bu tip aşınma adhezyon ile başlar, korozyon tarafından büyütülür ve abrazyonla başlıca etkisini gösterir [5].

Kazımalı aşınma titreşimli ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanları ile otomobil şaftlarının birleşme noktaları ve yataklarda sıkça görülür. Karakteristik görünüş olarak, demir içeren metallerde kırmızı – kahverengi lekeler ve fazla miktarda parlamış bitişik bölgelerden oluşur [5].

Kazımalı aşınmayı engellemek kolay değildir. Ancak bu aşınma mekanizmasının getirdiği hasarlar aşağıda verilen uygulamalar ile en aza indirilebilir:

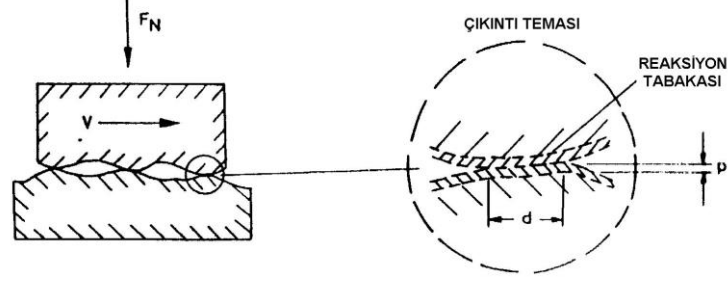
- Titreşimin azaltılması veya giderilmesi,
- Ara yüzeydeki kaymaları azaltmak veya gidermek,
- Bağlantı noktalarında elastomer kullanmak,
- Bağlantı noktalarının yağlanması,
- Kırılmayı engellemek. [6].

2.2.5. Korozi Aşınma

Adhezyon, abrazyon ve yorulmadan kaynaklanan aşınma, karşılıklı çalışan yüzeylerin gerilim etkileşimlerine ve deformasyon özelliklerine bağlanabilir, ancak korozi aşınmada çevre ve karşı karşıya çalışan malzeme yüzeyleri arasındaki dinamik etkileşim önemli rol oynar. Bu etkileşim kademeli olarak gerçekleşen bir prosesin oluşumuna neden olur:

- İlk olarak temas halindeki yüzeyler çevre ile reaksiyona girerek yüzeyde, Şekil 2.8.’da da görülen, reaksiyon ürünleri tabakasını meydana getirir.

İkinci adımda ise çatlak oluşumu ve/veya abrazyon neticesinde reaksiyon ürünleri birbirlerini aşındırır [5].



Şekil 2.8 Korozif aşınma modeli [5].

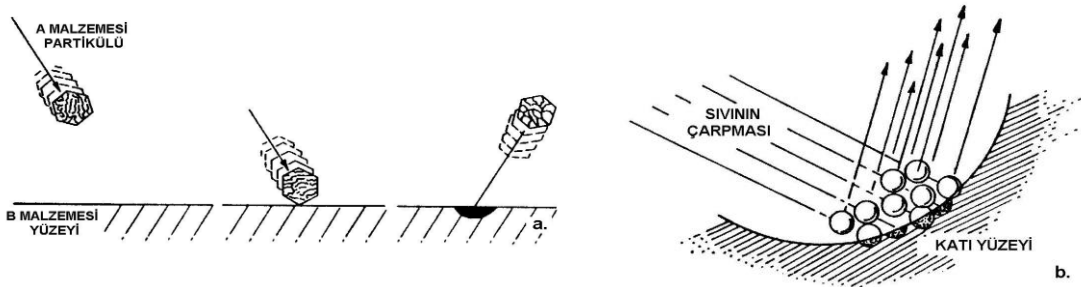
Korozif aşınmayı önlemek amacıyla;

- Ömür ve ekonomik şartlar göz önünde bulundurularak malzeme seçimine dikkat edilmelidir.
- Yüksek sertliğe ve korozyon direncine sahip kaplamalar ile yüzeyi kaplamak,
- Ortamın havayla temasını kesmek ve pH'sını düşürmek,
- Kromat ve nitratlar gibi korozyon inhibitörleri kullanmak,
- Katodik koruma uygulamak

gibi yöntemler kullanılabilir [7].

2.2.6. Eroziv Aşınma

Erozif aşınma bir sıvı veya taşıyıcı içerisindeki sert partiküllerin, sıvı damlalarının ve gazların malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kayması veya yuvarlanması sırasında, yüzeye temas eden partiküllerin metal yüzeyinden parça koparması şeklinde gerçekleşir. Sıcaklık, akış hızındaki artış veya ani basınç düşmesi nedeniyle oluşan gaz kabarcıklarının yüzeyde oluşturduğu hasar olarak tanımlanan kavitasyon aşınması da eroziv aşınmanın bir alt türü olarak kabul edilebilir. Aşağıda eroziv ve kavitasyonla aşınma mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir. [6].



Şekil 2.9.a. Eroziv aşınma b. Kavitasyonla aşınma mekanizmaları [5].

Erozif aşınma;

- Erozif ortamın kinetik enerjisi,
- Çarpma açısı,
- Yüzeyin maksimum esnekliği,
- Yüzeyin metal – metal bağlanma enerjisine bağlıdır [5].

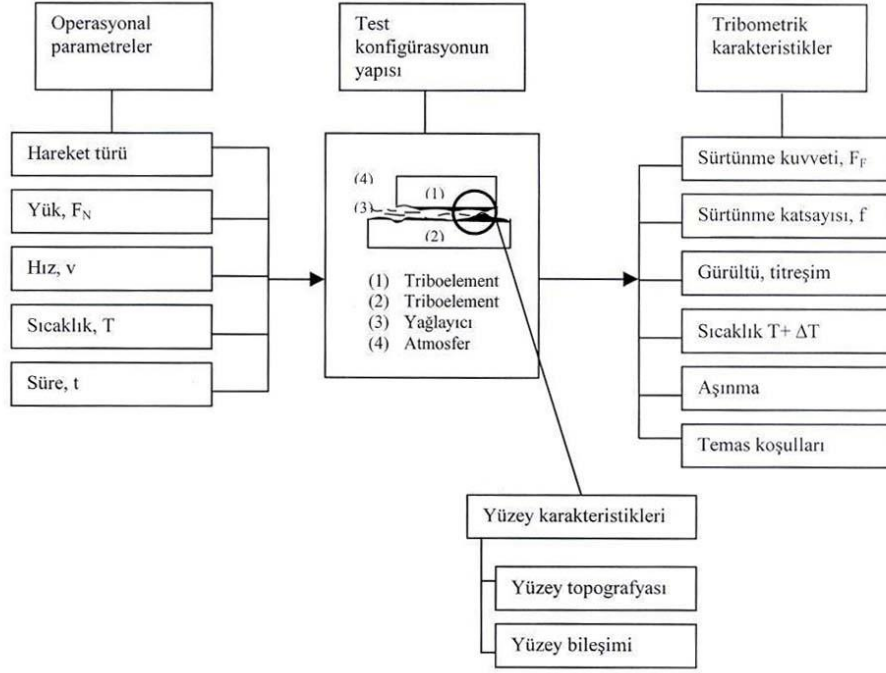
Maksimum esneklik, malzemede deformasyon veya çatlama meydana gelene kadar absorbe edilebilen enerji miktarıdır. Bu nedenle malzemelerin erozif aşınmaya karşı dirençli olması için yüksek maksimum esneklik değerlerine sahip olmaları gerekir.

Metal – metal bağlanma enerjisinin yüksek olması, kristal latisindeki metal atomlarının çok güçlü şekilde bir arada tutulduğu ve latisi kolaylıkla terk etmeyecekleri anlamına gelmektedir. Yani, yüksek metal – metal bağlanma enerjisi değerlerine sahip malzemeler daha iyi erozif aşınma direnci gösterir [5].

2.3. Aşınmayı Etkileyen Parametreler

Ana malzeme, karşı malzeme, ara malzeme, yük ve hareket parametrelerinden oluşan bir tribolojik sistemde, aşınma mekanizmasını ve bu mekanizmayı benzeştirmede kullanılacak olan aşınma test cihazının seçimini doğrudan etkileyen parametreleri dört ana başlıkta incelemek mümkündür. Şekil 2.10.'da bu parametreler farklı bir sınıflandırma içerisinde şematik olarak gösterilmiştir.

- **Malzeme Parametreleri** : Bileşim, elastisite modülü, sertlik, termal iletkenlik, yüzey pürüzlülüğü..v.b.
- **Tasarım Parametreleri** : Temas geometrisi, uygulanan yük, hareket şekli, hızı, yüzey kalitesi, salınım açısı..v.b.
- **Yağlama Parametreleri** : Yağın çeşidi, kararlılığı, viskozitesi, yağlama mekanizması..v.b.
- **Çevre Şartları** : Sıcaklık, nem, ortam basıncı, atmosfer şartları..v.b. [2].



Şekil 2.10 Aşınma ve sürtünmeyi etkileyen parametreler [2].

Bu çalışmanın konusu olan, kompresör yataklarının aşınma davranışının incelenmesine yönelik bir uygulama için, hâlihazırda kullanılmakta olan malzeme çiftlerine ait parametreler talimatlar yardımıyla elde edilebilecek olan belirli verilerdir. Bu bilgiler bir aşınma deneyi sistemine doğrudan girdi olabilecek; değişmesi durumunda aşınma mekanizması veya miktarını değiştirebilen ancak uygun test düzeneği seçimini etkilemeyen parametrelerdir. Çevre şartları da benzer bir şekilde, kompresörün rejim halinde çalışması sırasında belirlenmiş sabit değerlerdir. Tasarım parametreleri ve yağlama koşulları ise, kompresör yataklarındaki durumun benzeştirilmesinde en önemli rolü oynayan; gerek aşınma mekanizmasının gerekse aşınma – sürtünme deney cihazı seçimini etkileyen iki önemli parametredir. Aşağıda tasarım ve yağlama parametreleri ile ilgili detaylı bilgiler bulunmaktadır.

2.3.1. Tasarım Parametreleri

Belirli bir malzeme/malzeme veya malzeme/yağlayıcı/malzeme sistemi için temas ve yağlama şeklinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu parametrelerden birisi olan temas geometrisi, yüzeydeki gerilme dağılımı ve miktarını etkilediğinden önemlidir. Ayrıca sıvı yağlayıcı ile yapılan çalışmalarda, yağlayıcının akışını

etkileyen bir parametre olarak göze çarpmaktadır. Hareket şekli ise yüzeydeki aşınma partikülü ve film tabakası oluşumu etkilemektedir [7,8].

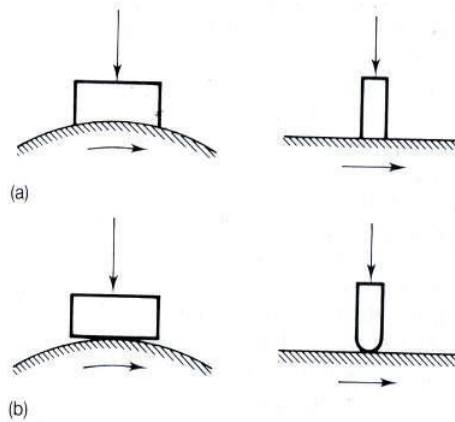
2.3.1.1. Temas Geometrisi

Yüzey uyumluluğuna bağlı olarak makro temas geometrisi *konform ve konform olmayan* yüzeyler olmak üzere ikiye ayrılır.

Konform yüzeyler birbirlerine belirli bir nominal alan boyunca temas ederler ve aşınmanın gerçekleşmesi ile birlikte bu alanda bir değişiklik gözlenmez. Bu nedenle basınç dağılımı konform olmayan temas geometrisine oranla daha düzenlidir. Ayrıca, yüzeyleri birbirinden ayıran yağ filmi kalınlığı homojen olduğundan yağlama daha kolay elde edilebilir [8].

Konform temasın en önemli dezavantajı ise parçaları birbirlerine paralel olacak veya bir alan boyunca temas edecek şekilde yerleştirmenin oldukça zor oluşudur. Temas bölgesindeki çok küçük yüzey hataları önemli ölçüde aşınmanın gerçekleşmesine neden olabilir [8].

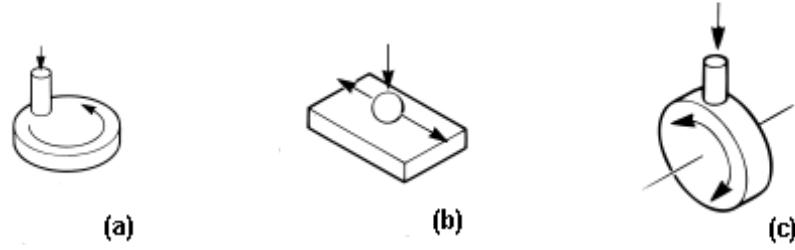
Konform olmayan yüzeyler ise, birbirlerine tek bir nokta veya hat boyunca temas eden ve ara yüzeydeki eğimleri birbirine zıt yönde olan yüzeylerdir. Bu tip temas durumunda yüzeylerin birbirlerine tam olarak oturması gibi sorunla karşı karşıya kalınmaz fakat temas sırasında oldukça yüksek temas basıncı değerleri gözlemlenir. Konform testlerden farklı olarak nominal temas alanı, aşınmanın gerçekleşmesi ile birlikte önemli ölçüde değişiklik gösterir. Konform ve konform olmayan yüzeylere ait örnekler Şekil 2.11.'de verilmiştir.



Şekil 2.11 (a) Konform ve (b) Konform olmayan temas geometrileri [1].

2.3.1.2. Hareket Şekli

Temelde, tek yönlü (daireysel), ileri – geri hareketi (reciprocating) ve salınım hareketi (oscillating) olmak üzere üç başlıkta incelenebilir. Gerçekleşen bu hareket şekilleri yüzey yapısının gelişimini, aşınma sonucu oluşan parçacıkların yapısını, sıvı akışını ve sürtünme sonucunda oluşan sıcaklık değişimlerini etkilediğinden testler sırasında göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir [8]. Şekil 2.12.'de farklı hareket şekillerinin benzeştirilmesinde kullanılan standart test cihazlarının şematik görüntüleri bulunmaktadır.



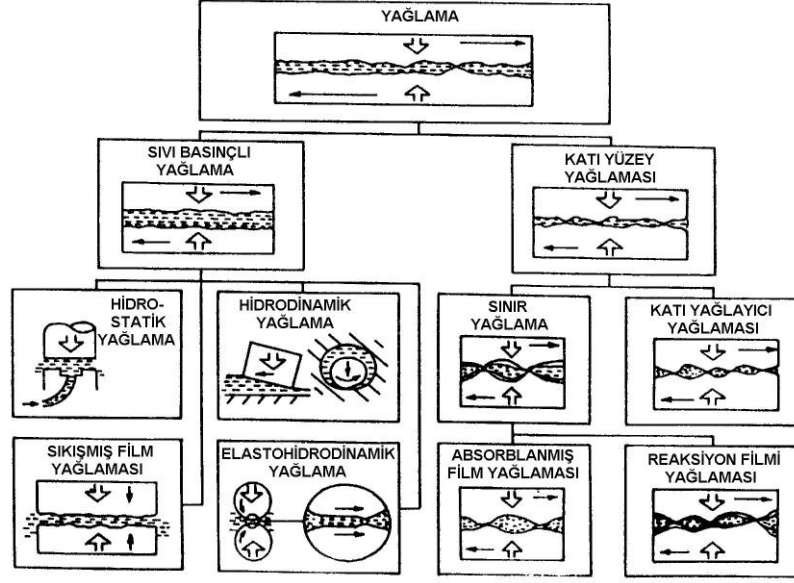
Şekil 2.12 Hareket şekillerinin şematik gösterimi.

(a. Pin on disk, b. Ball on flat, c. Block(pin) on ring) [9].

Hareket şeklinin yanı sıra kayma hızı ve test süresi de önemli parametreler arasında yer almaktadır. Kayma hızı, sürtünme enerjisi oranını ve ara yüzeydeki sıcaklık dağılımını doğrudan etkilemektedir ve hızın değişmesi ile birlikte aşınma mekanizmasında ani değişiklikler söz konusu olabilir [8].

2.3.2. Yağlama Parametreleri

Aşınma ve sürtünme mekanizmaları, birbirlerine karşı relatif hareket eden iki yüzey arasındaki fiziksel etkileşimden kaynaklanmaktadır. Yağlama bu iki yüzey arasında bir yağlayıcı ile, beraber hareket eden iki katı yüzey arasında sürtünme ve aşınmayı azaltan bir prosestir. Yağlamanın rolü, düşük kayma direncine sahip ve yüzeyde hasara neden olmayan katı bir film, sıvı veya gaz malzeme ile hareketli yüzeyleri birbirinden ayırmaktır. Şekil 2.13.'te yağlama mekanizmalarının detaylı sınıflandırması yer almaktadır [5].



Şekil 2.13 Yağlama mekanizmalarının sınıflandırılması [5].

Hidrostatik yağlamada, yağlayıcı ara yüzeye basınç altında beslenmektedir ve katı yüzeyler arasında gerçekleşebilecek teması engeller. Hidrodinamik, elastohidrodinamik ve sıkı film yağlamada, katı yüzeyleri birbirinden ayıran yağ basıncı relatif hareket yardımıyla, otomatik olarak sağlanır. Sınır yağlama ve katı yağlayıcılarla yağlama durumunda ise, temas halindeki yüzeyler arasında belirgin bir çıkıntı teması gerçekleşmektedir [5].

Hidrostatik yağlama dışındaki diğer yağlama mekanizmaları arasındaki farklılıkları, yağlama rejimlerinin sürtünme davranışlarını gösteren Stribeck eğrileri ile belirlemek mümkündür. Şekil 2.14.'de görülen Stribeck eğrisinde, η ; yağlayıcı viskozitesi, v ; kayma hızı ve P temas basıncı olmak üzere $\eta v P^{-1}$, yağlama rejiminin sürtünme katsayısı ile birlikte değişimini göstermektedir. Stribeck eğrisinde, λ spesifik film kalınlığını göstermektedir ve;

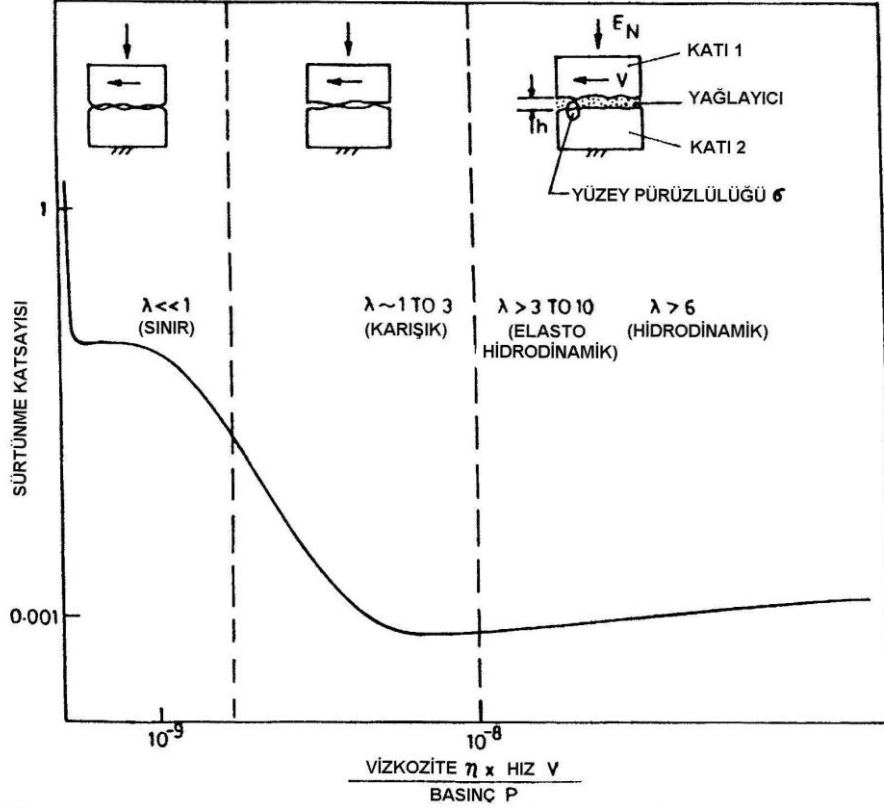
h: Sıvı film kalınlığı

σ : Karşılıklı çalışan yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğü

$$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (2.3.)$$

h_{\min} : Minimum film kalınlığı olmak üzere

$$\lambda = h_{\min} \sigma^{-1} \text{ 'dir} \quad (2.4.) [5].$$



Şekil 2.14 Stribeck eğrisi [5].

2.3.2.1. Hidrostatik Yağlama

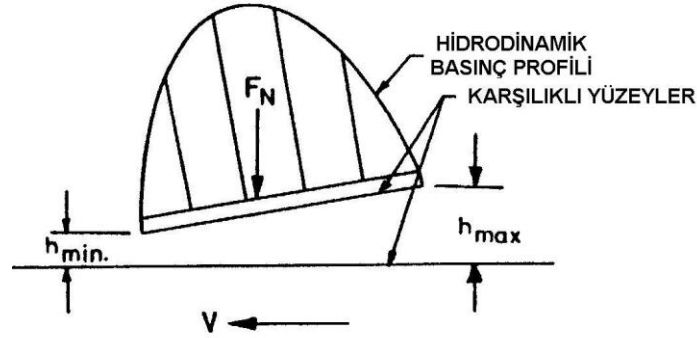
Hidrostatik yağlamanın baskın olduğu yataklarda yüzeyler, dışarıdan pompa benzeri bir basınç kaynağı yardımıyla beslenen yağlayıcının oluşturduğu film tabakası ile birbirlerinden ayrılırlar. Bu nedenle bu tip yataklar genelde dıştan basınçlı yataklar olarak adlandırılmaktadır. Film kalınlığı ve yağ basıncı ara yüzey boyunca aynıdır.

Hidrostatik yataklar, karşılıklı çalışmakta olan yatak malzemelerinin yük kaldırma kapasitesini artıracak relatif bir hareket gerektirmediğinden, hareketin çok az olduğu veya hiç olmadığı sabit yüzeyler arasında kullanılırlar. Ayrıca kalkış ve duruş anında yeterli yağlamanın gerçekleştirilemediği uygulamalarda da tercih edilirler [5].

2.3.2.2. Hidrodinamik Yağlama

Hidrodinamik yağlama birbirine paralel olmayan iki yüzey arasındaki relatif hareket sonucunda yüzeyler arasında ince bir yağ film tabakası oluşması esasına dayanır. Hidrodinamik yağlamanın gözlemlendiği karakteristik yüzey geometrisi Şekil 2.15.'de de görüldüğü gibi birbirlerine yakınsak olan iki katı yüzeyden oluşmaktadır. Böyle bir durumda yağ basıncının maksimum olduğu bölgeden minimum olduğu bölgeye doğru akış gerçekleşecek ve katı yüzeylerin birbirlerinden ince bir film

tabakası ile ayrılmaları mümkün olacaktır. Yağlamanın gerçekleşmesini sağlayan hidrodinamik basınç malzeme çiftinin mukavemet değerleri ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür ve herhangi bir bölgesel deformasyona neden olmaz. Hidrodinamik yağlamada baskın olan parametreler, yağlayıcının, başta viskozite olmak üzere, fiziksel özellikleri ve karşılıklı çalışan malzemelerin relatif hızıdır [5].



Şekil 2.15 Hidrodinamik yağlamada basınç oluşumu [5].

2.3.2.3. Elastohidrodinamik Yağlama

Elastohidrodinamik yağlama, yüzeyde gerçekleşen deformasyon miktarının hidrodinamik film kalınlığı ile karşılaştırılabilir derecede büyük olduğu ve deformasyonun ara yüzeydeki yağlama davranışını etkileyebileceği durumlarda sağlanır. Temas basıncının yüksek olduğu yuvarlanmalı yatak, dişli gibi uygulamalarda, yüzeyde gerçekleşen bölgesel elastik deformasyon, sürekli bir hidrodinamik yağ filminin oluşmasına ve böylece yüzeydeki pürüzlerin temasının engellenmesine neden olur. Ayrıca yükün bu derece yüksek olması durumunda, ara yüzeyde bulunan yağlayıcının viskozitesinde önemli bir artış gözlenir ve sıvıdan çok katı gibi davranır [5].

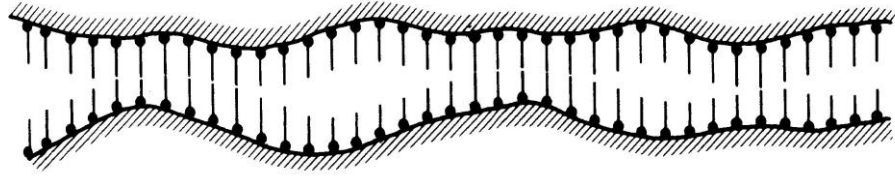
2.3.2.4. Karışık Yağlama

Karışık yağlama şartlarında, temas bölgesi elastohidrodinamik, hidrodinamik ve sınır yağlama koşullarının her üçünden birden etkilenmektedir. Temas halindeki yüzeyler birbirlerinden bir yağlayıcı ile ayrılmış olmakla birlikte, çıkıntı teması da gerçekleşebilmektedir. Toplam uygulanan yükün bir kısmı yüzey çıkıntılarının teması, bir kısmı ise hidrodinamik hareket ile taşınmaktadır [5].

2.3.2.5. Sınır Yağlama

Çok yüksek temas basıncı ve çok düşük kayma hızlarının görüldüğü durumlarda, hidrodinamik kuvvetler ince bir elastohidrodinamik film oluşturmakta yetersiz kalır ve yüzeydeki çıkıntılar arasında direk temas oluşur. Sınır yağlama koşullarının olduğu bu durumda yüzeyler uygun yağlayıcılarla korunmazsa çok yüksek sürtünme katsayıları ve şiddetli aşınma oranları gözlemlenir [1].

Sınır yağlama koşullarında sürtünme katsayısı yağ viskozitesinden çok, temas noktasındaki çıkıntı deformasyonu için gerekli olan enerjiye bağlıdır. Kimyasal ve fiziksel olarak, kayma hareketi yapan yüzeydeki oksit tabakasına kolayca absorbe olan, yüksek polariteye sahip ve metal oksitlere afinitesi yüksek yağlar kullanılarak sözü geçen sürtünme ve aşınma değerleri düşürülebilir. Bu yağlar, iki yüzey hareketine geçtiğinde yükün büyük bir kısmını Şekil 2.16’da olduğu gibi lineer bir yapıya sahip olan hidrokarbon zincirleri ile taşırlar ve pürüzlerin birbirleriyle temasını minimuma indirirler [1].

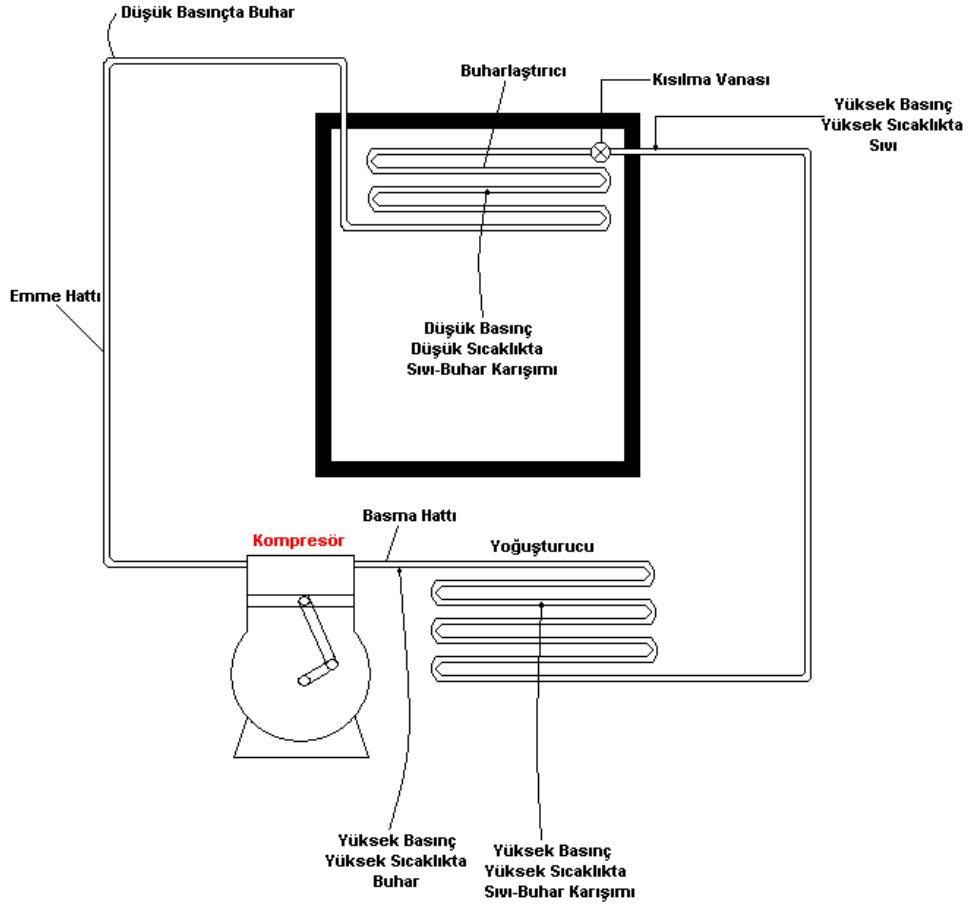


Şekil 2.16 Sınır yağlayıcıların işleyiş mekanizması [1].

3. HERMETİK KOMPRESÖRLERDE AŞINMA PROBLEMİ

3.1. Hermetik Kompresörlerin Çalışma Prensipleri:

Kompresörler soğutucu sistemlerin kalbini oluşturmaktadır ve çalışma prensipleri ne olursa olsun bir gazın sıkıştırılması işlevini yerine getirmektedir. Bu işlevi gerçekleştirebilecek çeşitli kompresör çeşitleri ve tasarımları mevcut olmakla birlikte ev tipi buzdolaplarında hermetik kompresörler kullanılmaktadır. Hermetik kompresörler, Şekil 3.1.'de şematik olarak anlatılan buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi içerisinde buharlaştırıcıdan gelen düşük basınçlı soğutkan buharının basıncının ve sıcaklığının yükseltilmesi görevlerini yerine getirmektedir [10].



Şekil 3.1 Soğutma çevriminin şematik görüntüsü [10].

Buhar sıkıştırılmalı soğutma çevriminde yüksek basınca sahip soğutucu akışkan, yoğuşturucuda buhar fazından sıvı faza geçerken dış ortama ısı atar. Isı kaybeden soğutkanın basıncı kısılma vanası yardımıyla düşürülür ve sıcaklığı azaltılır. Kısılma vanasından basıncı ve sıcaklığı azalmış olarak çıkan soğutucu akışkan, buharlaştırıcıdan geçerken, ortamdan ısı çekerek tekrar buhar fazına geçer. Kompresör bu çevrimde, buhar fazındaki soğutkanın basıncının artırılması amacıyla kullanılmaktadır [11].

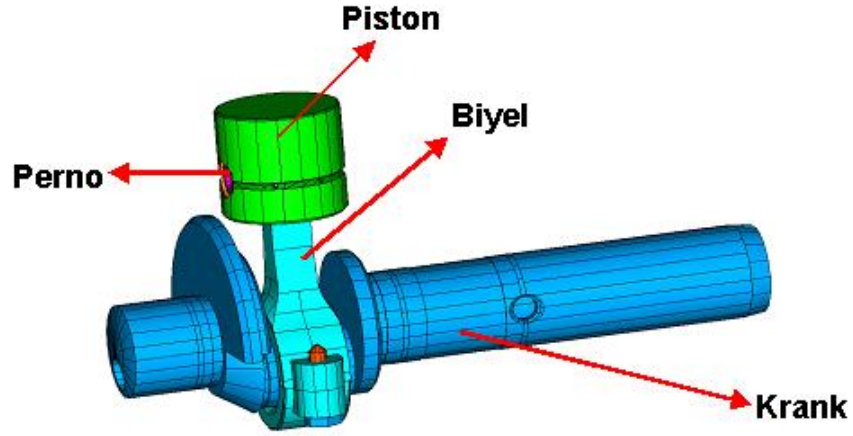
Ev tipi buzdolaplarında kullanılan hermetik kompresörlerin başlıca bölümleri şunlardır:

- Kompresör ana gövdesi
- Mekanik sistem
- Yay sistemi
- Elektrik motoru
- Muhafaza [12]

Kompresör gövdesi, yay sistemi, elektrik motoru ve muhafaza ile ilgili detaylı açıklamalara bu çalışmada girilmeyecektir. İleriki bölümlerde sık sık bahsedilecek olan bazı mekanik sistem parçaları ile ilgili genel bilgi ise aşağıda verilmektedir.

3.2. Kompresör Mekanik Sisteminin Tanıtılması

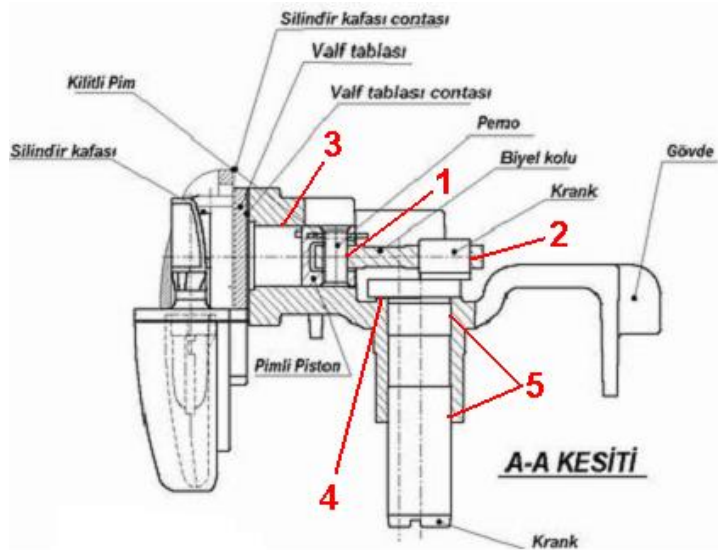
Kompresör mekanik sistemi Şekil 3.2.'de de görülen krank mili, biyel kolu, perno ve pistondan oluşmaktadır. Krank mili elektrik motoruna sabitlenmiş durumdadır ve hareketini motordan almaktadır. Gövde üzerine 2 ayrı yerden yataklanmıştır ve dairesel hareket sırasındaki santrifüj kuvvetler yardımıyla yağ haznesi görevi de gören kompresör kabuğundaki yağın yataklara taşınması görevini üstlenmektedir. Biyel kolu ise, krankın elektrik motorundan aldığı dairesel hareketin doğrusal, ileri – geri salınımlı harekete (reciprocating) çevrilmesi görevini yerine getirmektedir. Bir ucu kranka, diğer ucu perno isimli parça ile pistonu yataklanmıştır.



Şekil 3.2 Kompresör mekanik sistemi komponentleri [13]

Hermetik kompresörlerin mekanik sistemi dahilinde Şekil 3.3.'de görüldüğü üzere, 5 farklı yatak grubu bulunmaktadır. Bu yatakları aşınma probleminin en çok olduğu yatak grubundan en az olduğu yatak grubuna doğru şu şekilde sıralamak mümkündür:

- 1 No.lu Yatak Grubu: Biyel Perno Deliği – Perno
- 2 No.lu Yatak Grubu: Biyel Krank Deliği – Krank Eksantrik Muylu
- 3 No.lu Yatak Grubu: Gövde Silindir Deliği – Piston
- 4 No.lu Yatak Grubu: Krank Uzun Muylu – Gövde Krank Deliği (Krank Basmalı Yatağı)
- 5 No.lu Yatak Grubu: Krank Uzun Muylu – Gövde Krank Deliği (Krank Radyal Yatağı)



Şekil 3.3 Kompresör mekanik sisteminin kesit görüntüsü [14].

3.3. Kompresör Yataklarında Karşılaşılan Aşınma Problemi:

Buzdolabı soğutma çevrimi içerisinde görev alan kompresörler soğutma işi sırasında sürekli olarak çalışır durumda değildir. Belirli aralıklara duruş ve kalkış yapmaktadır. Kompresörün durup yataklarda bulunan yağın hazne içerisine biriktiği durumda tekrar kalkış yapması halinde özellikle biyel – perno yatağına yağın iletilmesi konusunda güçlükler yaşanmakta ve yüzeyleri birbirinden ayıracak kalınlıkta yağ filminin oluşmaması nedeniyle, Bölüm 2.3.2.5.'de anlatılan sınır yağlama koşulları baskın hale gelmektedir. Bu durumda yüzeydeki pürüzlerin (asperity) birbirleri ile teması gerçekleşmekte ve yüksek sürtünme katsayıları ile şiddetli aşınma gözlenmektedir. Biyel – perno yatağında görülen bu aşınma problemini çözmeye yönelik olarak yağlama veya yağı tutma özelliğine sahip kaplama ve yüzey işlemlerinin uygulanması gerekmektedir [15].

3.4. Aşınma Probleminin Çözümüne Yönelik Uygulamalar

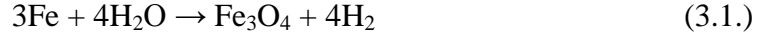
Buzdolabı kompresörlerinde biyel malzemesi olarak, toz metalürjisi ile üretilmiş demir esaslı sinter malzeme kullanılmaktadır. Toz metalürjisi ile üretilmiş olan parçalar, gözenekli yapıları nedeniyle kendinden yağlamalı yatak görevi görmekte böylece yatakların aşınma – sürtünme özelliklerini geliştirmektedir. Bunun yanı sıra yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların, düşük enerji tüketimi, yüksek malzeme kullanımı ve düşük maliyet ile üretilmesine olanak sağlamaları da diğer önemli avantajlarıdır [16]. Perno malzemesi olarak ise, 100Cr6 (AISI 52100) çeliği, ısıtım işlem (su verme) uygulanarak kullanılmaktadır. Aşağıda bu iki malzemenin aşınma direncini arttırmaya yönelik olarak uygulanabilecek, üretime alternatif yüzey işlemleri kısaca özetlenmiştir.

3.4.1. Biyel Üzerine Uygulanabilecek Yüzey İşlemleri

Toz metalürjisi ile üretilmiş malzemelerin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak literatürde bulunan ve sıklıkla kullanılan yöntem buhar işlemi ve ardından yapılan mangan fosfat kaplama işlemleridir.

3.4.1.1. Buhar İşlemi

Buhar işlemi, sinter malzeme yüzeyine 450 – 600 °C sıcaklıkta ve atmosfer basıncının biraz üzerindeki basınç değerlerinde buhar vererek;



reaksiyonu ile yüzeyde oksit filmi oluşturma işlemidir. Bu işlem neticesinde malzemenin yüzey sertliği, mukavemet özellikleri (örn. basma mukavemeti), korozyon ve aşınma direnci artmaktadır.

Buhar işlemi sırasında ortamdaki $p\text{H}_2\text{O} / p\text{H}_2$ oranı ve sıcaklık değerine bağlı olarak farklı oksit filmleri oluşabilmektedir fakat aşınma özelliklerini iyileştirmesi için yüzeye iyi yapışan ve yoğun bir tabakaya sahip magnetit (Fe_3O_4) oluşması istenmektedir [17,18].

Demir esaslı sinter malzemelerin buhar işlemi uygulamasında başlıca alaşım elementlerinin etkilerini şu şekilde özetlemek mümkündür:

- *Bakırın Etkisi:*

Bakır, demir esaslı sinter malzemelerin tane sınırlarına yerleşmekte ve mekanik özelliklerini çökelme sertleşmesi mekanizması ile geliştirmektedir [19]. Buna karşılık, bakırın demir katı çözeltileri içerisindeki aktivitesinin düşük olması nedeniyle buhar işlemi sırasında seçici oksitlenme gerçekleşmesine ve bunun neticesinde yüzeyde homojen olmayan oksit film tabakası ve hatalar oluşmasına neden olmaktadır [20].

- *Fosforun Etkisi:*

Khan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, alaşım elementi olarak fosforun 400 – 550 °C arasında çökelme sertleşmesi mekanizması ile Fe_3P oluşturarak malzemenin sertlik ve mukavemet özelliklerini geliştirdiğini görmüşlerdir. Buhar işlemi uygulamasında sırasında, artan fosfor miktarı sertlikteki artışla beraber, yüzeyde fazla kalın olmayan ama iyi yapışma özelliklerine sahip oksit filmi oluşmasını sağlamaktadır [21].

- *Karbonun Etkisi:*

Karbon katkısı ise demirin sertliğini arttırıcı etkisi bulunmaktadır. Fakat sertliği arttırıcı etkisinin dışında buhar işlemi sırasında karbonun malzemeye pozitif etkisi bulunmaktadır [22].

3.4.1.2. Mangan Fosfat Kaplama

Mangan fosfat kaplama malzeme yüzeylerinin geçici olarak korunması ve aşınmaya dayanıklı yüzey oluşturması amacı ile uygulanmaktadır. Bu tip kaplamalar, çözelti ile kaplama yapılacak olan malzeme yüzeyi arasında gerçekleşen ve kaplamanın bir kısmını çözelti bir kısmını da malzemenin oluşturmasını sağlayan reaksiyonlar neticesinde gerçekleşir [23].

Mangan fosfat kaplamalar gözenekli bir yapıya sahip olmaları ve yağ tutma özellikleri nedeniyle, katı yağlayıcılar gibi davranarak, düşük sürtünmelere ve yatak sarmasına (scuffing) karşı direncin yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu tür kaplamalar yağ tutma özellikleri ile sadece çalışmaya ilk başlama anındaki (run-in period) aşınmaları azaltmaz, aynı zamanda yağlamanın kesildiği veya sınır yağlama koşullarının baskın olduğu durumda da faydalıdır [23]. Mangan fosfat kaplamaların aşınma direncin arttırıcı etkisi,

- Kaplamanın homojen bir yapıya sahip olmasına
- Kaplamanın metal yüzeyine iyi yapışmasına ve
- Yağ ile kaplamanın uyumlu olmasına bağlıdır.

İnce taneli ve homojen olarak yapılan kaplamalar yüksek yoğunluk ve düşük yüzey pürüzlülüğü özellikleri ile aşınma direncini olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip alt malzemelerin kaplama işlemi daha kalın ve kaba taneli olacak şekilde hazırlanmalıdır [24].

Mangan fosfat kaplamaların diğer bir avantajı ise, yük altında hafifçe deforme olarak gerilme konsantrasyonunu düşürmesi ve böylece malzemenin yük taşıma kapasitesini artırmasıdır. Ayrıca kaplama yapılan yüzeydeki gürültü miktarını da azaltmaktadır [23].

Mangan fosfat kaplama işlemi temizleme ve yağlama işlemleri dışında temelde 3 ana kademedeki gerçekleşmektedir. Bunlar, *yağ alma*, *aktivasyon* ve *fosfatlama* işlemleridir. Alkali temizleyiciler ve su ile yapılan temizleme ve yağ alma işlemleri sonrasında, mangan, magnezyum ve sodyum – fosfat çözeltileri ile yüzeyde metalik tuzlar oluşturulmaktadır. Bu tabaka, ardından yapılan fosfatlama işleminin daha homojen ve yoğun olmasını sağlamaktadır. Fosfatlama işlemi sırasında demirin oksitlenmesi, kaplama çözeltisinin nötrale olması ve çözelti içerisindeki Mn^{+2} ile Fe^{+2} 'nin yer değiştirme reaksiyonları neticesinde $(Mn,Fe)_5H_2(PO_4)_4$ (hureaulite) oluşur [23].

3.4.2. Perno Yüzeyine Uygulanabilecek Yüzey İşlemleri

Üretimde ısıtılarak işlemlenerek kullanılan pernoların tribolojik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak nitrürleme işlemi çalışılmıştır. Nitrürleme temelde, azotun atomsal olarak malzeme yüzeyinden içeri yayılarak nitrür oluşturması yoluyla malzemelerin yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttıran bir yüzey işlemidir. Diğer yüzey işlemlerinden daha düşük sıcaklıklarda yapılması (495-580°C) ve bu nedenle çarpılma riskinin düşük olması yöntemin önemli avantajlarından biridir. Nitrürleme işlemi *sıvı, katı, gaz nitrürleme ve plazma (iyon) nitrürleme* olmak üzere 4 farklı yöntemle uygulanabilmektedir [25]. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda, sıvı nitrürleme işlemi ile istenen aşınma direncinin elde edilemeyecek olduğunun görülmesi ve plazma nitrürleme işleminin maliyeti ve işlem sonrasında malzemenin yüzey kalitesinin kontrol edilememesi nedenleri ile bu çalışmada halka numunelerine *gaz nitrürleme* işlemi uygulanmıştır.

3.4.2.1. Gaz Nitrürleme

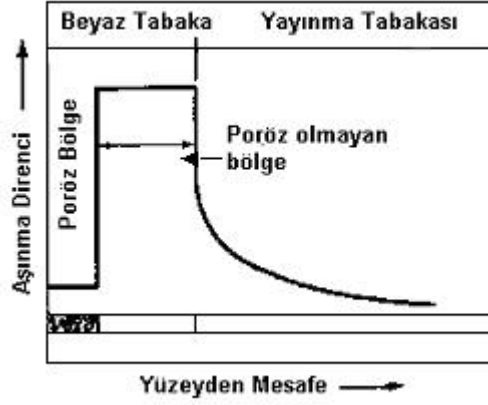
Gaz nitrürleme işlemi, 510–550°C sıcaklık aralığında amonyak gazının 3.2. no.lu reaksiyona göre ayrışması ile açığa çıkan azot atomlarının çelik yüzeyinden içeri yayılmasıyla gerçekleşir [26].



Nitrürleme işlemi sırasında reaksiyon yalnızca yüzeyde gerçekleşmez, numunenin ara yüzeyinden içeri doğru da azot atomları yayılır. Sonuçta, yüzeyden iç kısma doğru iki farklı yapı oluşur. En üst tabaka Fe_4N ve Fe_{2-3}N gibi demir nitrürler içeren, ince, sert ve kırılabilir olan beyaz tabakadır (compound layer). Beyaz tabakanın altında, yayılma tabakası (diffusion layer) olarak adlandırılan ve azotun demir kafesinde arayer atomu olarak yerleşmesi veya ince taneli çökelti şeklinde çökmesi sonucu oluşan bölge bulunmaktadır [27].

Beyaz tabaka en dışta, kalınlığı proses parametreleri ile değişen gözenekli bir yapıya sahiptir ve bu gözenekli bölgenin aşınma direnci; yorulma direncinin ve yoğunluğunun daha düşük olması ve gözeneklerin çentik etkisi yaratması nedeniyle düşüktür. Beyaz tabakanın gözenek bulunmayan iç bölgelerinin aşınma direnci ise yayılma tabakası ve ana malzemeye göre çok daha yüksektir. Bu nedenle beyaz tabakanın homojen bir yapıya sahip olması aşınma direnci açısından önemlidir. Beyaz tabakanın altında yer alan yayılma tabakasında ise aşınma direnci iç bölgelere doğru gittikçe azalır. Bunun

nedeni yayınmaya bağlı olarak, derinlik arttıkça sertleşmeyi sağlayan nitrürlü bileşiklerin ve ana malzemedeki azot atomları yoğunluğunun azalmasıdır. Şekil 3.4.'de nitrüleme işlemi neticesinde oluşan tabakaların aşınma direnci üzerine etkisi şematik olarak verilmiştir. [7].



Şekil 3.4 Nitrürlenmiş tabaka boyunca aşınma direncinin değişimi [7].

Bu bölümde anlatılan yüzey işlemlerinin her birisinin aşınma – sürtünme özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar deney planı içerisinde yer almıştır. Malzeme ve yüzey işlemleri tanımlanan bu çiftlerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesine yönelik testlerin gerçekleştirilebileceği alternatif deney düzenekleri ise bir sonraki bölümde anlatılmaktadır.

4. AŞINMA – SÜRTÜNME DENEY DÜZENEKLERİ

- Tribolojik sistemlerin veya bu sistemleri oluşturan komponentlerin fonksiyon, performans, verim, güvenilirlik veya ömürlerinin değerlendirilmesi,
- Komponentlerin kalite kontrolü,
- Malzeme ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarının karakterizasyonu ve
- Temel tribolojik prosesleri, sürtünme kaynaklı enerji kayıplarının veya aşınma kaynaklı malzeme kayıplarının araştırılması

amaçları ile gerçekleştirilen tribolojik deneyler Şekil 4.1.'de şematik olarak gösterilen 6 farklı şekilde gerçekleştirilebilir [2].

Kate- gori	Test Çeşitleri	Sembol	Kompresör
1	Makine - Saha Testleri		Gerçek uygulama durumunda yapılan testler Örn : Kompresör saha testleri •Pahalı, •Yeterli hassasiyet sağlanamaz, •Zaman alıcı
2	Makine - Tezgah Testleri		Kompresör ömür deneyleri •Nispeten daha ucuz, •Geliştirmek yapmak istenen ayrıntılar için yeterli hassasiyet sağlanamaz, •Zaman alıcı
3	Sistem - Tezgah Testleri		Tribolojik sistemi oluşturan komponentler kullanılır ve sistemin spesifik bir özelliği test edilir.
4	Komponent - Tezgah Testleri		Çalışma koşullarını simüle eden model düzeneklerle çalışmak : •Aşınma – sürtünme deney düzenekleri
5	Model Testler		Laboratuvar şartlarında aşınma - sürtünme mekanizmalarının araştırılması için tasarlanan testler
6	Laboratuvar Testleri		

Şekil 4.1 Tribolojik deney kategorileri [2].

Makine parçalarının tamamının, belirli bir sistemin veya komponentin saha veya tezgah testleri ile incelenmesi,

- Pahalı ve zaman alıcı olması
- Standart ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesindeki zorluklar ve
- Tekrar edilebilirliğin sağlanamaması nedenleri ile

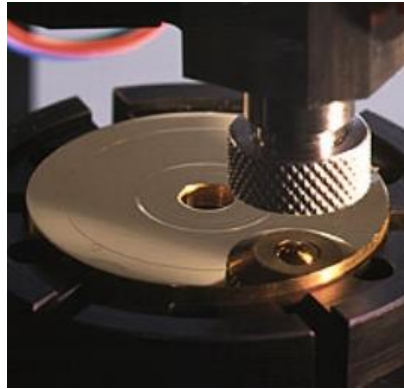
çok fazla tercih edilmemektedir [2].

Özellikle bir sistemin tribolojik özelliklerinin incelenmesine yönelik çalışmalarda, çalışma koşullarının mümkün olduğunca simüle eden, numune hazırlaması ve ölçümü daha hızlı ve pratik olan standart aşınma – sürtünme deney düzenekleri kullanılmaktadır. Aşağıda malzeme ve yağların tribolojik özelliklerinin incelenmesine yönelik çalışmalarda sıklıkla kullanılan aşınma – sürtünme deney düzenekleri özetlenmiştir.

4.1. Pin on Disk Test Cihazı

Bu test yöntemi ile laboratuvar şartlarında kayma aşınması gerçekleştiren malzemelerdeki aşınma miktarını pim ve disk şeklindeki numuneler yardımıyla belirlemek mümkündür. Malzemeler genelde abrasif olmayan şartlarda test edilmektedirler. Cihazın standart deney numuneleri ile kullanılması yoluyla yağlayıcıların performanslarının belirlenmesi de mümkündür. Pin on disk cihazı ayrıca tribolojik bir sistemin yağlama karakteristiklerini belirleyen Stribeck eğrilerinin çıkarılmasında da kullanılan en fazla genel geçerliliğe sahip aşınma – sürtünme deney düzeneğidir [28].

Pin on disk aşınma testi için iki numune gerekmektedir. Bunlardan ilki düz veya küre şeklinde bir yüzeye sahip pim diğeri ise pime dik olarak yerleştirilmiş ve genelde daire şeklinde olan yassı disklerdir. Test pimin veya disk şeklindeki numunenin disk düzlemi boyunca dairesel hareket yapması şeklinde gerçekleşmektedir. Yük genelde pim numunesi üzerinden, sisteme bağlı olan bir kola ağırlık asılması yoluyla uygulanmaktadır. Bunun dışında, hidrolik ve pnömatik yöntemler sayesinde temas bölgesinin daha hassas bir şekilde sabit bir yük altında tutulması sağlanabilmektedir. Pin on disk cihazına ait pim ve disklerin temas geometrileri Şekil 4.2.' de görülmektedir [28].



Şekil 4.2 Pim ve disk numunelerin temas geometrileri [29].

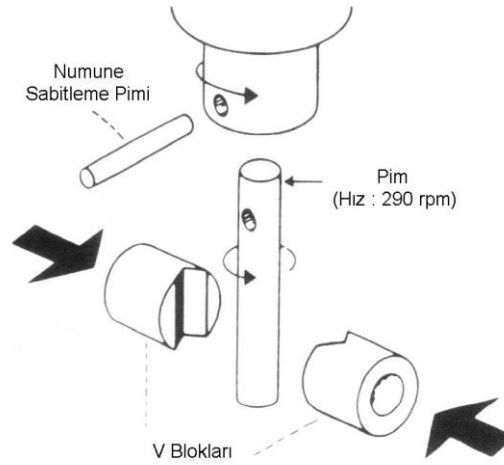
4.2. Pin & V Block Test Cihazı

Bu cihaz, pim ve V bloklarından oluşan test numuneleri ile sıvı yağlayıcıların aşınma özelliklerinin bulunmasında kullanılmaktadır. Yağların ve katkı maddelerinin tribolojik performansının belirlenmesine yönelik olan çalışmalarda, özellikle yüksek viskoziteli yağ örnekleri için daha tekrar edilebilir sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür. Bunun yanı sıra, belirli bir yağ örneği içerisinde çalışan test parçalarının sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin ölçümü için de kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan standart pim ve V bloğu numuneleri Şekil 4.3.'de bulunmaktadır [30].



Şekil 4.3 Pin & V Block test cihazı standart pim ve V bloğu numuneleri [31].

Deneylerde, dikey olarak yağ haznesinin içerisine batırılmış olan pim numunesi, motor yardımı ile iki sabit V bloğu arasında dairesel olarak döndürülür. V bloklarına bir dişli sistemi yardımı ile kontrollü olarak istenen yük uygulanır ve üzeri ölçekli bir makara sistemi yardımı ile yükün devamlılığı sağlanır. Aşınmayı ölçmek için yapılan deneylerde, deney sonucu belirli bir deney süresi sonunda yataklar üzerindeki yükün sabit tutulması için dişli sistemin kaç diş döndüğü sayılarak belirlenir [32].



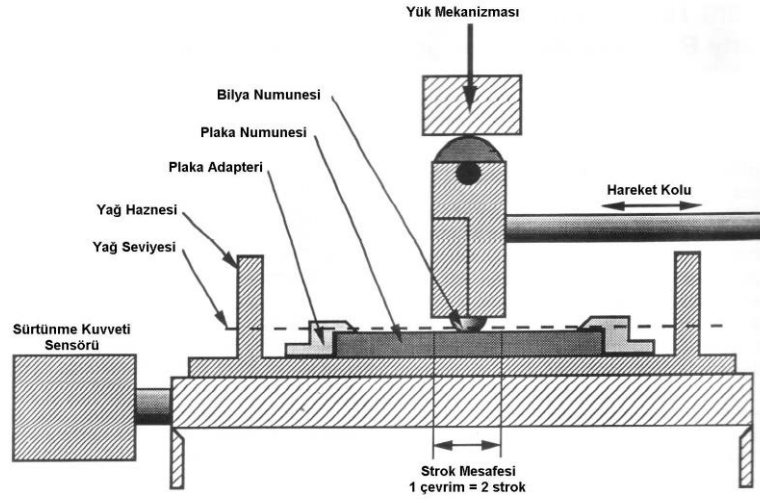
Şekil 4.4 Pin & V Block test cihazının çalışma mekanizması [30].

4.3. Ball on Flat Test Cihazı

Bu test yöntemi lineer bir şekilde ileri - geri (reciprocating) hareketi yapan seramik, metal ve diğer malzemelerin kayma aşınmasının bulunmasında kullanılır. Test sırasında hareket yönü periyodik olarak değişmekte ve bu sayede düz bir çizgi boyunca aşınmanın gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Yöntem ile asıl hesaplanmak istenen bilye ve plakadaki aşınma hacmidir, bunun yanında kinetik sürtünme katsayısı değeri de hesaplanabilmektedir [33].

Test cihazı, Şekil 4.5.'de görülen yassı yüzeyli test plakası ve onun üzerinde periyodik bir şekilde kayan küresel numuneden oluşmaktadır. Yük yatay bir şekilde monte edilmiş olan plaka üzerine bilye üzerinden dikey bir şekilde uygulanmaktadır. Gerçekleşen kayma hareketi ileri-geri olduğundan kayma hızı ve hareket yönü sürekli olarak değişmektedir. Bu nedenle, deneyler sabit bir hızda gerçekleşmemektedir [33].

Ball on flat tarzı ileri-geri hareket ile çalışan test cihazları, bir çevrim sırasında aldığı yol (strok) değerine bağlı olarak iki farklı amaç için kullanılabilir. Strok'un 1 mm.nin altında olduğu durumlarda, titreşim nedeniyle oluşan kazımalı veya yorulmalı aşınmayı simüle ederken; 1 mm.nin üzerindeki strok değerlerinde pistonun ileri-geri hareketine benzer kaymalı aşınmayı simüle etmektedir.



Şekil 4.5 Ball on flat test cihazı şematik görünüşü [33].

Pim numunesinin düz bir yüzey ile birlikte çalıştığı pin on disk, ball (pin) on flat gibi test cihazları, farklı temas geometrilerini simüle edebilmesi ve her iki numune üzerindeki aşınma ölçümlerinin pratikliği gibi avantajlara sahiptir. Ancak İ.T.Ü. Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Yüzey Teknolojileri Lab. bünyesinde bulunan pin on disk test cihazı ile yağlı ve soğutkanlı ortamda deney yapılamaması ve ileri – geri (reciprocating) hareketi ile çalışan fretting cihazının kompresör ömür deneyleri ile uyumlu sonuçlar vermemesi nedeniyle her iki test cihazı da bu tez çalışması deney planı içerisinde yer almamıştır. Bunun yanında Arçelik A.Ş. bünyesinde bulunan pin & V block test cihazının, malzemeleri aşınma miktarlarına bağlı olarak sıralamaya uygun olmaması nedeniyle bu cihaz da deney planından çıkarılmıştır. Biyel – perno malzeme çiftinin aşınma özelliklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik olarak yapılan bu çalışmada, bu üç cihaz yerine Arçelik A.Ş. bünyesinde bulunan Falex Corporation şirketine ait #1 block on ring test cihazı kullanılmıştır. Cihaz ve standart test numuneleri ile ilgili bilgiler aşağıda yer almaktadır.

4.4. Block on Ring Test Cihazı

Bu test cihazı, blok ve halka şeklinde hazırlanabilen her türlü parçanın kayma aşınmasına olan direncinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Deneyler, servis şartlarının daha iyi sağlanabilmesi için pek çok yağlayıcı, sıvı ve gaz ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca dönme hızı ve yük miktarları da çalışma şartlarına bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Deneyler, belirli bir hızda ve devirde dairesel

veya sarkaç hareketi gerçekleştirebilen test halkası üzerine test bloğunun yerleştirilerek, istenilen yük miktarının blok üzerinden y eksenine boyunca temas yüzeyine dik bir şekilde uygulanması yöntemiyle gerçekleştirilmektedir [34]. Deneylerde kullanılan standart blok ve halka numunelerinin görüntüsü Şekil 4.6.'da bulunmaktadır.



Şekil 4.6 Falex Block on Ring cihazı standart blok ve halka numuneleri

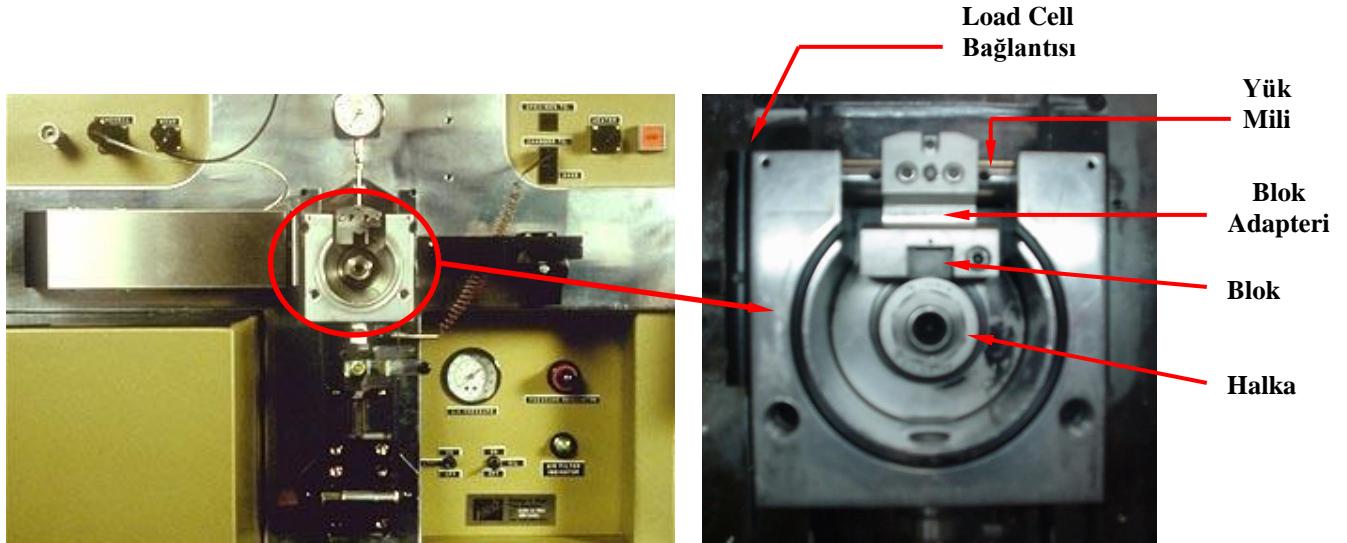
Falex Block on Ring test cihazı, test ünitesi ve kontrol ünitesi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Cihazı oluşturan bu iki ünitenin bileşenleri, teknik özellikleri ve kompresör şartlarını daha yakından simüle etmesi için gerçekleştirilen modifikasyonlar deneysel çalışma bölümü içerisinde anlatılacaktır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışma içerisindeki aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği Falex #1 Block on Ring cihazı, test ünitesi ve kontrol ünitesi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bu iki ünite ile ilgili teknik bilgiler ve cihazın kompresör şartlarına benzer şartlarda çalışmasını sağlamak için gerçekleştirilen modifikasyonlar aşağıda yer almaktadır.

5.1. Block on Ring Cihazı Test Ünitesi

Block on ring cihazı test ünitesi, Şekil 5.1.'de görülen motor, test bloğu ve halkası, numune adapterleri ve load cell bağlantısından oluşmaktadır.



Şekil 5.1 Falex Block on Ring cihazı test ünitesi, numune ve adapter görüntüleri [31].

Yük, blok adapteri üzerinden halka numunesine, yük milini her iki taraftan sabitleyen iki kol yardımıyla oluşturulan 10/1 oranlı kaldıraç sistemi vasıtası ile uygulanmaktadır. Maksimum uygulanabilir test ağırlığı 59 kg. (130 lb.)'dır [35].

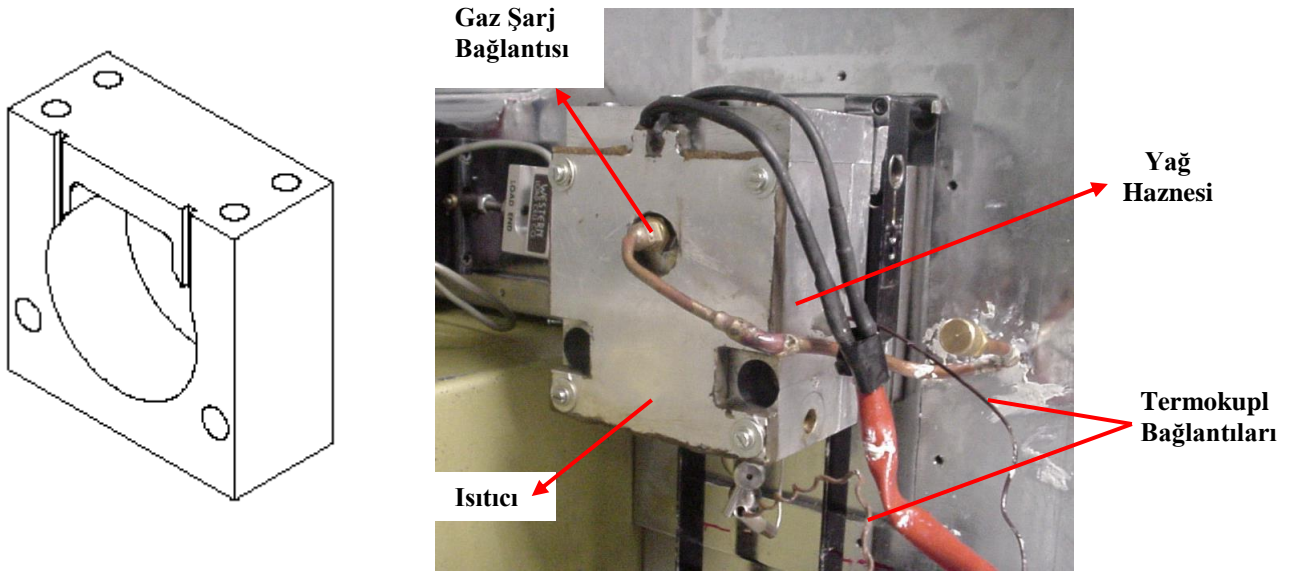
Test ünitesinin motor kısmına farklı boyutta kasnakların bağlanması ile maksimum 7411 rpm'lik dairesel hız değerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Yine motor kısmına

bağlanan bir kol yardımıyla 465 rpm hızla sarkaç hareketi gerçekleştirmek mümkündür [35].

5.1.1. Yağ Haznesi Tasarımı

Kompresör şartlarının daha iyi simüle edilebilmesi için deneylerin yağlı ortamda ve sıcaklık kontrollü olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla blok ve halka numunelerinin bulunduğu bölümü tamamen kapatarak ortama yağ beslenmesine olanak sağlayan bir yağ haznesi tasarlanmıştır. Bu sayede sistem, test numuneleri tamamen yağ içerisine daldırılarak deneyler yapılabilir hale gelmiştir.

Aynı zamanda, tasarlanan yağ haznesi üzerine bağlanan 120 W gücünde plaka tipi ısıtıcı ve termokupl bağlantıları yardımıyla, ortamdaki yağ sıcaklığının kontrolü sağlanmıştır. Şekil 5.2.'de hazırlanan yağ haznesinin arka kısmının şematik çizimi ile hazne, ısıtıcı ve termokupl bağlantılarının görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5.2 Yağ haznesi şematik çizimi ve bağlantı görüntüleri [35].

5.2. Block on Ring Cihazı Kontrol Ünitesi

Şekil 5.3.'de görülen kontrol ünitesi sıcaklık, devir çevrim sayısı, sürtünme kuvveti, test süresi göstergelerinin yanı sıra sıcaklık ve hız kontrol sistemlerini barındırmaktadır.



Şekil 5.3 Block on Ring cihazı kontrol ünitesi [35].

5.2.1. Sıcaklık Kontrolü

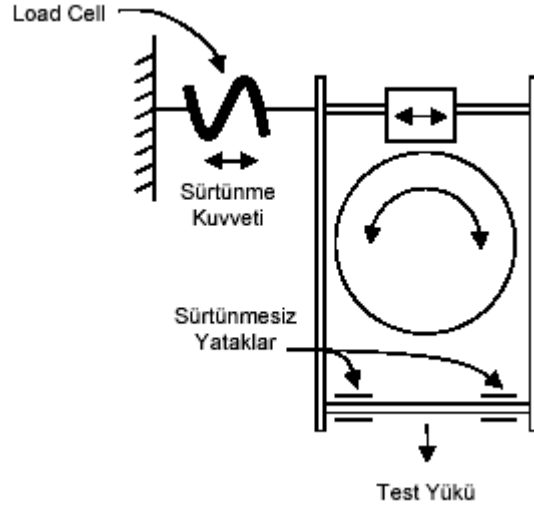
Cihazın test ünitesinde bulunan orijinal termokupl ile birlikte çalışan sıcaklık göstergesi, Şekil 5.2’de görülen yağ haznesinin içerisine yerleştirilen termokupl ile karşılaştırıldığında, artan sıcaklık değerleri ile birlikte farklı değerler gösterdikleri görülmüştür. Bu nedenle cihazın orijinal sıcaklık göstergesi devre dışı bırakılmış ve daha önceden kalibrasyonu yapılmış olan termokupl, dijital bir termometre ile kullanılmaya başlanmıştır.

5.2.2. Hız Kontrolü

Hız kontrolörü ve hız göstergesinin kalibrasyonunun yapılması amacıyla, cihazın motoruna bağlı olan sürücü şaftın dönme hızı farklı değerler için stroboskopa ölçülmüş ve göstergede görülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta, cihazın hız göstergesi ile ilgili bir problem olmadığı görülmüştür.

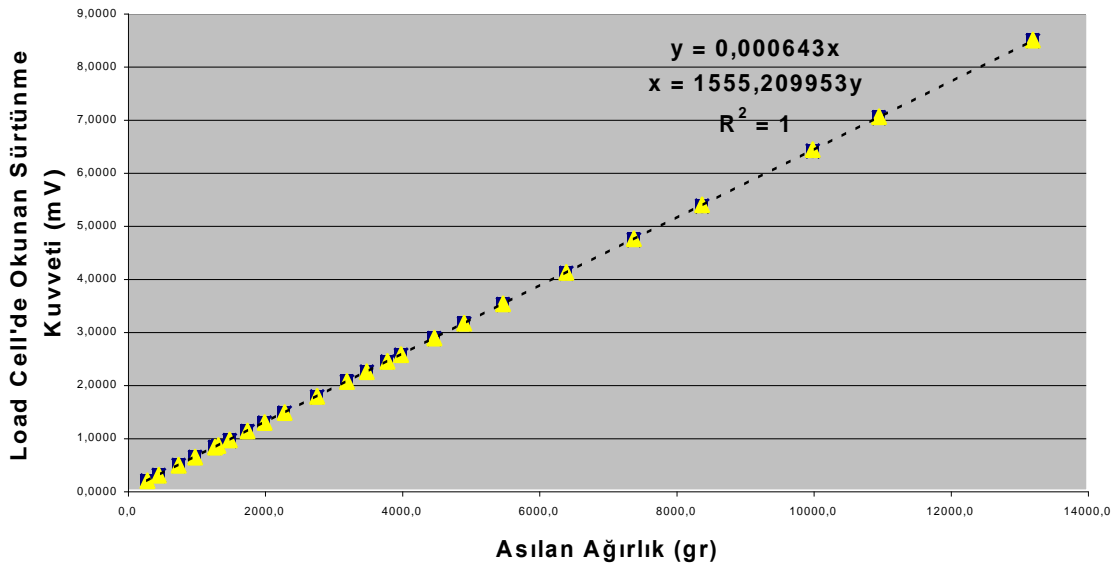
5.2.3. Sürtünme Katsayısı Ölçümü Çalışmaları

Block on ring cihazının standart kullanımında sürtünme kuvveti değerleri Şekil 5.4’de şematik olarak görülen, sadece hareket eksenindeki kuvvet değerlerini algılama özelliğine sahip olan load cell yardımıyla toplanmakta ve kontrol ünitesi üzerindeki göstergeden okunarak kaydedilebilmektedir.



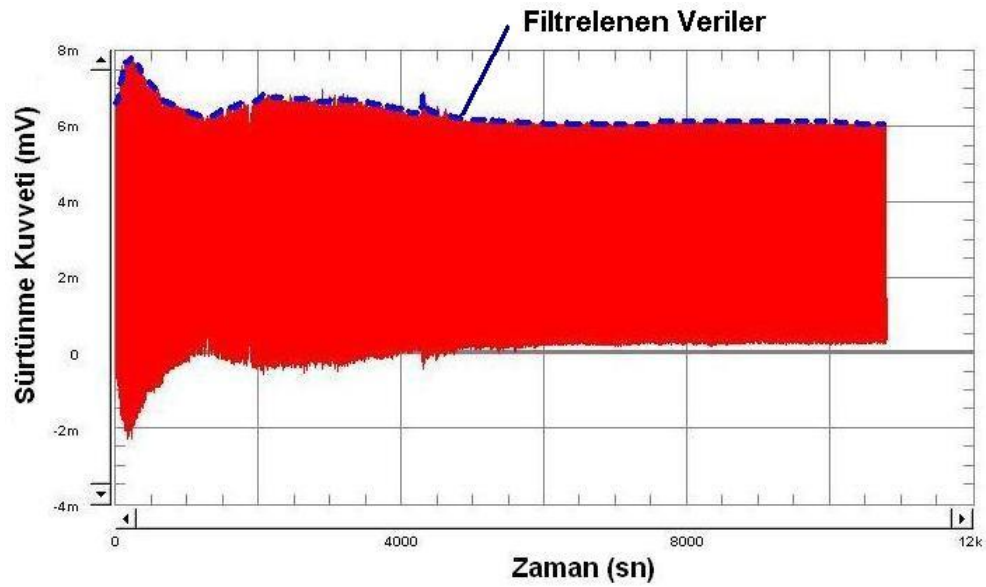
Şekil 5.4 Deney düzeneğindeki yük akışının şematik görünüşü [36].

Gösterge sürtünme kuvveti değerlerini virgülden sonra tek hane hassasiyeti ile verebilmekte, dolayısıyla sürtünme katsayısının hassas bir şekilde ölçümü mümkün olmamaktadır. Ayrıca, sistemin bu şekilde kullanılması halinde sürtünme kuvveti değerlerini sürekli olarak bilgisayara kaydetmek mümkün olamayacağından load cell'e yeni bir veri alma sistemi bağlanmış ve sürtünme kuvveti göstergesi devre dışı bırakılmıştır. Bağlanan bu yeni veri alma sistemi ile load cell'de milivolt (mV) cinsinden okunan değerler, zaman değerleri ile birlikte sürekli olarak bilgisayara kaydedilebilmektedir. Okunan mV değerlerinin gram cinsinden karşılıkları, load cell'e ağırlıkları bilinen malzemeler asılarak kalibre edilmesi yoluyla elde edilmiştir. Load cell'in kalibrasyon sonuçları Şekil 5.5'de görülmektedir.

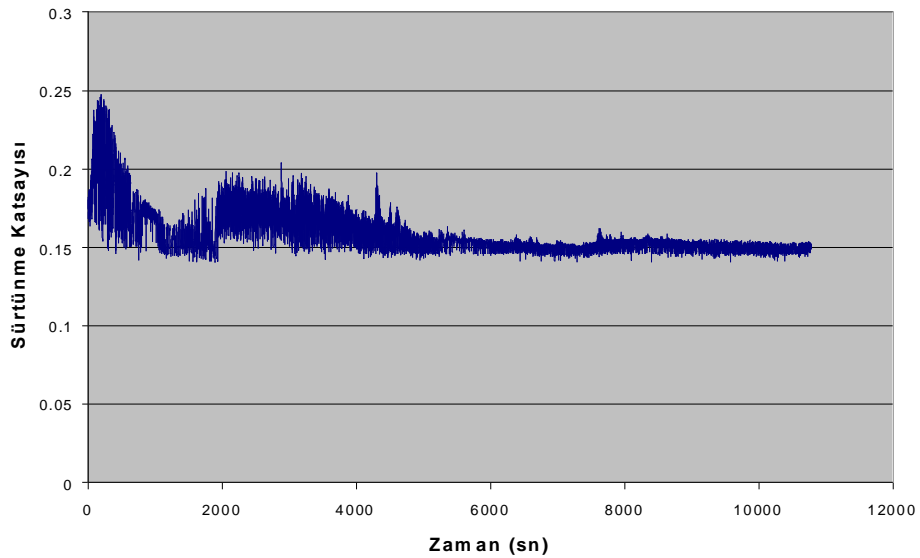


Şekil 5.5 Load cell kalibrasyon verileri

Milivolt cinsinden toplanan ve ardından her biri Newton değerine dönüştürülen veriler daha sonra, hazırlanan bir program yardımıyla filtrelenmektedir. Bu filtreleme işlemi sırasında her bir saniye içerisindeki maksimum sürtünme kuvveti değeri bu verilerin toplandığı saniye değerleri ile birlikte kaydedilmektedir. Dolayısıyla, deneyler sonucunda bildirilen sürtünme katsayısı değerleri maksimum sürtünme katsayısı verilerinin ortalamasıdır. Aşağıda ilk olarak veri alma sistemi tarafından toplanan sürtünme kuvveti (mV) verileri ile çizilen ve daha sonra Newton'a dönüştürülüp filtrelenen sürtünme kuvveti verileri kullanılarak çizilen diyagramlar görülmektedir.



Şekil 5.6 . Veri alma sistemi tarafından toplanan sürtünme kuvveti (mV) değerleri ile çizilen grafik.



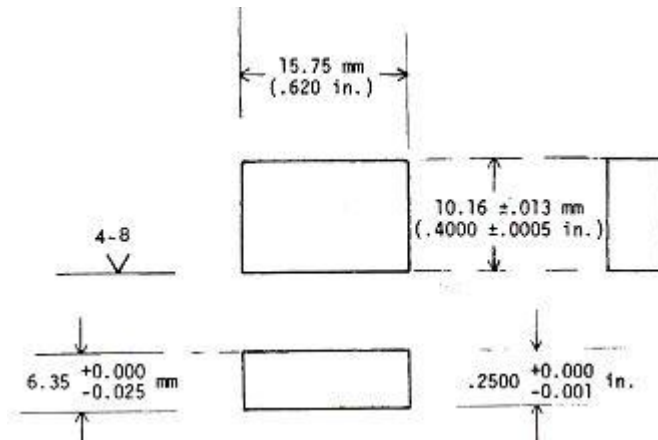
Şekil 5.7 Newton'a dönüştürülen ve filtrelenen veriler kullanılarak çizilen sürtünme katsayısı – zaman grafiği.

Yapılan deneysel çalışmada, Falex Block on Ring test cihazı ve ASTM G 77 – 93 standartında belirtilen standart blok ve halka boyutlarında hazırlanan numuneler ile, biyel – perno malzeme çiftinin çalışma koşulları benzeştirilerek aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde blok numuneleri biyeli temsil etmektedir ve üretimde olduğu gibi demir esaslı sinter malzemeden hazırlanmıştır. Halka numuneleri ise pernoyu temsil etmektedir ve 100Cr6 (AISI 52100) çeliğinden işlenmiştir. Blok numunelerinin biyeli, perno numunelerinin ise halkayı simüle etmesindeki başlıca sebep üretim kolaylığıdır. Halka numunelerini toz metalürjisi ile üretmek için yeni bir kalıp tasarımı ve imalatı gerektiğinden dolayı şekil olarak daha basit olan blokları bu yöntemle hazırlamak tercih edilmiştir.

Aşağıda blok ve halka numunelerinin hazırlanışı ve karakterizasyon çalışmaları anlatılmaktadır.

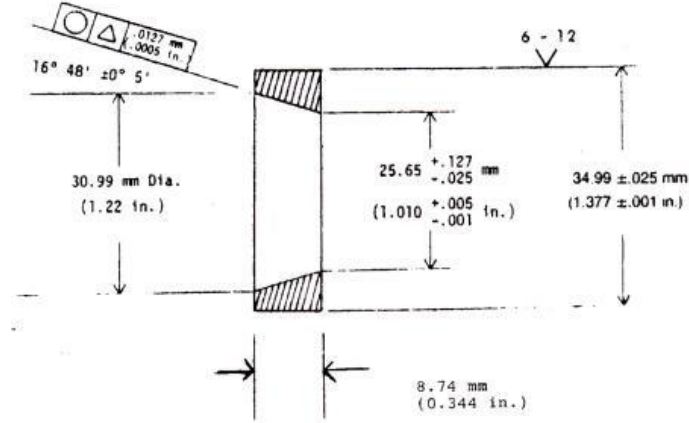
5.3. Blok ve Halka Numunelerinin Hazırlanması

Kompresör biyelerinin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik block on ring cihazı ile yapılan deneylerde, yukarıdaki bilgiler ışığında, 3 farklı alaşımdaki demir esaslı sinter malzeme, uygulanan buhar işleminin ardından, mangan fosfat kaplamalı ve kaplamasız olarak kullanılmıştır. Blok numunesi şeklinde hazırlanan bu numuneler Toz Metal A.Ş.'de biyel üretim koşullarında hazırlanmış, buhar işlemi uygulanmış, ardından freze ve taşlama işlemleri ile istenen boyut ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine getirilmiştir. Hazırlanan numunelerin teknik resim görüntüleri aşağıda bulunmaktadır.



Şekil 5.8 Blok numunelerinin teknik resim görüntüsü [34].

Aşınma deneylerinde pernoyu temsil eden halka numuneleri ise, 100Cr6 (AISI 52100) çeliğinden hazırlanmıştır. Halka numunelerinin hazırlanması sırasında, ilk olarak büyük çaplı silindirik bloklardan CNC torna tezgahında Şekil 5.9.'daki boyutlara getirilmiş, ardından yüzeye ısıl işlem uygulanmış ve son olarak yüzey kalitelerinin birbirlerine yaklaştırılması amacıyla parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.9 Halka numunesinin teknik resim görüntüsü [34].

5.4. Malzeme Karakterizasyonu Çalışmaları

Kimyasal bileşiminin belirlenmesi amacıyla numunelerin karbon (C), kükürt (S) değerleri Leco CS-225 cihazı ile, içerdikleri diğer elementlerin yarı kantitatif analizleri ise Jeol JSM-6400 Marka Taramalı Elektron Mikroskopuna bağlı olarak çalışan Enerji Dağılımlı X-ışın spektrometresi (EDS) ile yapılmıştır.

5.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Deneylerde kullanılan blok ve halkaların yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mahr Perthen Perthometer S&P Profilometre cihazında, Focodyn optik uç kullanılarak, LT: 1,750 µm, VB: 62,5 µm parametreleri ile yapılmıştır.

5.6. Sertlik Ölçümleri

Blok numunelerinin sertlikleri Shimadzu DXT Dijital Rockwell Sertlik Ölçüm cihazı ile, 1/16 inch'lik bilya kullanılarak ve 60 N yük uygulanarak Rockwell F cinsinden ölçülmüştür.

Isıl işlemlili ve nitrürlü halkaların yüzey sertlikleri ise Fischer H100 XYPROG dinamik ultra mikrosertlik cihazı ile 20 mN yükün 0,5 sn'er saniyelik aralıklarla uygulanması ile ölçülmüştür.

5.7. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneylerinin tümü Falex #1 Block on Ring test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında blok şeklindeki numuneler biyeli, halka numuneleri ise pernoyu temsil etmektedir. Cihaz, numune boyutları ve hazırlanması ile ilgili bilgiler Bölüm 4.4. ve 5.3.’de verilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan parametreleri şu şekilde özetlemek mümkündür:

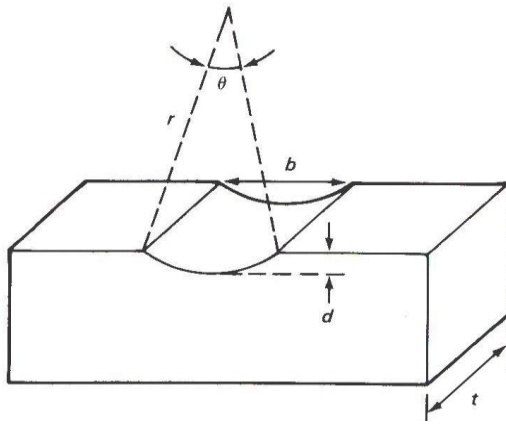
Tablo 5.1 Deney parametreleri

Deney Parametreleri	Değerler
Yük (N)	300
Temas Basıncı (Mpa)	255
Hız (rpm)	300
Frekans (Hz.)	5
Süre (dk.)	180
Sıcaklık (°C)	75 ± 1
Yağlayıcı	Mineral Yağ
Yağ Vizkozitesi	10 cSt @ 40 °C

Deneyler sırasında yük değeri olarak kompresörün çalışma şartlarında biyel perno deliği – perno yatağında bir çevrim sırasında uygulanan maksimum değer olan 300 N seçilmiştir. Sinter demir ve 100Cr6 çeliğinin elastisite modülleri ve poisson oranları ile uygulanan yük değerinin kullanıldığı bir formül ile temas noktasındaki Hertz basıncı değeri 255 MPa olarak hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri sırasında kullanılan hız değerinin (300 rpm) kompresörün rejim halinde çalışması sırasında ölçülen hız değerlerinin (3000 rpm) 1/10’u mertebesinde olması deneylerin daha ağır şartlarda ve sınır yağlama koşullarında gerçekleştirildiğinin göstermektedir. Bunun yanında yağ sıcaklığı değeri de yine kompresörün rejim halinde çalışırken yatak bölgesine yakın yerlerden ölçülen değerlere uygun olarak seçilmiştir.

5.7.1. Blok Aşınma Hacmi Ölçümü

Blok numunelerindeki aşınma hacmi ASTM G77 – 98 “Standart Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block on Ring Wear Test” standardında belirtildiği gibi; halka çapı ve blok genişliği bilinen numuneler için blok aşınma iz genişliğinin ölçülüp aşağıdaki formülde hesaplanması ile bulunmuştur.



Şekil 5.10 Blok numunesi aşınma izi görüntüsü [34].

t : Blok genişliği, mm

b : Ortalama aşınma iz genişliği, mm

D : Halka çapı, mm olmak üzere;

d : Blok aşınma izi derinliği, mm.

$$\text{Blok Aşınma Hacmi} = \frac{D^2 t}{8} \left[2 \sin^{-1} \frac{b}{D} - \sin \left(2 \sin^{-1} \frac{b}{D} \right) \right] \quad (5.1.)$$

5.1. no.lu eşitlikte de görüldüğü üzere, ASTM standartlarında anlatılan yöntem halka çapı ve blok aşınma iz genişliği verilen bir numune için, aşınma hacminin halka çapı ile orantılı olacağını kabul etmekte ve blok aşınma izi derinliğini formül içerisinde almamaktadır. Deneysel çalışma sırasında, blok aşınma izi genişlikleri ile hesaplanan aşınma hacminin iz derinlikleri ile uyumlu sonuçlar verip vermediğinin kontrol edilmesi amacıyla, blok numunelerinin aşınma izi derinlikleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için, yüzey pürüzlülüklerinin ölçümlerinde olduğu gibi Perthometer S&P Profilometre cihazı kullanılmıştır.

5.7.2. Halka Aşınma Derinliği Ölçümü

Halka numunelerinin yüzeyinde oluşan aşınma izi derinliği sertlik izi basma yöntemiyle ölçülmüştür. Bu yönteme göre, bir yüzeye Vickers ucu ile basılan sertlik izinin derinliği ile izin köşegen boyutları arasında 1/7 oranı bulunmaktadır. Köşegen boyutu ile iz derinliği arasındaki bu ilişkiyi kullanarak aşınma iz derinliğini şu eşitlikle ölçülmektedir:

d₀: Sertlik izi köşegeninin aşınma deneyi öncesi boyutu

df: Sertlik izi köşegeninin aşınma deneyi sonrası boyutu

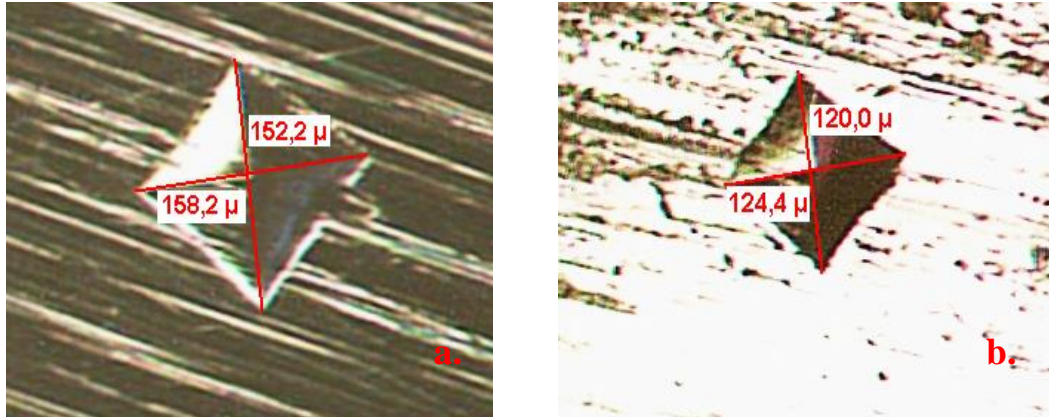
C: Kullanılan uca bağlı olan bir sabit.

(Bu değer Vickers ucu için 7.00 , Knoop için 30.52'dir)

z: Aşınma iz derinliği olmak üzere;

$$z = \left(\frac{d_0 - d_f}{C} \right), \text{dir [7].} \quad (5.2.)$$

Yukarıda anlatılan sertlik izi ile aşınma derinliği ölçümü yönteminin kullanılması amacıyla halka numuneleri yüzeyine Wolpert Universal Sertlik Ölçme Cihazı ve Vickers ucu kullanılarak 5, 10 ve 15 kg. yüklerle izler basılmış ve aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. 5 kg. ile basılan sertlik izlerinin çok küçük olması ve ölçümler sırasında çıkarabileceği zorluklar; 15 kg. yük ile basılan izlerin ise yağ rezervuarı görevi görerek iz çevresinde aşınma oluşumu engellemesi nedeniyle deneylerde 10 kg.'ın kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 5.11.'de deneylerde kullanılan bir halka numunesi üzerindeki sertlik izinin Olympus SZH 10 stereo mikroskopla çekilen deney öncesi ve deney sonrası görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5.11 Basılan sertlik izinin (a) deney öncesi, (b) deney sonrası görüntüsü.

5.7.3. Sürtünme Katsayısı Ölçümü

Sürtünme kuvveti değerleri cihaza bağlanan veri alma sistemi ile her bir deney süresince sürekli olarak kaydedilmiştir. Deneylerde ölçülen ve hesaplanan sürtünme katsayıları, deney süresince ölçülen maksimum sürtünme katsayılarının ortalamasıdır. Sürtünme katsayısı ölçüm sistemi ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 5.2.3.'de verilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI

Sonuçlar kısmı, deneysel çalışma sırasında gerçekleştirilen pürüzlülük, sertlik ölçümleri, malzeme ve yüzey işlemi karakterizasyonu çalışmaları ile aşınma ve sürtünme katsayısı ölçümlerini içermektedir.

6.1. Malzeme Karakterizasyonu Çalışmaları

6.1.1. Kimyasal Bileşimlerin Belirlenmesi

Leco CS – 225 karbon - kükürt analiz cihazı ve Jeol JSM 6400 Taramalı Elektron Mikroskopuna bağlı olarak çalışan Enerji Dağılımlı X – ışını spektrometresi ile yapılan ölçümler sonucunda, blok ve halka numunelerin kimyasal bileşimleri şu şekilde bulunmuştur:

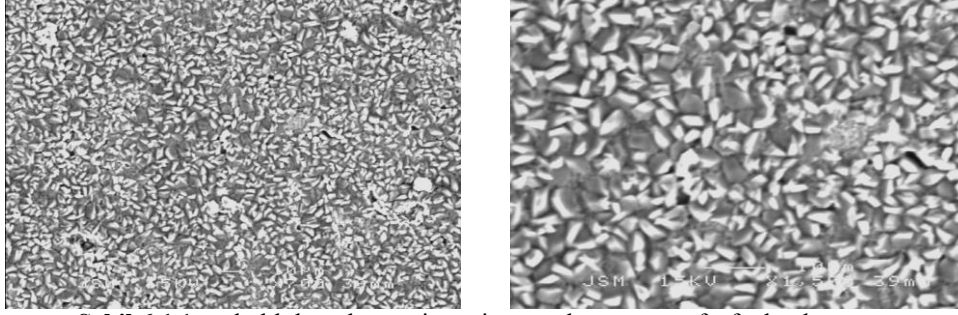
Tablo 6.1 Blok ve Halka numunelerinin kimyasal bileşimleri

Numune No.	Kimyasal Bileşim						
	%S	%C	%Cu	%P	%Si	%Cr	%Fe
Blok 1	0,19	0,43	1,87	-	-	-	97,50
Blok 2	0,25	0,32	-	-	-	-	99,43
Blok 3	-	0,20	-	0,31	-	-	99,45
Halka	-	1,00	0,20	-	0,20	1,35	97,25

Kimyasal bileşimleri yukarıda verilen buhar işlemi uygulanmamış ve mangan fosfat kaplı blok numunelerinin Taramalı Elektron mikroskobu ile çekilen yüzey fotoğrafları Ekler bölümünde verilmektedir.

6.1.2. Mangan Fosfat Kristal Yapısı

Buhar işlemi uygulanmış olan her 3 blok malzemesine de aynı banyo şartlarında mangan fosfat kaplanmıştır. İşlem sonrasında blok numuneleri yüzeyinde oluşan kaplama kalınlığı yaklaşık 5 – 6 µm mertebesindedir. Kaplanan blokların kristal yapıları Jeol JSM 6400 Taramalı Elektron Mikroskobu ile görüntülenmiştir. Şekil 6.1.'de üretimde de kullanılan 1 no.lu blok malzemesine yapılan mangan fosfat kaplamanın x700 ve x1500 büyütmedeki kristal yapı fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 6.1 1 no.lu blok malzemesi üzerine yapılan mangan fosfat kaplamanın x700 ve x1500 büyütmedeki kristal yapı görüntüleri.

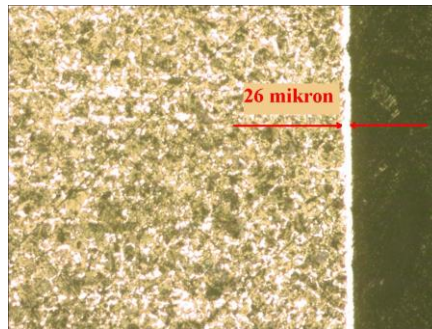
Şekil 6.1.'de görülen kaplama, homojen bir şekilde dağılmış olmasına rağmen sivri uçlu ve kalın kristalli olması nedeniyle istenen tipte bir yapıya sahip değildir. Aşınma direncinin artırıcı yönde rol oynayacak mangan fosfat kaplama kristal yapısının uzun ve sivri taneler yerine daha ince ve küresel boyutlu olması istenmektedir.

Daha önce yapılan kaplama denemelerinde, 1 no.lu malzeme yüzeyinden alınan EDS analizi neticesinde, kaplamadan okunan mangan ve fosfor ile birlikte alt malzemeden gelen demir ve bakır da okunurken; Şekil 6.1.'de görülen kaplama yüzeyinden alınan EDS analizinde yüzeyden sadece mangan ve fosfora ait değerler elde edilmektedir. Bu sonuç kaplamanın kalın bir tabakaya sahip olduğunun bir göstergesidir.

Ekler bölümünde her üç malzemeye ait mangan fosfatlı numunelerin kristal yapı görüntüleri bulunmaktadır.

6.1.3. Nitrür Tabakası

Halka numuneleri yüzeyine yapılan nitrürlenme işleminin kesit görüntüleri Olympus SZH 10 stereo mikroskop ile çekilmiştir. Şekil 6.2.'de görülen gaz nitrürlenme işlemi yapılmış ve yüzeyi parlatılmış halka numunesindeki beyaz tabaka kalınlığı yaklaşık 26 μm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.2 Nitrürlenmiş halka numunesinin kesit görüntüsü

Beyaz tabaka kalınlığının fazla olması, poroz bir yapıya sahip olan, düşük yoğunluklu ve aşınma direnci düşük olan tabakanın yüzeyden parlatma işlemi ile tamamen uzaklaştırılmadığını göstermektedir. Bu durum nitrürlü halkaların aşınma performansını olumsuz yönde etkileyecektir.

6.2.Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Bölüm 5.4.'de belirtilen cihaz ve ölçüm yöntemiyle elde edilen blok ve halka yüzey pürüzlülüğü değerleri aşağıda özetlenmiştir.

Ölçüm sonuçları, Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) ve Rz (en yüksek 5 tepe ile en derin 5 vadi arasındaki uzaklık) değerleri olarak bildirilmiştir.

Tablo 6.2 Blok ve halka numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Yüzey Pürüzlülüğü	Blok 1	Blok 2	Blok 3	Mangan Fosfat	Mangan Fosfat	Mangan Fosfat	Isıl İşlemler	Nitrürlü Halka
Rz(μ)	2,70	2,44	3,15	14,99	16,03	13,86	4,74	6,27
Ra(μ)	0,20	0,17	0,16	2,14	2,23	1,95	0,60	0,77

Tablodan da görüldüğü üzere, mangan fosfat kaplama yapılmamış olan blokların yüzey kaliteleri birbirlerine oldukça yakındır ve kaplama işlemi neticesinde de bu fark açılmamaktadır. Deneylerde kullanılan ısıl işlemler ve nitrürlü halkalar da mümkün olduğunca birbirlerine yakın yüzey kalitesindeki numunelerden seçilmeye çalışılmıştır.

6.3. Sertlik Ölçümleri

Bölüm 5.5.'de anlatılan cihaz ve ölçüm yöntemleri ile ölçülen blok ve halka sertlik değerleri aşağıdaki gibidir:

Tablo 6.3 Blok numunelerinin sertlik değerleri

Numune/ Sertlik	Buhar İşlemsiz			Buhar İşlemler		
	Blok 1	Blok 2	Blok3	Blok 1	Blok 2	Blok 3
Sertlik(HRF)	81,47	74,25	86,4	108,29	79,17	105,61

Tablo 6.4 Halka numunelerinin sertlik değerleri

Yüzey İşlemi / Sertlik	Isıl İşlemler Halka	Nitrürlü Halka
Sertlik (HV)	1110	885

Tablo 6.3.'den görüldüğü üzere, 1 ve 3 no.lu blok numunelerin sertlikleri, içerdikleri bakır ve fosfor nedeni ile; buhar işlemi sırasında gerçekleşen çökeltme sertleşmesi mekanizması sonucu artmaktadır. Bu durum üretim sırasında malzemelerin

işlenebilirliğini negatif yönde etkilemektedir. 2 no.lu blok numunesi ise, bakır ve fosfor içermemesi nedeni ile, buhar işleminden diğer iki malzeme kadar etkilenmemiş ve sertlik değerlerinde önemli değişimler gözlemlenmemiştir.

6.4.Aşınma – Sürtünme Katsayısı Ölçümleri

Blok ve halka numunelerinin aşınma miktarı ile sürtünme katsayısı ölçüm yöntemi Bölüm 5.6.'da anlatılmıştır. Deneylerde kullanılan malzeme çiftleri, blok aşınma hacmi ve oranı, halka aşınma iz derinliği ve sürtünme katsayısı verileri Tablo 6.5. ve Tablo 6.6.'da verilmektedir.

Deney gruplarının, blok aşınma hacmi, blok aşınma izi derinliği, halka aşınma iz derinliği ve sürtünme katsayısı sonuçlarını içeren karşılaştırma tabloları ise Ekler bölümünde bulunmaktadır.

Tablo 6.5 Buhar işlemi uygulanmamış blok – ısıtılmış ve nitrürlü halka deney sonuçları.

Parametreler / Numuneler	1 No.lu Blok - Isıl İşlemli Halka	1 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	2 No.lu Blok - Isıl İşlemli Halka	2 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	3 No.lu Blok - Isıl İşlemli Halka	3 No.lu Blok - Nitrürlü Halka
Blok Aşınma Hacmi (mm ³)	72,7	63,8	61,3	52,4	77,0	55,0
Blok Aşınma Hızı (mm ³ /sn)	0,020	0,018	0,017	0,015	0,021	0,015
Blok Aşınma İz Derinliği (mm)	43,5	35,3	29,5	25,0	49,9	24,6
Halka Aşınma İz Derinliği (mm)	3,33	2,88	4,11	4,13	4,21	4,01
Sürtünme Katsayısı	0,180	0,173	0,172	0,168	0,168	0,170

Tablo 6.6 Mn fosfat kaplı blok – ısıtılmış ve nitrürlü halka deney sonuçları.

Parametreler / Numuneler	Mn fosfatlı 1 No.lu Blok - Isıl İşlemli Halka	Mn fosfatlı 1 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	Mn fosfatlı 2 No.lu Blok - Isıl İşlemli Halka	Mn fosfatlı 2 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	Mn fosfatlı 3 No.lu Blok - Isıl İşlemli Halka	Mn fosfatlı 3 No.lu Blok - Nitrürlü Halka
Blok Aşınma Hacmi (mm ³)	105,7	70,1	64,5	67,1	62,3	55,6
Blok Aşınma Hızı (mm ³ /sn)	0,029	0,019	0,018	0,019	0,017	0,015
Blok Aşınma İz Derinliği (mm)	108,0	46,2	46,2	40,7	37,3	21,5
Halka Aşınma İz Derinliği (mm)	1,86	2,18	3,84	3,43	3,31	4,51
Sürtünme Katsayısı	0,177	0,154	0,210	0,162	0,163	0,177

Deneyler sonrasında, blok aşınma hacmi değerleri kullanılarak yapılan malzeme sıralaması ile blok aşınma izi derinliği kullanılarak yapılan sıralama arasında önemli farklılıklar oluşmamıştır. Bununla birlikte, iz derinliği değerleri ile çiftler arasındaki farkları daha belirgin bir şekilde belirlemek mümkün olmuştur. Mangan fosfat kaplı blokların aşınma izi derinlikleri, kaplama kalınlığı olan 5 µm bütün ölçüm değerlerinden çıkartılarak bildirilmiştir. Kaplama kalınlığının aşınma hesabından çıkarılması ile hesaplanan bu değerler, hacim ve derinlik değerlerinin karşılaştırılmasının yapıldığı Tablo 6.7.'de *gerçek aşınma iz derinliği* ismi ile verilmiştir.

Tablo 6.7 Blok aşınma hacmi ve aşınma izi derinliklerinin karşılaştırması.

	Aşınma Hacmi (mm³)	Aşınma İz Derinliği (mikron)	Gerçek Aşınma İz Derinliği (mikron)
1 No.lu Blok - Isıl İşl. Halka	72,7	43,5	38,5
1 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	63,8	35,3	30,3
2 Nolu Blok - Isıl İşl. Halka	61,3	29,5	24,5
2 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	52,4	25,0	20,0
3 No.lu Blok Isıl İşl. Halka	77,0	49,9	44,9
3 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	55,0	24,6	19,6
Mn fosfatlı 1 No.lu Blok - Isıl İşl. Halka	105,7	113,0	108,0
Mn fosfatlı 1 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	70,1	51,2	46,2
Mn fosfatlı 2 Nolu Blok - Isıl İşl. Halka	64,5	51,2	46,2
Mn fosfatlı 2 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	67,1	45,7	40,7
Mn fosfatlı 3 No.lu Blok - Isıl İşl. Halka	62,3	42,3	37,3
Mn fosfatlı 3 No.lu Blok - Nitrürlü Halka	55,6	26,5	21,5
Buhar İşl. 1 No.lu Blok - Isıl İşl. Halka	99,5	85,3	80,2
Buhar İşl. 2 No.lu Blok - Isıl İşl. Halka	62,7	34,5	29,5

7. SONUÇLAR VE İRDELEMELER

Buzdolabı kompresörlerinin biyel perno deliği – perno yatağındaki tribolojik özelliklerin belirlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçları şu şekilde açıklamak mümkündür:

- Hazırlanan yeni yağ haznesi, ısıtıcı ve termokupl bağlantılarının yanı sıra, sıcaklık, hız ve sürtünme kuvveti verilerinin daha kontrollü ve hassas bir şekilde ölçülmesini sağlayan kalibrasyon işlemleri neticesinde, block on ring cihazının kompresör şartlarını daha yakından simüle etmesi sağlanmıştır.
- Üretimde kullanılan biyel ve ısıtıcı işlemli perno malzemesi ile bu çifte alternatif malzeme, yüzey işlemi ve kaplamaları içeren deney planı dahilinde, blok ve halka şeklinde standart test numuneleri hazırlanmıştır.
- Hazırlanan blok numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri birbirlerine oldukça yakın olacak şekilde taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Buhar işlemi ve ardından yapılan mangan fosfat kaplama işlemleri sonrasında, kaplama kristal yapısını bozmamak amacıyla herhangi bir yüzey parlatma işlemi gerçekleştirilmemiştir. Buna rağmen, mangan fosfat kaplı blokların yüzey pürüzlülüğü değerleri de birbirlerine oldukça yakındır.
- Bakır ve fosfor içeren 1 ve 3 no.lu blok malzemelerinin sertlikleri buhar işlemi öncesi ve sonrasında birbirlerine yakın değerlerde ve 2 no.lu bloktan fazladır. Bunun sebebi olarak, demir esaslı sinter malzemeler içerisinde alaşım elementi olarak bulunan bakır ve fosforun, buhar işlemi sırasında, çökeltme sertleşmesi mekanizması ile (bkz: Bölüm 5.3.1.1) malzemenin mukavemetini artırması gösterilebilir. Bu iki alaşım elementini de içermeyen 2 no.lu malzemede buhar işlemi öncesi ve sonrasında ölçülen sertlik değerleri arasındaki fark diğer iki malzemeye (1 ve 3 no.lu) kıyasla oldukça azdır.
- Çekilen taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (Ekler – Şekil E.1 – 3.), 1 no.lu blok malzemesinden hazırlanmış olan numunelerinin 2 ve 3 no.lu

malzemelerden hazırlanan bloklara nazaran daha gözenekli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Numunelerin yağ içerisine daldırılması yoluyla gerçekleştirilen deneylerde, poroz yapının yağ haznesi görevi görerek malzemenin aşınma direncini arttırıcı yönde etki etmesi beklenmektedir. Buna karşılık, literatürde benzer malzemelerle yapılan deneylerde, gözenekli yapının aşınma partiküllerini biriktirdiği ve yüzey altı çatlaklarının oluşumuna neden olarak aşınmayı tetiklediği bildirilmektedir. Ayrıca, buhar işlemi neticesinde, poroz yapı çevresinde oluşan kırılğan film tabakası, uygulanan yük ile birlikte tabakalar halinde kalkarak (delamination) aşınmayı tetikleyebilmektedir.

- Blok numunelerine aynı zamanda ve aynı banyo şartlarında yapılan mangan fosfat kaplama işlemleri neticesinde, farklı malzemelerde farklı kristal yapıları gözlemlenmiştir. Kaplama numune yüzeylerine homojen bir şekilde dağılmış olmakla beraber, özellikle 1 ve 3 no.lu blok yüzeylerinde daha iri taneli ve sivri köşeli kristaller oluşmuştur. 2 no.lu blok yüzeyinde ise daha ince taneli ve yoğun bir kaplama tabakası gözlemlenmiştir (Ekler – Şekil A1.1. – 3.2.). Özellikle, alaşımında %2 bakır içeren 1 no.lu malzeme yüzeyinde buhar işlemi neticesinde oluşan bölgesel oksitlerin mangan fosfat kaplamanın tutunumunu olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Her bir numune yüzeyinde yaklaşık 5 – 6 µm mertebesinde mangan fosfat tabakası oluşturulmuştur.
- Halka numunelerine uygulanan ısı işlem (su verme) sonrasında yüzeyde çatlakların (Ekler – Şekil J.3.) oluştuğu görülmüştür. Oluşan bu çatlakların aşınma deneyleri sırasında yüzeyden koparak aşınmayı olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.
- Halka numuneleri yüzeyine uygulanan gaz nitrüleme işlemi neticesinde yaklaşık 26 µ kalınlığında beyaz tabaka oluştuğu ölçülmüştür. 10µ üzerinde beyaz tabaka kalınlığına sahip olan ve en dışta bulunan gözenekli yapının uzaklaştırılmadığı nitrüleme uygulamalarında, kırılğan yapıya sahip olan gözenekler aşınmayı tetikleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle halka numuneleri yüzeyinde oluşturulmuş olan nitrür tabakası tam olarak istenen özellikleri göstermemektedir.

- Yapılan aşınma deneyleri sonucunda;
 - Buhar işlemi ve mangan fosfat kaplama işlemleri uygulanmamış bloklar arasında, 1 no.lu malzemenin aşınma miktarı ısıtılmış ve nitrürlü halkaların her ikisinin kullanılması durumunda da diğer iki malzemeden daha yüksektir. Bu durumun, malzeme içerisinde bulunan bakır nedeniyle, atmosfer koşullarında, yüzeyde oluşan seçici oksitlerin deneyler sırasında yüzeyden koparak abrasif etkiye neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
 - Yüzey işlemi uygulanmamış blok numuneleri arasında, nitrürlü halka ile karşılıklı çalışan 2 ve 3 no.lu blok malzemeleri birbirlerine oldukça yakın ve en düşük aşınmayı göstermişlerdir.
 - Genel bir eğilim olarak nitrürlü halka kullanılması durumunda, blok numunelerinde oluşan aşınma miktarı düşmektedir. Nitrürlemenin aşınma ve yağlamayı pozitif yönde etkileyici rolü deney sonuçlarında belirgin olarak görülmektedir.
 - Halka numuneleri yüzeyindeki aşınma iz derinlikleri göz önüne alındığında, derinlik değerleri oldukça düşük olmakla beraber, nitrürlenmiş halkaların ısıtılmış işlemlilere nazaran daha fazla aşınma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bunun, nitrürlenmiş halkaların yüzey sertliğinin ısıtılmış işlemlilerden daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
 - Buhar işlemi ve ardından yapılan mangan fosfat kaplama işlemleri neticesinde, her üç blok malzemesindeki aşınma miktarları beklenmedik bir şekilde artmaktadır. Bunun, istenen kalitede buhar işleminin yapılamaması ve mangan fosfat kaplamanın yüzeye iyi tutunumunun sağlanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mangan fosfatlı numuneler ile yapılan deneylerde, yükün uygulanması ile birlikte, yüzeydeki kaplama deneyin hemen başında kalkmakta ve halka numuneleri buhar işlemli yüzey ile çalışmaya başlamaktadır. Mangan fosfat kaplama yapılmamış buhar işlemli bloklar ile yapılan deney sonuçları bu görüşü destekler niteliktedir.
 - Mangan fosfatlı bloklarla yapılan deneylerde aşınma miktarındaki en belirgin artış 1 no.lu blok malzemesi ile yapılan deneylerde

görülmüştür. Bu durum, alt malzeme içerisindeki alaşım elementlerinden kaynaklanmaktadır. 1 no.lu malzeme bünyesinde bulunan bakır, buhar işleminin etkinliğini azaltmakta ve dolayısıyla mangan fosfat kaplamanın tutunumunu olumsuz yönde etkilemektedir. Oluşan kaplama kristal yapısının istenen özelliklerde olmaması da deney sonuçlarını etkileyen önemli bir parametredir.

- 3 no.lu blok malzemesi, aşınma miktarındaki değişim açısından, buhar işlemi ve mangan fosfat kaplama işlemlerinden en az etkilenen malzeme olmuştur. Mangan fosfat kaplı malzemeler arasında en düşük aşınma, 3 no.lu blok malzemesinin nitrürlü halka ile kullanılması durumunda gözlemlenmiştir.
- Mangan fosfat kaplamanın aşınma direncini artırıcı etkisini halka numunelerinde görmek mümkündür. Isıl işlemler ve nitrürlü halkaların her ikisi de buhar işlemi ve mangan fosfat kaplama işlemi yapılmış bloklarla birlikte test edildiğinde daha az aşınmıştır. Bu sonuç üzerinde, buhar işlemi neticesinde blok sertliklerinde gözlemlenen artışın önemli rol oynadığı düşünülmektedir. Sert bir yüzeye sahip olan ısıl işlemler ve nitrürlü halkalar, işlemsiz duruma göre daha sert olan blok numuneleri ile çalışıldığında aşınmaları da azalmaktadır.
- Bütün deney sonuçları göz önüne alındığında, blok numunelerinde aşınmanın fazla olması durumunda halka numunelerindeki aşınmanın düşük çıkma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bunu, malzeme ve yüzey işlemleri ile ilgili parametrelerin yanı sıra, yüzey uyumluluğu (conformability) ile de açıklamak mümkündür. Blok ve halka numuneleri başlangıçta konform olmayan (counterformal) temas gerçekleştirirken, blok yüzeyindeki aşınmanın artmasıyla birlikte, yüzey uyumluluğu artmakta ve temas koşulları konform'a (conformal) dönüşmektedir. Yüzeylerin birbirleri ile uyumluluğunun artması ile temas noktasındaki basınç değerleri azalmakta ve ara yüzey daha etkin bir şekilde yağlanmaya başlamaktadır. Blok numunelerindeki aşınma arttıkça bu etki daha belirginleşmekte ve halka numunelerinin aşınma miktarlarına olumlu yönde etki etmektedir.

- Deneyleer sonucunda ölçülen sürtünme katsayısı değerleri göz önüne alındığında, hemen hemen her malzeme ve yüzey işlemleri çifti için aynı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Sürtünme katsayısı değerlerinin her biri 0,15 – 0,20 değerleri arasında kalmaktadır. Bu sonuçlar aşınma deneylerinin sınır yağlama koşullarında gerçekleştirildiğinin bir göstergesidir.
- Blok ve halka numunelerinin aşınma izi bölgelerinden alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri, malzeme çiftlerinin aşınma mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir:
 - Yüzey işlemleri uygulanmamış blok ve ısıtılmış halka ile yapılan deneylerde, blok numunelerinin aşınma izlerinde adhezif ve abrasif aşınma mekanizmalarının her ikisine ait belirtiler görmek mümkündür. Blok yüzeylerinde abrasif aşınma neticesinde oluşan çiziklerin yanı sıra, sıvanma (adhezyon) da oluşmuştur. Çiziklerin yoğunluğu daha düşük sertliğe sahip olan 2 no.lu malzemede diğer iki malzemeye göre daha azdır (Ekler – Şekil F.1.1 – F.3.2.).
 - Yüzey işlemleri uygulanmamış blok numunelerinde abrasif aşınmaya yüzeydeki oksitlerin ve gözenekli yapıya sahip olan blok numunelerinden kopan parçaların neden olduğu düşünülmektedir. Yüzey sertliği oldukça yüksek olan ısıtılmış halka ise karşı malzeme yüzeyinde sıvanmaya neden olmaktadır.
 - Yüzey işlemleri uygulanmamış blokların nitrürlü halkalar ile test edilmesi sonucunda görülen aşınma mekanizması ısıtılmış halka ile elde edilen sonuçlara benzerdir. Bu durumda yüzeydeki çizikler azalmış ve sıvanma daha etkin olmaya başlamıştır. Bu sonuç, 2 no.lu blok malzemesinde diğer iki malzemedenden daha belirgin bir şekilde belli olmaktadır (Ekler – Şekil G.1.1 – G.3.2.).
 - Isıtılmış halkanın mangan fosfat kaplı blok yüzeylerinde oluşturduğu izler (Ekler – Şekil H.1.1 – 3.2) diğer malzeme – yüzey işlemleri çiftlerinden ayrılmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı eğrilerine bakıldığında (Ekler – Şekil C.1 – 3.), deney sırasında ani artışlara neden olan pek çok pik göze çarpmaktadır. Bu piklerin, malzeme yüzeylerinden birinden kopan

parçaların temas bölgesinden uzaklaştırılmaması nedeniyle oluşan abrasif aşınmadan kaynaklandığı düşünülmüştür. Fakat mangan fosfat kaplı blokların aşınma izi bölgesinde herhangi bir çizimin görülmemesi, baskın olan mekanizmanın sıvanma ve yapışma (adhezyon) olduğunu göstermektedir. Bu durumda, sürtünme katsayısındaki ani artışları malzeme yüzeylerinin birbirlerine yapışması sonucunda kayma yönüne ters yöndeki kuvvetlerin ani artışı şeklinde açıklamak mümkündür.

- Nitrürlü halkaların mangan fosfat kaplı blok yüzeylerinde oluşturduğu izler, yüzey işlemi uygulanmamış blok yüzeylerinde oluşan izlere benzemektedir (Ekler – Şekil I.1.1 – I.3.2). Bununla birlikte, abrasif aşınma nedeniyle oluşan çizikler yerini daha çok sıvanmaya bırakmışlardır. Sürtünme katsayısı eğrilerine göz atıldığında, sıvanma veya çizilme sonucunda oluşan izlerin kayma hareketini önemli derecede engelleyecek piklerin oluşumuna neden olmadığı görülmektedir.
- Yüzey işlemi uygulanmamış bloklarla test edilen ısıtılmış halkaların yüzeyinde sinter malzemedeki kopan parçaların neden olduğu düşünülen, abrasif aşınma mekanizması hakimdir. Blokların mangan fosfat kaplanması ile birlikte çiziklerin yoğunluğu ve derinliği azalmakta, aynı zamanda adhezif aşınma belirtileri de görülmeye başlamaktadır (Ekler Şekil J.1.1 – J.2.2).
- Yüzey işlemsiz ve kaplamalı blokların her ikisi de nitrürlü halka yüzeyinde çizilmelere neden olmaktadır. Nitrürlü halkalarda abrasif aşınmanın daha belirgin olmasının sebebi, daha düşük yüzey sertliğine ve kırılabilir beyaz tabakaya sahip olmasıdır (Ekler – Şekil K.1.1 – K.2.2).

Özetlemek gerekirse;

- Demir esaslı sinter malzemeler ile yapılan aşınma deneylerinde, alaşım elementleri, malzemenin gözenek yapısı, buhar işleminin kalitesi ve mangan fosfat kaplamanın tutunumu ile kristal yapısı dikkat edilmesi gereken başlıca parametreler arasındadır.
- Çelik malzeme yüzeyine yapılan ısıl işlem sonucunda yüzeyde oluşan çatlaklar aşınmayı olumsuz yönde etkilemektedir.
- Nitrürleme işlemi sırasında, beyaz tabaka kalınlığına ve gözenekli yapının yüzeyden uzaklaştırılmasına dikkat etmek gerekmektedir.
- Aşınma deneyleri neticesinde, blok ve halka numunelerinin her ikisi de göz önüne alındığında, 2 no.lu blok – nitrürlü halka çifti en iyi sonuçları göstermiştir. Bu sonuçların, yüzeye iyi tutunan mangan fosfat kaplama ve daha iyi hazırlanmış nitrür tabakası ile daha da düşeceği düşünülmektedir.
- 2 no.lu blok malzemesi ile yapılan deneyler sonucunda diğer iki malzemeye göre daha fazla tekrar edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuç üretim için önemli bir değerlendirme kriteri olabilir.
- Numune hazırlama kademesindeki problemler nedeni ile mangan fosfat kaplı bloklar ile istenen sonuçlar elde edilememiştir. Kaplamalı blokların hemen hemen hepsi için, aşınmalar, kaplamasız duruma göre daha yüksektir.
- Mangan fosfat kaplı bloklar kullanılması durumunda, blok aşınma miktarı artarken, halkalardaki aşınmalar düşmektedir.
- Deneylerin tümünde nitrürlü halkaların blok yüzeylerinde daha az aşınmaya neden olduğu fakat kendisinin daha fazla aşındığı görülmektedir.
- Deneyler sonucunda malzeme çiftlerinin sürtünme katsayısı değerlerini belirgin bir şekilde birbirinden ayırmak güçtür.
- Yüzey işlemi uygulanmamış blok yüzeylerinde adhezif ve abrasif aşınmanın her ikisine ait belirtiler görmek mümkündür. Nitrürlü halka kullanılması durumunda blok yüzeyindeki çizik yoğunluğu azalmaktadır.
- Isıl işlemlerle halka mangan fosfat kaplı blok yüzeyinde tamamen sıvanmaya neden olurken, nitrürlü halka kullanılması durumunda çizikler de görülmektedir.

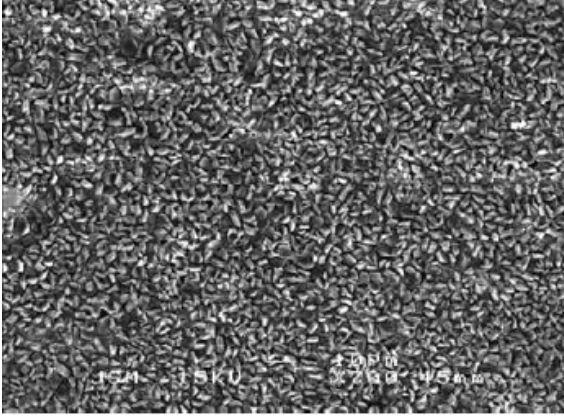
- Isıl işlemlı ve nitrürlü halka yüzeylelerinde görülen temel aşınma mekanizması abrazyondur. Mangan fosfat kaplı bloklar halka yüzeyindeki çizik yoğunluğunu düşürmektedir. Nitrürlü halkalarda çizilme etkisi daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

KAYNAKLAR

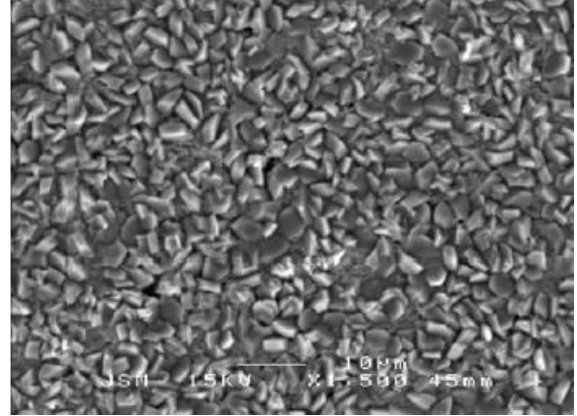
- [1] **Hutchings, I.M.**, 1992. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, CRC Press: Boca Raton.
- [2] **ASM International**, 1997. Friction and Wear Testing: Source Book of Selected References from ASTM Standards and ASM Handbooks, West Conshohocken, PA.
- [3] **Bhushan, B.**, 1999. Principles & Application of Tribology, John Wiley, New York
- [4] **Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoğlu, H.**, 1997. Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB, İstanbul.
- [5] **Bhushan, B. and Gupta, B.K.**, 1991. Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill, New York.
- [6] **Wulpi, D.J.**, 1999. Understanding How Components Fail, ASM, Materials Park.
- [7] **ASM Handbook**, 1992. Friction, Lubrication & Wear Technology, Volume 18, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [8] **Blau, P.J.**, 1996. Friction Science and Technology, Marcel Dekker, New York.
- [9] <http://www.plint-tribology.com>
- [10] **Dossat, R. and Horan, T.J.**, 2001. Principles of Refrigeration, Fifth Edition, Prentice Hall, Ohio.
- [11] **Abdik, B.**, 2003. Soğutucu Akışkan Kompresörlerinde Oluşan Yatak Kayıplarının İrdelenmesi, İ.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] **Cinislı, F.M.**, 2003. Hermetik Kompresörlerde Soğutucu Akışkanların İndikatör Diyagramına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, İ.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **Arçelik A.Ş.**, Ar-Ge I-Deas Çizimi, 2003, İstanbul.
- [14] **Arçelik A.Ş.**, E.K.İ. Ür-Ge Teknik Resim Çizimi, 2003, Eskişehir.
- [15] **Şahin Y., Öztaş E.**, 2002. Kişisel Görüşme.
- [16] **Metals Handbook**, 1992. Powder Metallurgy, Volume 7, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [17] **Beiss, P.**, 1991. Steam Treatment of Sintered Parts, *Powder Metallurgy*, Vol.34, No.3,173-177.
- [18] **Razavizadeh, K. and Davies, B.L.**, 1979. Influence of Powder Type and Density on Pore Closure and Surface Hardness Changes Resulting From Steam Treatment of Sintered Iron, *Powder Metallurgy*, No.4, 187-192.

- [19] **Razavizadeh, K. and Davies, B.L.**, 1982. Combined Effects of Steam Treatment and Age Hardening on Mechanical Properties of Sintered Fe-Cu Alloys, *Powder Metallurgy*, Vol.25, No.1, 11-16.
- [20] **Molinari, A. and Straffellini, G.**, 1997. Tribological Behaviour of Steam Treatment Ferrous Parts, *The International Journal of Powder Metallurgy*, Vol.33, 55-62.
- [21] **Khan, A.J., Siddiqi, N.A. and Hamiuddin Md.**, 1986. Effects of Aging and Steam Oxidation on Sintered Irons and Steels Containing Phosphorus, *Powder Metallurgy*, Vol.29, No.3, 207-215.
- [22] **Razavizadeh, K. and Davies, B. L.**, 1981. The Effects of Steam Treatment on The Wear Resistance of Sintered Iron and Fe-Cu Alloys, *Wear*, Vol.69, 355-367.
- [23] **Hivart, P.H., Hauw, B., Crampon, J. and Bricout, J. P.**, 1998. Annealing Improvement of Tribological Properties of Manganese Phosphate Coatings, *Wear*, Vol.219, 195-204.
- [24] **Perry, J. and Eyre, T.S.**, 1977. The effect of Phosphating on the Friction and Wear Properties of Grey Cast Iron, *Wear*, Vol.43, Issue 2, 185-197.
- [25] **Metals Handbook**, 1999. Heat Treating, 10th Edition, Volume 4, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [26] <http://www.nitriding.co.uk>
- [27] **Alsaran, A.**, 2003. Determination of Tribological Properties of Ion-Nitrided AISI 5140 Steel, *Materials Characterization*, Vol.47, 207-213.
- [28] **G99-95a**, 1995. Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM, Materials Park, Ohio.
- [29] <http://www.microphotonics.com>
- [30] **D2670-95**, 1995. Standard Test Method for Measuring Wear Properties of Fluid Lubricants (Falex Pin and Vee Block Method), ASTM, Materials Park, Ohio.
- [31] <http://www.falexint.com>
- [32] **Salihoglu, S.**, 1998. NPFC Kaplamanın Falex Cihazı ile Yapılan Aşınma Deneyler, Arçelik A.Ş. Ar-Ge Araştırma Notu, İstanbul.
- [33] **G133-95**, 1995. Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, ASTM, Materials Park, Ohio.
- [34] **G77-98**, 1998. Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, ASTM, Materials Park, Ohio.
- [35] **Akşit, M.**, 2004. Atmosfer Kontrollü Falex #1 Deney Düzenegi Tanıtım Raporu, Arçelik A.Ş. Ar-Ge Araştırma Notu, İstanbul.
- [36] **Akşit, M.**, 2004. Falex #1 Deneyleri Sırasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar, Arçelik A.Ş. Ar-Ge Araştırma Notu, İstanbul.

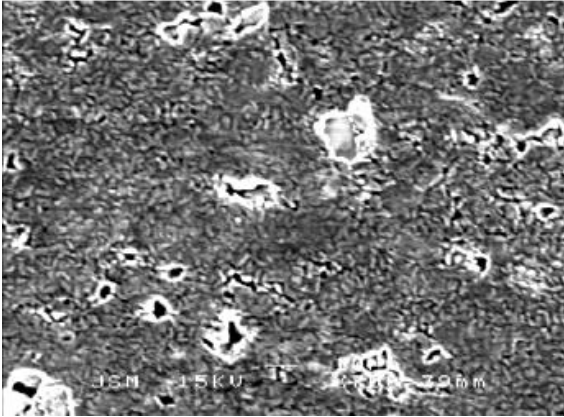
EKLER



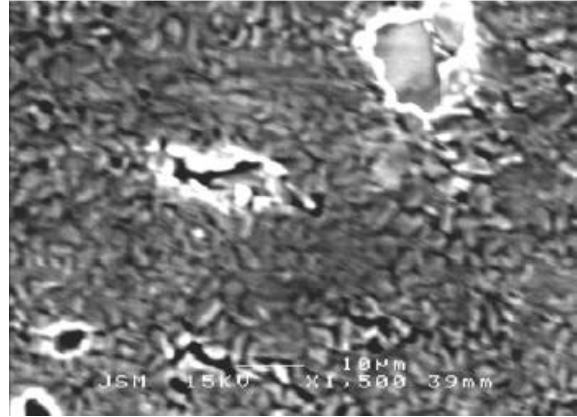
Şekil A.1.1. Mn-fosfatlı 1 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (700x)



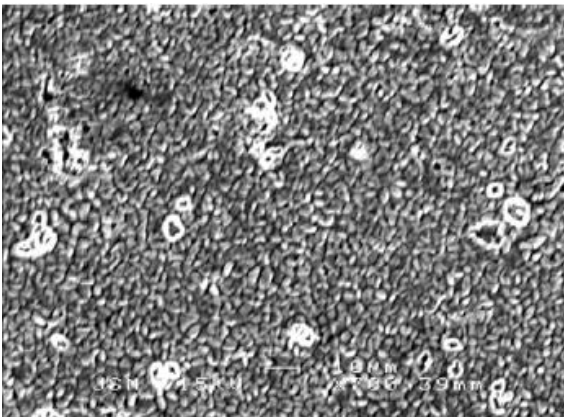
Şekil A.1.2. Mn-fosfatlı 1 no.lu blok kristal yapı yapı görüntüsü (1500x)



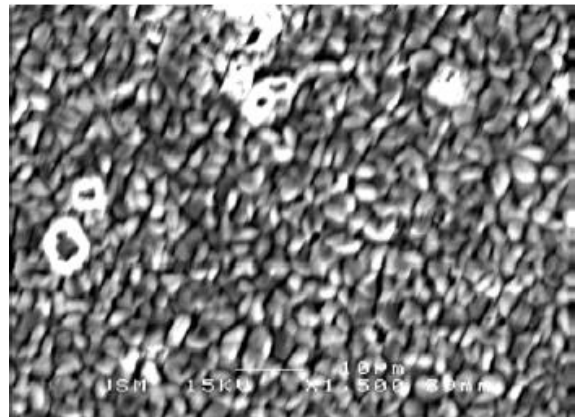
Şekil A.2.1. Mn-fosfatlı 2 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (700x)



Şekil A.2.2. Mn-fosfatlı 2 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (1500x)

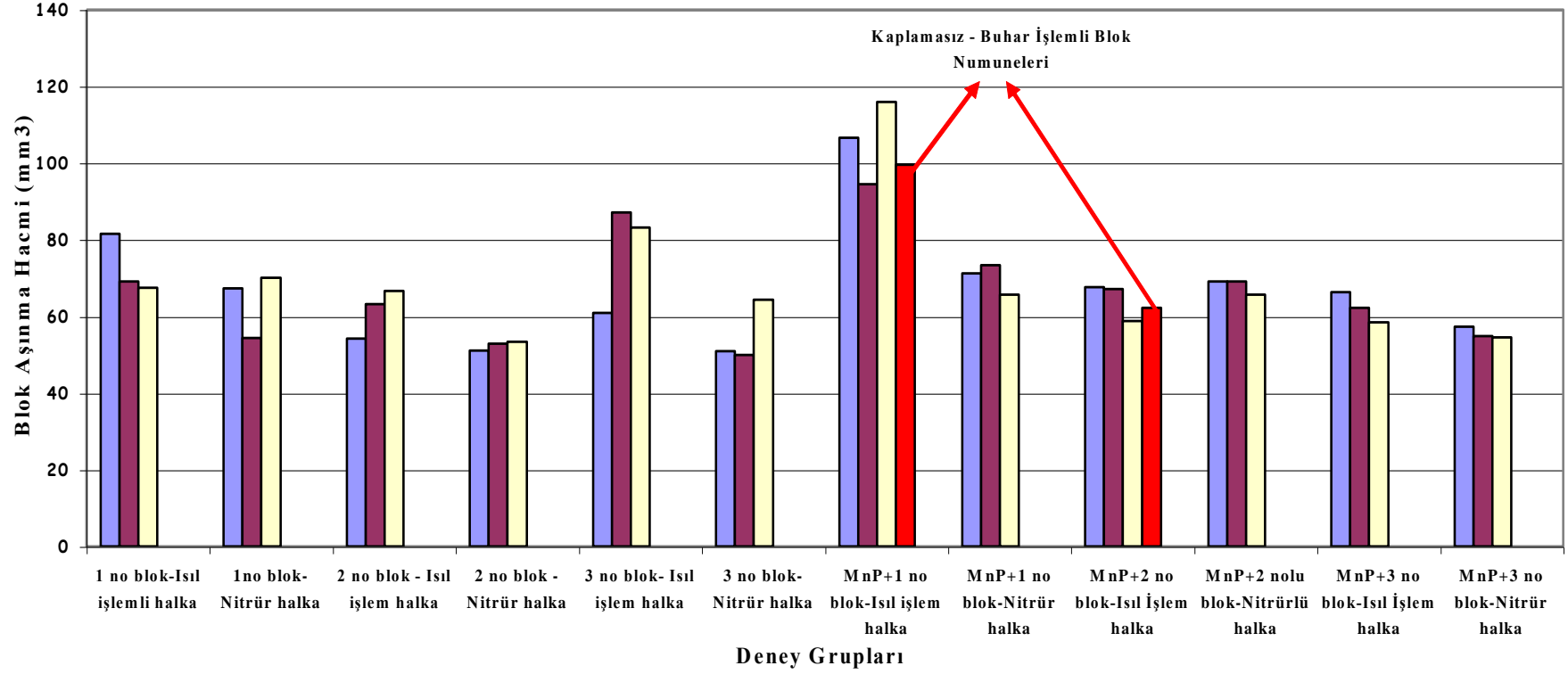


Şekil A.3.1. Mn-fosfatlı 3 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (700x)



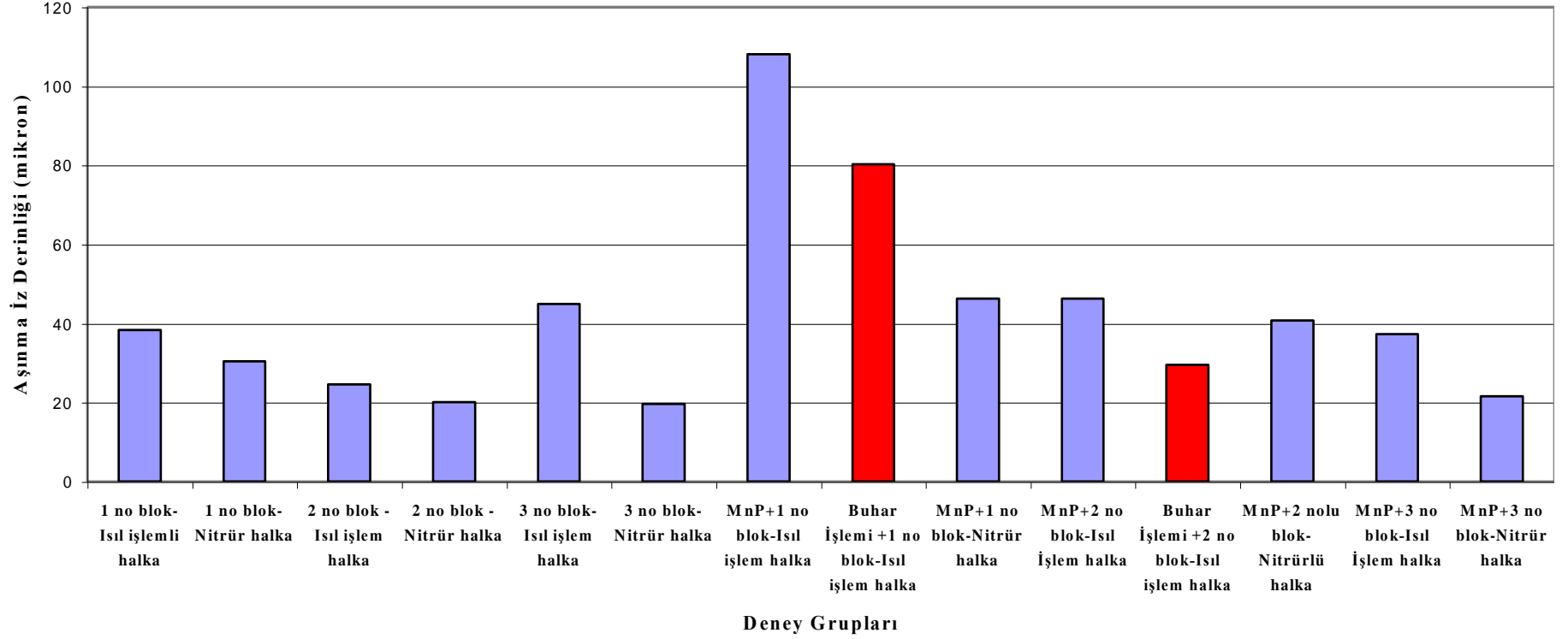
Şekil A.3.2. Mn-fosfatlı 3 no.lu blok kristal yapı görüntüsü (1500x)

Blok Numunelerinin Aşınma Değerleri



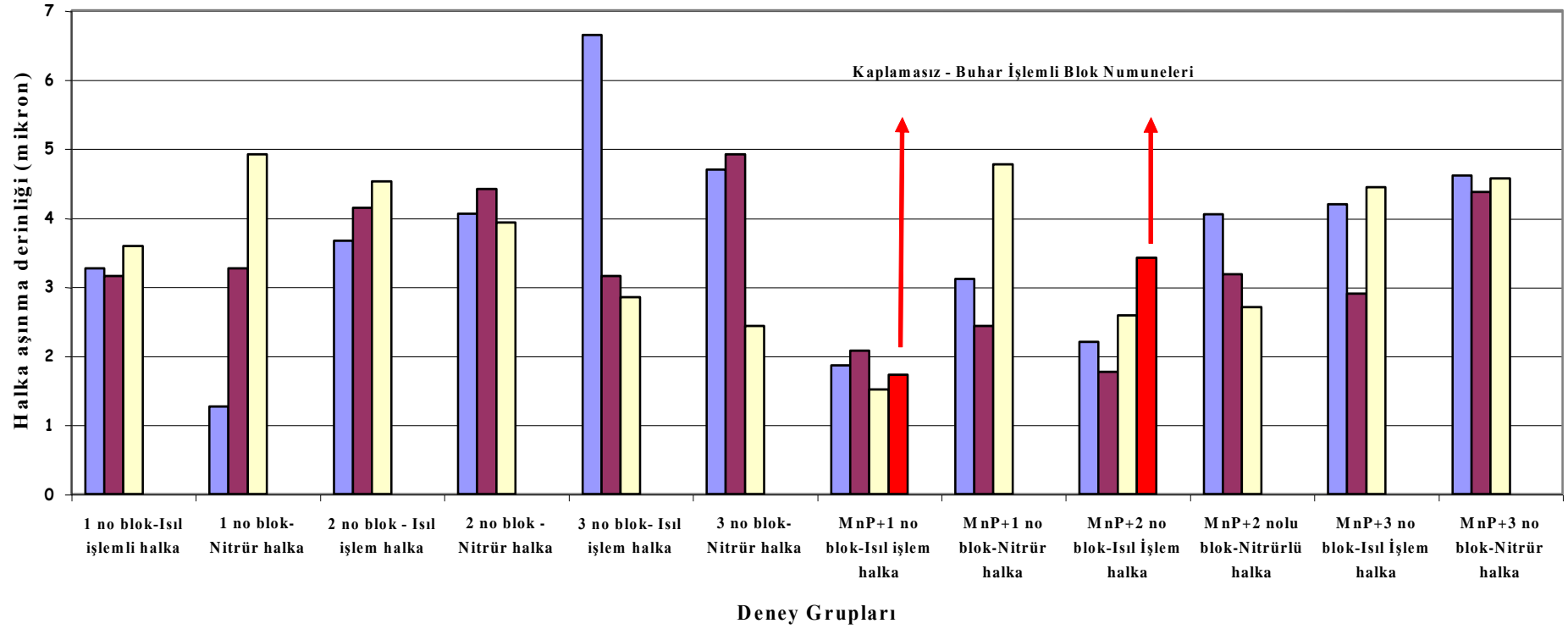
Şekil B.1. Blok numunelerinin aşınma hacimlerinin karşılaştırma diyagramı

Blok Aşınma İz Derinliği



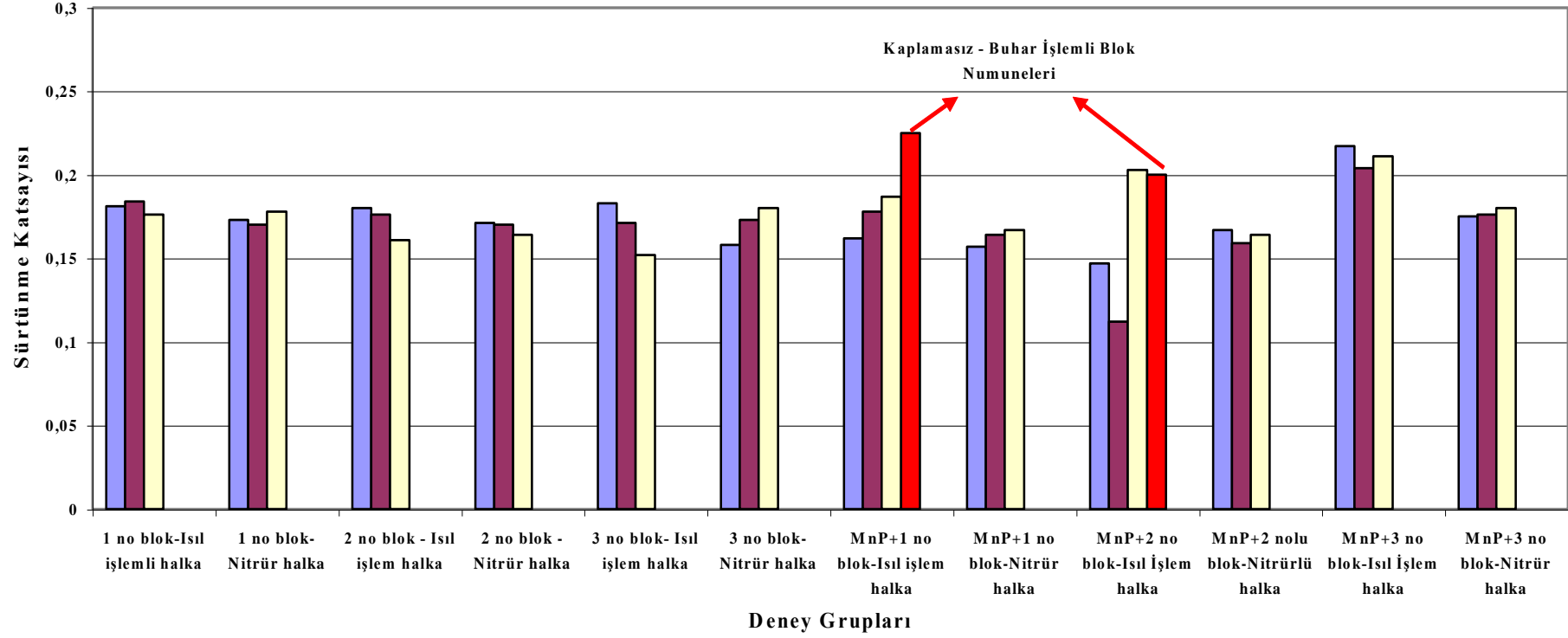
Şekil B.2. Blok numunelerinin aşınma iz derinliği karşılaştırma diyagramı.

Halka Aşınma İz Derinliği Değerleri

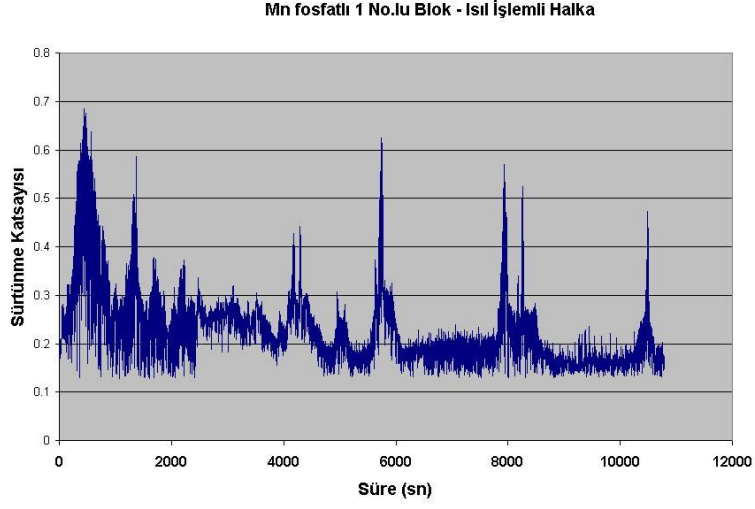


Şekil B.3. Halka numunelerinin aşınma iz derinliği karşılaştırma diyagramı.

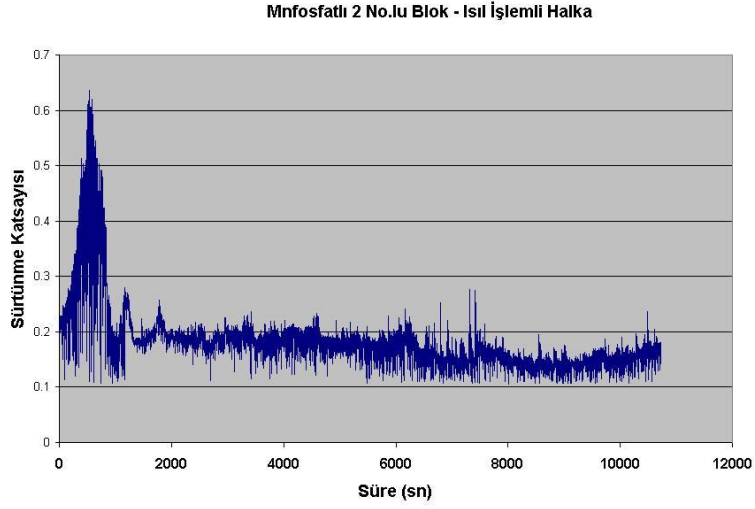
Sürtünme Katsayısı Verileri



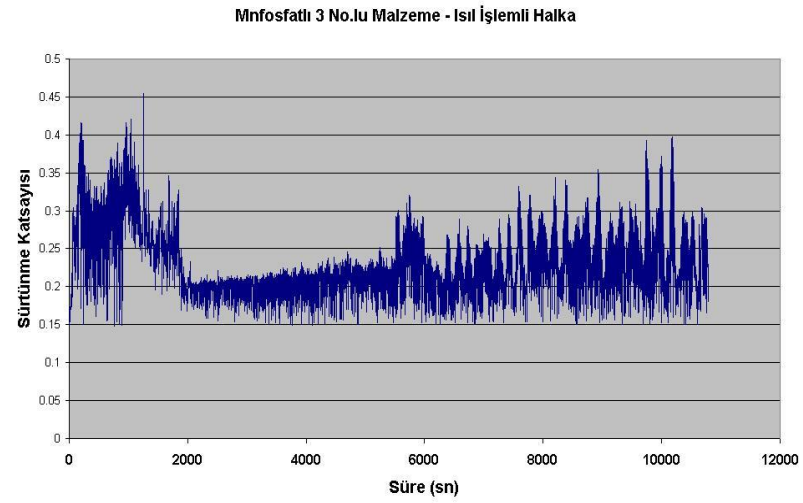
Şekil B.4. Sürtünme katsayısı verilerinin karşılaştırma diyagramı.



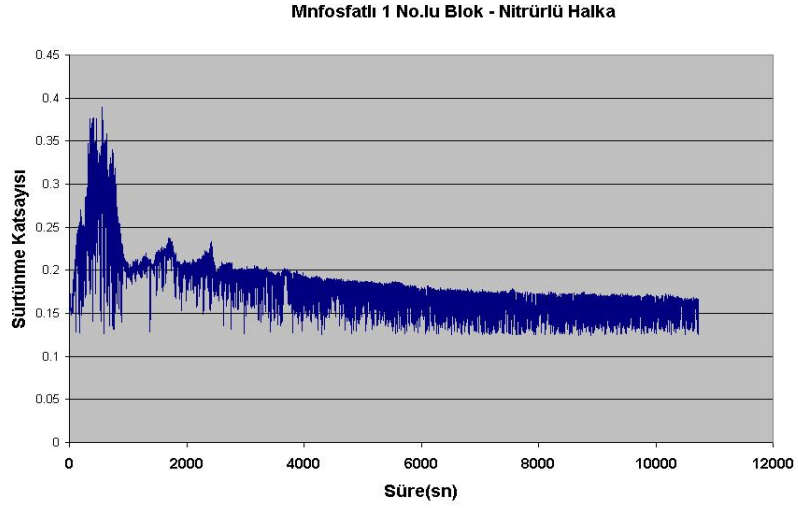
Şekil C.1. Mnfosfat kaplı 1 no.lu blok – ısıl işlemlı halka sürtünme katsayısı eğrisi



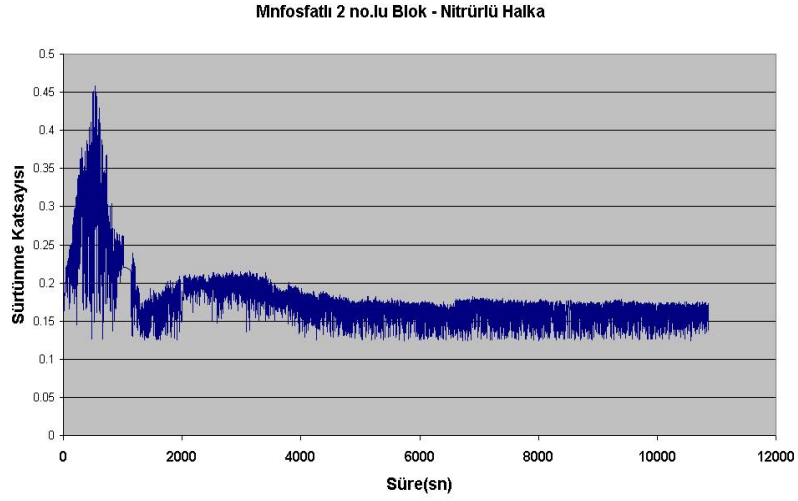
Şekil C.2. Mnfosfat kaplı 2 no.lu blok – ısıl işlemlı halka sürtünme katsayısı eğrisi



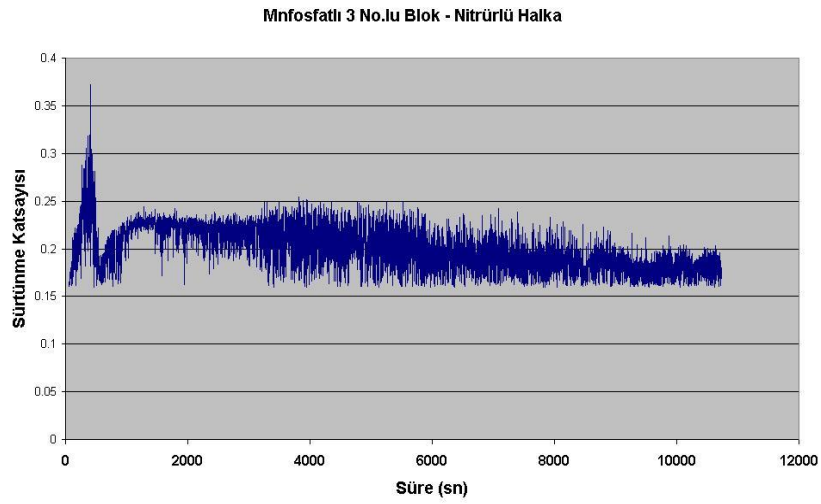
Şekil C.3. Mnfosfat kaplı 3 no.lu blok – ısıl işlemlı halka sürtünme katsayısı eğrisi



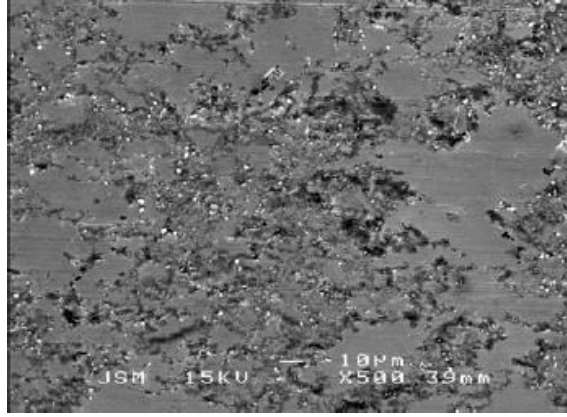
Şekil D.1. Mnfosfat kaplı 1 no.lu blok – nitrürlü halka sürtünme katsayısı eğrisi



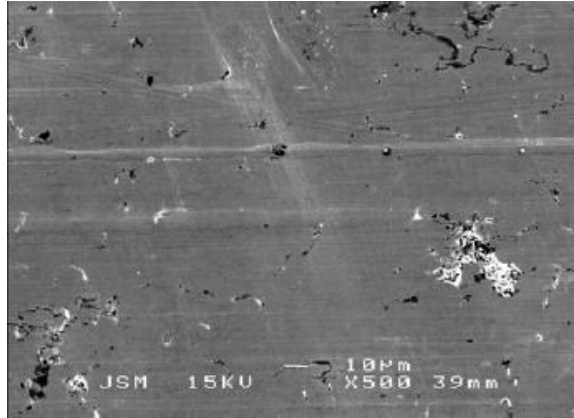
Şekil D.2. Mnfosfat kaplı 2 no.lu blok – nitrürlü halka sürtünme katsayısı eğrisi



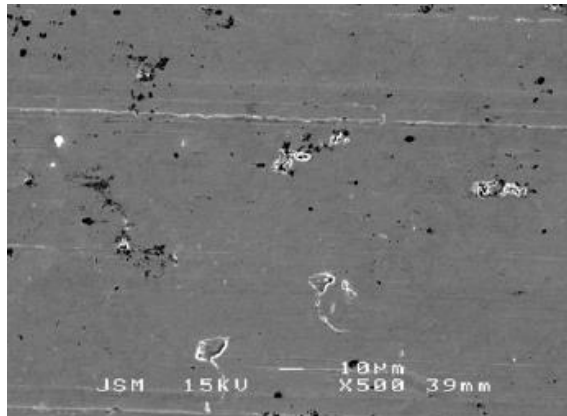
Şekil D.3. Mnfosfat kaplı 3 no.lu blok – nitrürlü halka sürtünme katsayısı eğrisi



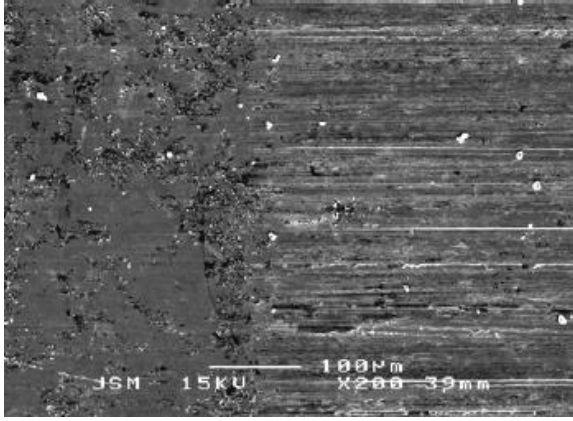
Şekil E.1. Kaplamasız 1 no.lu blok numunesinin genel görüntüsü
(500x)



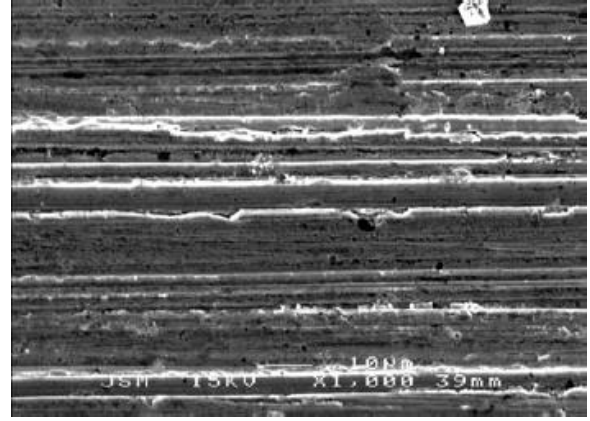
Şekil E.2. Kaplamasız 2 no.lu blok numunesinin genel görüntüsü
(500x)



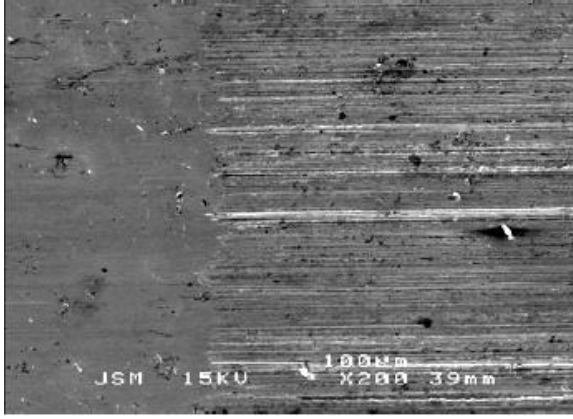
Şekil E.3. Kaplamasız 3 no.lu blok numunesinin genel görüntüsü
(500x)



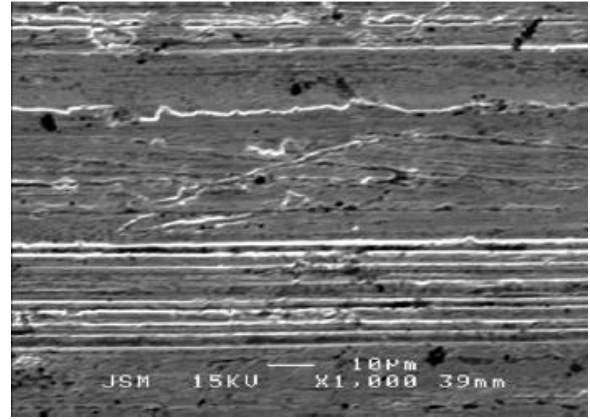
Şekil F.1.1. Isıl işlemlili halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



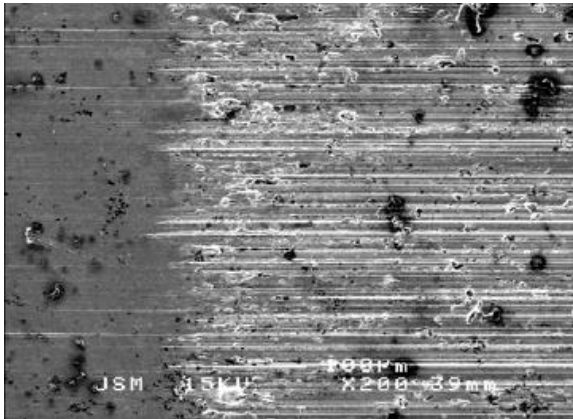
Şekil F.1.2. Isıl işlemlili halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



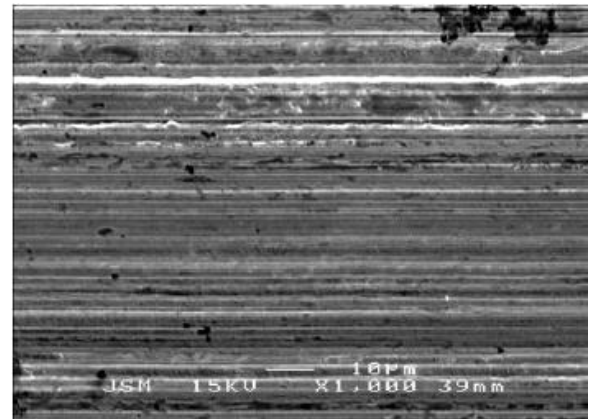
Şekil F.2.1. Isıl işlemlili halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



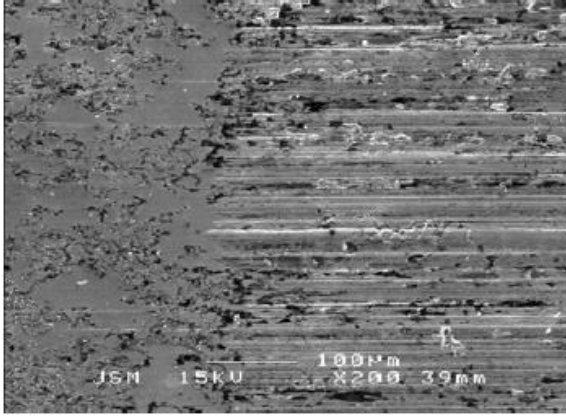
Şekil F.2.2. Isıl işlemlili halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



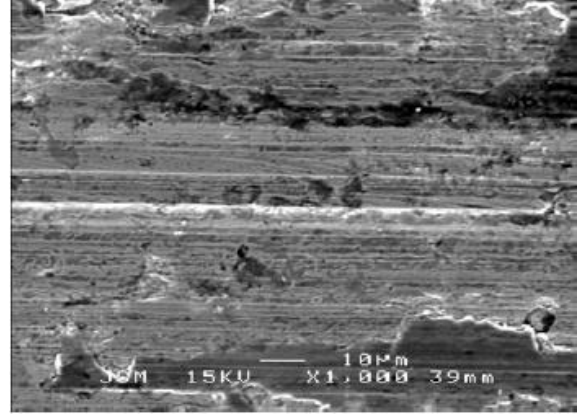
Şekil F.3.1. Isıl işlemlili halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



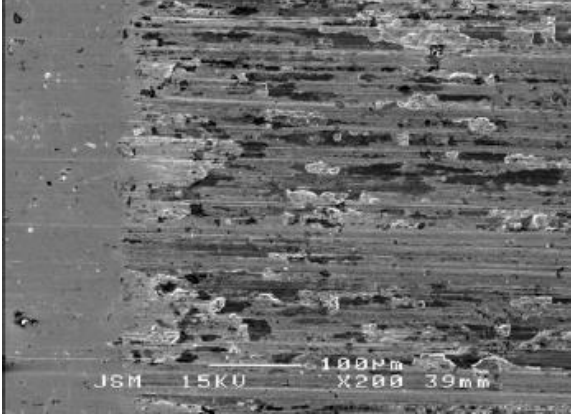
Şekil F.3.2. Isıl işlemlili halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



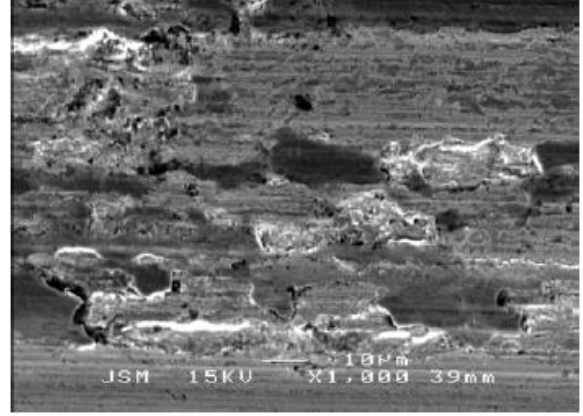
Şekil G.1.1. Nitrürlü halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



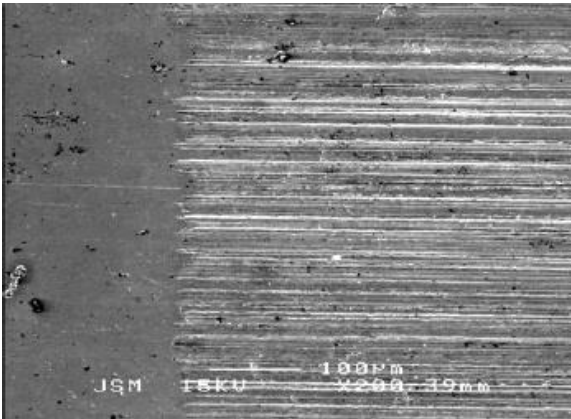
Şekil G.1.2. Nitrürlü halka ile çalışan 1 no.lu blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



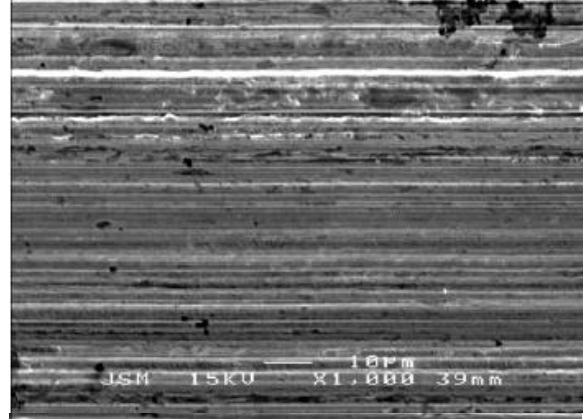
Şekil G.2.1. Nitrürlü halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



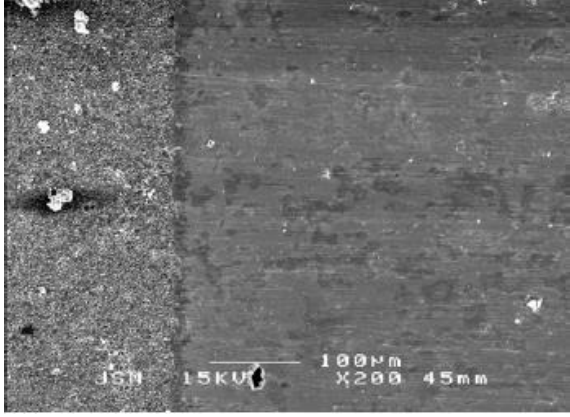
Şekil G.2.2. Nitrürlü halka ile çalışan 2 no.lu blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



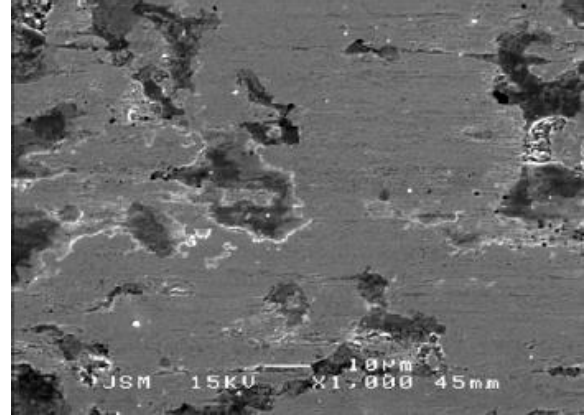
Şekil G.3.1. Nitrürlü halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



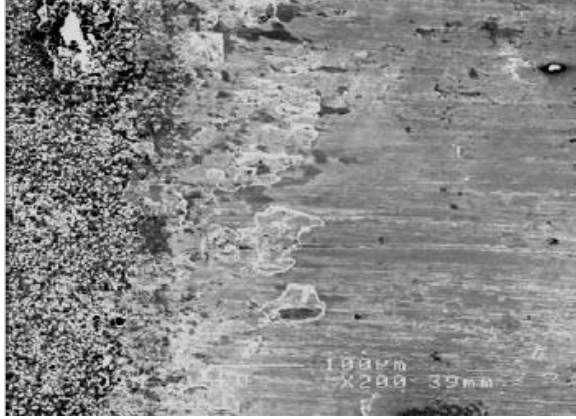
Şekil G.3.2. Nitrürlü halka ile çalışan 3 no.lu blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



Şekil H.1.1. Isıl işlemlili halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu.blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



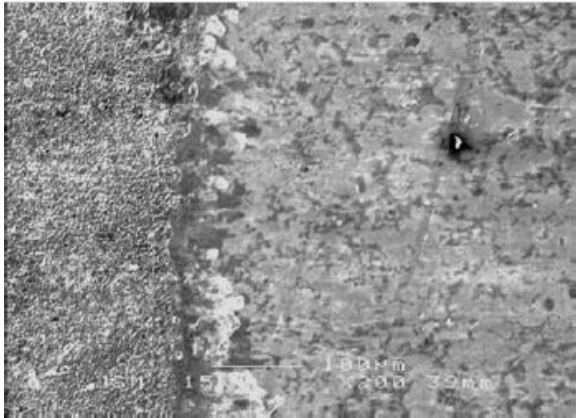
Şekil H.1.2. Isıl işlemlili halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu.blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



Şekil H.2.1. Isıl işlemlili halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu.blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



Şekil H.2.2. Isıl işlemlili halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu.blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



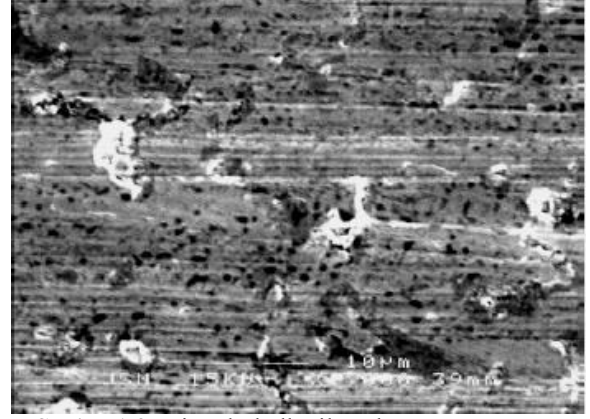
Şekil H.3.1. Isıl işlemlili halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu.blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



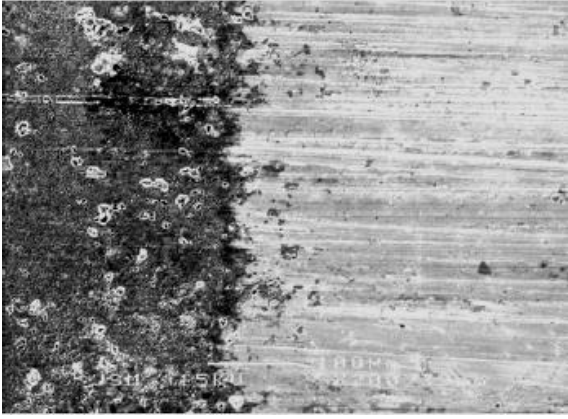
Şekil H.3.2. Isıl işlemlili halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu.blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



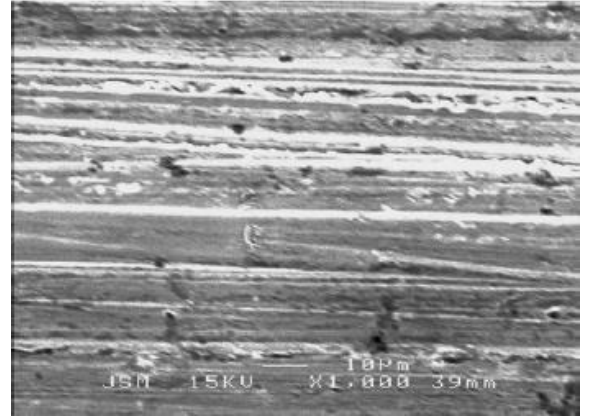
Şekil I.1.1. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu.blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



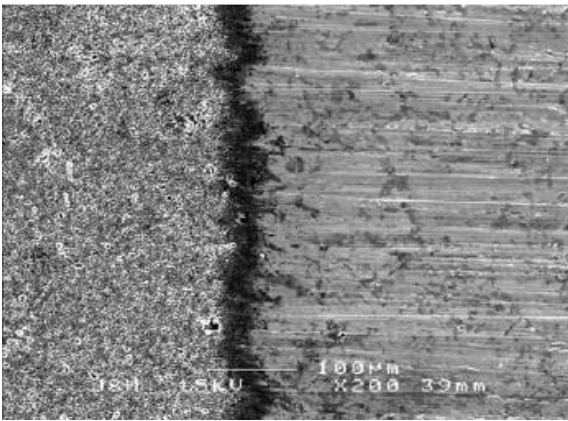
Şekil I.1.2. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 1 no.lu.blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



Şekil I.2.1. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu.blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



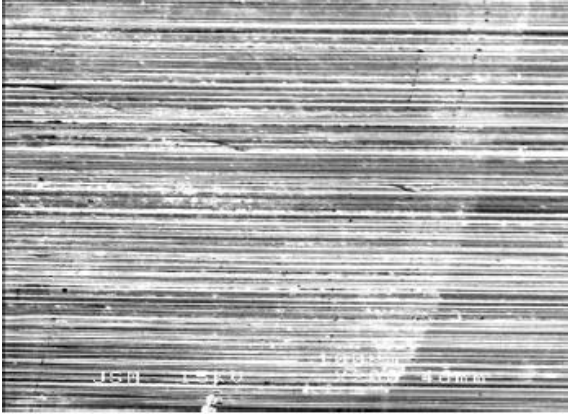
Şekil I.2.2. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 2 no.lu.blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



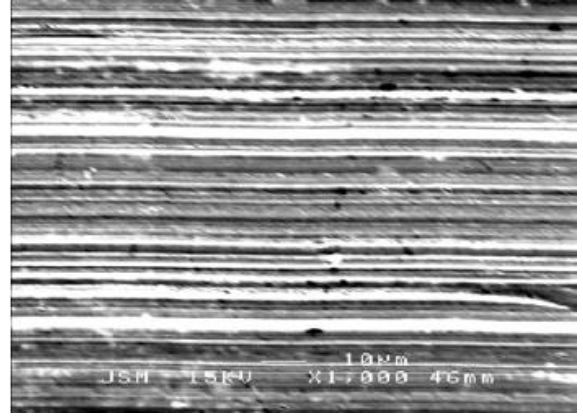
Şekil I.3.1. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu.blok numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



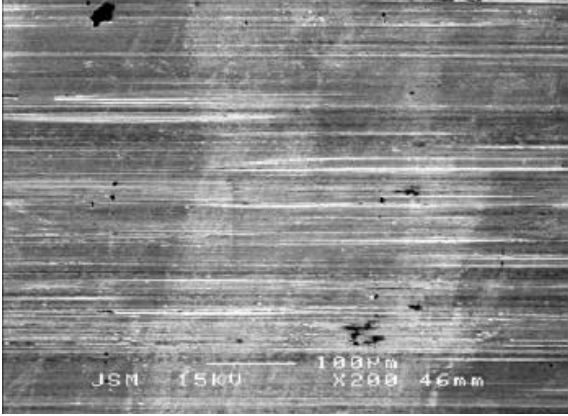
Şekil I.3.2. Nitrürlü halka ile çalışan mangan fosfat kaplı 3 no.lu.blok numunesi (aşınma izi – 1000x)



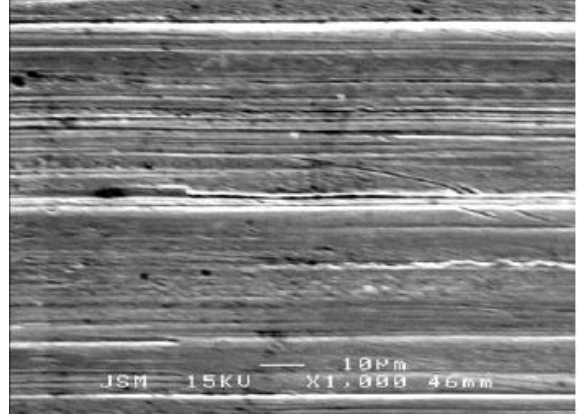
Şekil J.1.1. Kaplamasız 1 No.lu blok ile çalışan ısıtılmış halkanın numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



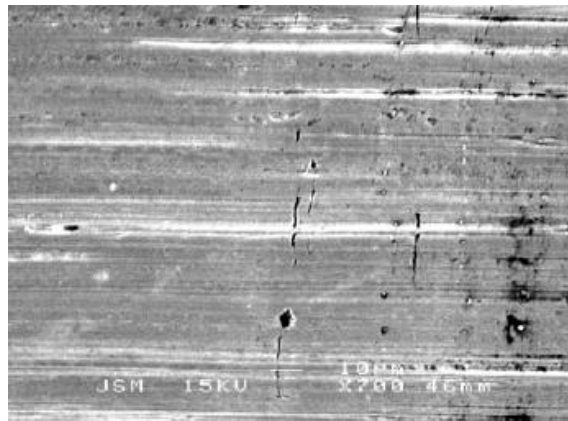
Şekil J.1.2. Kaplamasız 1 No.lu blok ile çalışan ısıtılmış halkanın numunesi (aşınma bölgesi – 1000x)



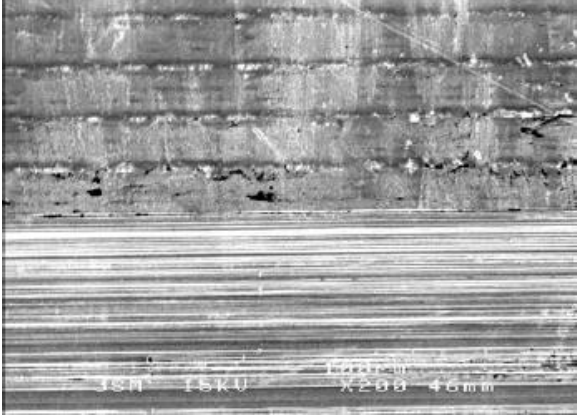
Şekil J.2.1. Mn fosfatlı 1 No.lu blok ile çalışan ısıtılmış halkanın numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



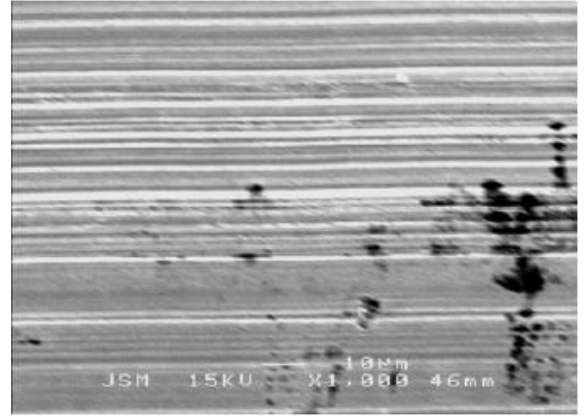
Şekil J.2.2. Mn fosfatlı 1 No.lu blok ile çalışan ısıtılmış halkanın numunesi (aşınma bölgesi – 1000x)



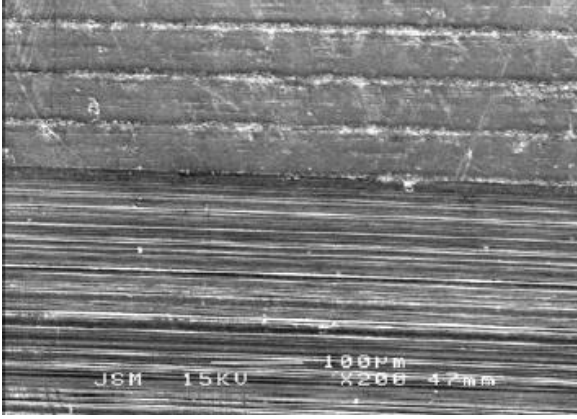
Şekil J.3. Isıtılmış halkanın numuneleri yüzeyinde görülen çatlak izi (aşınmamış bölge – 700x)



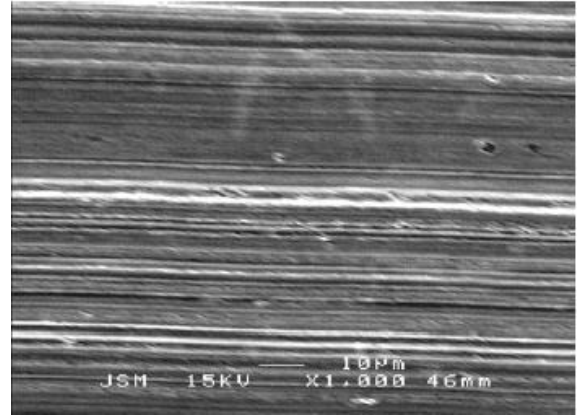
Şekil K.1.1. Kaplamasız 3 No.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



Şekil K.1.2. Kaplamasız 3 No.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi – 1000x)



Şekil K.2.1. Mnfosfatlı 3 No.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi – 200x)



Şekil K.2.2. Mnfosfatlı 3 No.lu blok ile çalışan nitrürlü halka numunesi (aşınma bölgesi – 1000x)

ÖZGEÇMİŞ

Murat Ergüler, 30 Ocak 1981 yılında Karabük'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Karabük'te tamamladıktan sonra 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya - Metalürji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne girdi. Lisans programını 2002 yılında tamamladı ve ardından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislikte İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Halen İ.T.Ü. ve ARÇELİK A.Ş. arasında imzalanmış özel bir anlaşma çerçevesinde ARÇELİK A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi Malzeme Teknolojileri Ailesi'nde çalışmalarına devam etmektedir.