

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUZDOLABI KOMPRESÖR YATAKLARINDA MoN-Cu NANOKOMPOZİT
KAPLAMALARIN MANGAN FOSFATLAMA YERİNE KULLANILABİLME
POTANSİYELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pınar YAVUZ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUZDOLABI KOMPRESÖR YATAKLARINDA MoN-Cu NANOKOMPOZİT
KAPLAMALARIN MANGAN FOSFATLAMA YERİNE KULLANILABİLME
POTANSİYELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pınar YAVUZ

506121418

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121418 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Pınar YAVUZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BUZDOLABI KOMPRESÖR YATAKLARINDA MoN-Cu NANOKOMPOZİT KAPLAMALARIN MANGAN FOSFATLAMA YERİNE KULLANILABİLME POTANSİYELİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet TOPUZ**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kürşat KAZMANLI
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**

Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2014**

Aileme ve Dostlarıma,

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca değerli bilgilerini ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, kendimi geliştirmemde büyük katkılar sağlayan ve her zaman yanımda olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca fikir ve önerilerini benimle paylaşmaktan hiçbir zaman kaçınmayan Doç. Dr. Kürşat KAZMANLI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans hayatım boyunca ARÇELİK A.Ş.'de hem tezimi yürütme hem de çalışma imkanı sağladıkları için Ar-Ge direktörü Cem KURAL'a, Malzeme Teknolojileri Yöneticisi Dr. Mustafa SEZER'e ve değerli görüşlerini benden esirgemeyen kıdemli uzman Ar-Ge mühendisi Dr. Alper YEŞİLÇUBUK'a özel teşekkürlerimi iletirim.

Arçelik Ar-Ge laboratuvarlarında teknik desteklerinden dolayı Sinan KARASU'ya ve Sezgin KILIÇ'a, İTÜ laboratuvarlarındaki desteklerinden dolayı Erkan KAÇAR'a, Münevver UZUN'a, Serkan OKTAY'a, Sinem ERASLAN'a, Dilek DEMİROĞLU'na, Nagihan SEZGİN'e, Seda ARPACI'ya, Dr. Semih ÖNCEL'e, Sinan AKKAYA'ya, Okan AĞIRSEVEN'e, Çağatay YELKARASI'na ve Seyhan ATİK'e teşekkür ederim.

Hem teknik hem manevi desteklerinden dolayı Arçelik grubundan değerli çalışma arkadaşlarım Ezgi YILMAZ'a, Hakan ÖZKAN'a, Ceren Öney KIROĞLU'na, Merve ZAKUT'a, Ali ÜNLÜTÜRK'e , İpek Hazal ÜNVER'e ve sevgili bitirme grubumdan Oğuzhan KAYA, Emre GÜLBAHAR, Serdar Sonay ÖZBAY ve İbrahim ÖZDEMİR'e, son olarak her zaman yanımda olan, desteklerini esirgemeyen Görkem ÖZTARLIK'a ve AİLEM'e teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2014

Pınar Yavuz

Metalurji ve malzeme mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Amaç.....	1
2. BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİ.....	3
2.1 Buzdolabı Kompresörleri Çalışma Prensipleri	3
2.2 Buzdolabı Kompresörlerini Oluşturan Parçalar	4
2.3 Buzdolabı Kompresörlerinde Bulunan Yatak Sistemleri	5
2.4 Buzdolabı Kompresörlerinde Mevcut Durum ve Karşılaşılan Problemler	7
2.4.1 Mangan fosfat kaplama	8
3. TRIBOLOJİ SİSTEMLERİ.....	11
3.1 Aşınma ve Sürtünme Davranışları	11
3.1.1 Adhesif aşınma.....	12
3.1.2 Abrasif aşınma	13
3.1.3 Yorulma aşınması	13
3.1.4 Korozyif aşınma	14
3.2 Yağlama	14
3.2.1 Yağlama rejimlerinin belirlenmesi.....	15
3.3 Triboloji Testleri	16
4. NANOKOMPOZİT KAPLAMALAR	19
4.1 Nanokompozit Kaplamaların Üretiminde Kullanılan FBB Yöntemleri	19
4.1.1 Manyetik alanda sıçratma yöntemi	20

4.1.2 Katodik ark-FBB yöntemi	21
4.1.3 Hibrit sistemler	23
4.2 Mo-N-X (X: Alaşım Elementi) Nanokompozit Kaplamalar	24
4.2.1 Mo-N sistemi	24
4.2.2 Mo-Cu sistemi	27
4.2.3 Cu-N sistemi	28
4.2.4 Mo-N-X (X: alaşım elementi) sistemi	28
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
5.1 Taban Malzeme Analizleri	31
5.2 Mangan Fosfat Kaplama ve Karakterizasyonu	33
5.3 Mo-N-Cu Kaplama ve Karakterizasyonu	34
5.4 Triboloji Deneyleri	37
5.4.1 Stribeck eğrilerinin çıkarılması	37
5.4.2 Uzun deneyler (24 saat) ile sürtünme katsayılarının belirlenmesi	40
5.4.3 Süreye bağlı aşınma miktarlarının belirlenmesi	41
5.5 Aşınma Sonrası Yüzey Analizleri	42
5.5.1 Uzun deney (24 saat) sonrası yüzey profil analizleri	42
5.5.2 Uzun deney (24 saat) sonrası SEM analizleri	48
5.5.3 Süreye bağlı aşınma testlerinin analizleri	50
6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	57

KISALTMALAR

FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
KBB	: Kimyasal Buhar Biriktirme
RF	: Radyo Frekansı
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
% at.	: Atomik Yüzde
% ağı.	: Ağırlıkça Yüzde
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
MnP	: Mangan Fosfat
DD	: Dökme Demir
XRD	: X-Işınları difraksiyonu
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
SPS	: Spark Plazma Sinterleme
GDOES	: Işımalı Boşalma Optik Emisyon Spektroskopisi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Kompresör yatak çiftleri.....	7
Çizelge 4.1 : Kaplama kalınlık ve sertlik değerleri	29
Çizelge 5.1 : Kimyasal Bileşim	31
Çizelge 5.2 : 1 No’lu bölgenin EDS analizi sonucu	33
Çizelge 5.3 : Kaplama parametreleri	34
Çizelge 5.4: 1 No’lu bölgenin EDS analizi sonucu	36
Çizelge 5.5: 2 No’lu bölgenin EDS analizi sonucu	36
Çizelge 5.6: Yağ özellikleri.	38
Çizelge 5.7: 24 saatlik aşınma deneyi sonrasında elde edilen ortalama sürtünme katsayıları.	41
Çizelge 5.8: 24 saatlik aşınma deneyi sonrasında elde edilen ortalama sürtünme katsayıları, diskte ve pimde oluşan aşınma miktarları.....	47
Çizelge 5.9: Aşınma sonrası pimdeki kayıp hacim ve özgül aşınma hızı katsayısı. .	47
Çizelge 5.10: Aşınma sonrası MoN-Cu kaplamalı pimin EDS analizi.	48
Çizelge 5.11: Aşınma sonrası kaplamasız disk EDS analizi.	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Soğutma çevrimi [7].	4
Şekil 2.2 : Muhafaza açık (solda) ve muhafaza kapalı (sağda) kompresör görüntüsü.	4
Şekil 2.3 : Patlatılmış pistonlu kompresör görüntüsü [10].	6
Şekil 2.4 : Kompresör gövde görüntüsü [10].	7
Şekil 2.5 : Mangan Fosfat kaplama prosesi [11].	9
Şekil 3.1 : Adhesif aşınma [16]	12
Şekil 3.2 : Abrasif aşınma çeşitleri [16]	13
Şekil 3.3 : Yorulma aşınması örneği [18].	14
Şekil 3.4 : Korozyon aşınma örneği [18]	14
Şekil 3.5 : Stribeck eğrisi [11]	16
Şekil 4.1 : Çeşitli nanoyapılı ve kompozit kaplamaların şematik gösterimi [25].	19
Şekil 4.2 : Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi [26].	20
Şekil 4.3 : Hedef malzemeden inert gaz yardımıyla atom sıçratma [39].	21
Şekil 4.4 : Katodik ark noktalarının oluşum aşamaları [27].	22
Şekil 4.5 : Ark-FBB sistemi (İTÜ).	23
Şekil 4.6 : Hibrit kaplama sistemi [26].	24
Şekil 4.7 : Mo-N ikili faz diyagramı [29].	25
Şekil 4.8 : Farklı azot basınç değerlerinde yapılan kaplamaların XRD paternleri [33].	26
Şekil 4.9 : MoN ve TiN kaplamalı numunelere uygulanan aşınma testi sonucu [33].	26
Şekil 4.10 : Mo-Cu ikili faz diyagramı [29].	27
Şekil 4.11 : Disk/bilya deneyi sonucunda sürtünme katsayısı değerleri [32].	29
Şekil 4.12 : Kaplamaların mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değerleri [26].	30
Şekil 5.1 : Dağlama öncesi parlatılmış numunenin mikroyapısı.	32
Şekil 5.2 : Dağlama sonrası mikroyapı (100X).	32
Şekil 5.3 : Mangan fosfat kaplanmış numunenin SEM görüntüsü (1000X).	33

Şekil 5.4 : Dökme demir disk (solda) ve pim (sağda).	34
Şekil 5.5 : Kaplama sonrası droplet oluşumu.	35
Şekil 5.6 : Zımpara öncesi MoN-Cu kaplama SEM görüntüsü (50X).....	35
Şekil 5.7 : Pim kesitinden alınan kalınlık ölçümü (5000X).....	36
Şekil 5.8 : MoN-Cu kaplamasına ait XRD paterni.	37
Şekil 5.9 : Dökme demir pim-dökme demir disk-Stribeck eğrisi.	38
Şekil 5.10 : MnP kaplamalı pim-kaplamasız disk-Stribeck eğrisi.	39
Şekil 5.11 : MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk-Stribeck eğrisi.	39
Şekil 5.12 : Karşılaştırmalı Stribeck eğrileri.	40
Şekil 5.13 : Karşılaştırmalı 24 saatlik aşınma deneyleri.....	41
Şekil 5.14 : BRUKER ContourGT model optik profilometre.	42
Şekil 5.15 : Dökme demir pim-dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu). 43	
Şekil 5.16 : Dökme demir pim-dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).. 43	
Şekil 5.17 : MnP kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu). 44	
Şekil 5.18 : MnP kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).. 44	
Şekil 5.19 : MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu). 45	
Şekil 5.20 : MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).. 45	
Şekil 5.21 : MoN-Cu kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu). 46	
Şekil 5.22 : MoN-Cu kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).. 46	
Şekil 5.23 : Aşınma sonrası MoN-Cu kaplamalı pim SEM görüntüsü (150X).	48
Şekil 5.24 : Aşınma sonrası kaplamasız disk SEM görüntüsü (150X).	49
Şekil 5.25 : Zamana bağlı olarak kaplamasız diskte meydana gelen aşınma derinliği.	50
Şekil 5.26 : Zamana bağlı MoN-Cu kaplamalı pimde meydana gelen iz çapı değerleri.	50

**BUZDOLABI KOMPRESÖR YATAKLARINDA MoN-Cu NANOKOMPOZİT
KAPLAMALARIN MANGAN FOSFATLAMA YERİNE
KULLANILABİLME POTANSİYELİ**

ÖZET

Birbirleri ile sürtünme ve aşınma halinde parça ve yatakların kullanım ömrünü artırmak için bu malzemelere çeşitli modifikasyonlar uygulanır. Bu modifikasyonlar direk taban malzeme ile veya taban malzeme üzerine uygulanacak bir kaplama ile sağlanabilir. Geleneksel yöntemler arasında, taban malzemelere uygulanan ısıl işlem ile sertleştirme veya sadece yüzey sertleştirme yöntemleri hala kullanılmakta olan metotlar arasındadır. Ancak günümüz teknolojisi ile taban malzemeye dokunmaksızın yüzeye uygulanan kaplamalar ile daha üstün tribolojik özellikler elde etmek mümkündür.

Geçiş metallerin nitrürleri, üstün sertlik ve korozyon önleyici özelliklerinden dolayı tribolojik amaçlı çok sık kullanılan kaplama türleridir ve özellikle sert kesici takımlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kaplamaların tribolojik uygulamalarda verimli hale gelebilmesi için iyi katı yağlayıcı özellikleri göstermeleri önemlidir. Bu tip sert kaplamalara (TiN, CrN, MoN vb.) yapılacak yumuşak faz (Cu, Sn, Ag vb.) katkılandırmaları ile daha üstün katı yağlayıcılık özellikler gösteren nanokompozit kaplamaların eldesi mümkün olup, kaplamalı parçaların aşınma miktarları azaltılarak çalışma ömürleri arttırılabilmektedir.

Çeşitli vakum altına kaplama teknikleri ile nanokompozit kaplamalar elde etmek mümkündür. Bu yöntemler arasında en çok kullanılanlar; katodik ark FBB, manyetik alanda sıçratma ve bu yöntemlerin bir arada kullanıldığı hibrit sistemler sayılabilir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde MoN kaplamaların, TiN ve CrN kaplamalara göre tribolojik özelliklerinin daha iyi olduğu gözlenmiştir ve bu sert kaplamalara yumuşak bir faz olan Cu ilavesi ile nanokompozit kaplamalar elde edilmiş ve aşınma testleri yapılmıştır. En düşük sürtünme katsayısı Cu katkılı MoN kaplamalarda görülmüştür.

Mevcut durumda buzdolabı kompresör yataklarına mangan fosfat kaplama uygulanmaktadır. Yağ tutucu özelliği olan bu kaplamalar yatak yüzeylerini belirli bir süre aşınmadan korumaktadır, fakat sert kaplamalar gibi uzun ömürlü olamamaktadırlar.

Bu çalışmanın ön aşamasında, mangan fosfat kaplamalı dökme demir taban malzemelere yağlı ortamda ve 80°C’de aşınma testleri (pim-disk) uygulanmış, Stribeck eğrileri çıkarılarak yağlama rejimleri (hidrodinamik, karma ve sınır yağlama) tespit edilmiş ve sabit yük altına uzun süreli (24 saat) aşınma deneyleri yapılarak sürtünme katsayıları tespit edilmiştir.

Çalışmanın asıl aşamasında, dökme demir taban malzeler üzerine katodik FBB yöntemi ile %90 Mo- %10 Cu içeriğine sahip tek katot kullanarak azot atmosferinde MoN-Cu nanokompozit bir kaplama uygulanmıştır. Yapılan dropletleri

(damlacıkları) hafif zımparalama yolu ile giderilerek kaplama kalınlıkları ve sertlikleri ölçülmüştür. XRD faz analizleri ve SEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra mangan fosfat kaplamalı dökme demirlere uygulanan aynı koşullarda Stribeck eğrileri çıkarılarak yağlama rejimleri tespit edilmiş ve sabit yüklü uzun deneyler ile (24 saat) sürtünme katsayıları bulunmuştur.

Bütün triboloji deneyleri sonrasında aşınma yüzey profilleri optik profilometre cihazı kullanılarak incelenmiştir. Diskteki aşınma derinlikleri ve pimdeki iz çapları ölçülüp, pim üzerinde meydana gelen aşınma değerlerinden yola çıkılarak özgül aşınma hızı katsayıları hesaplanıp birbirleri içerisinde karşılaştırılmıştır. En düşük özgül aşınma hızı katsayısı MoN-Cu kaplamalı pimde görülmüştür.

THE USAGE POTANTIEL OF MoN-Cu NANOCOMPOSITE COATINGS INSTEAD OF MANGANESE PHOSPHATING ON BEARING PARTS OF REFRIGERATOR COMPRESSORS

SUMMARY

There are various modifications in order to increase lifetime of bearing parts that are in contact with each other and faced with friction/wear. These modifications can be directly applied to the bulk substrate or the surface of the substrate by coatings. Among traditional methods, heat treatment or surface hardening methods are still in use. But it is possible to apply different coatings without modifying the original substrate to get superior tribological properties by the help of today's technology.

Nitrides of transition metals are the most commonly used coating type because of their excellent hardness and anti-corrosive features, especially for cutting tools. The most important thing about these type of coatings is to show solid lubricant properties. It is possible to obtain tribologically high performance hard nanocomposite coating by combining a hard phase (MoN, CrN, TiN, etc.) with a soft phase (Cu, Ag, Sn, etc.), so mechanical loss from the surfaces of bearing parts will decrease and lifetime of these pieces will increase.

Nanocomposite coatings can be produced by various vacuum technologies. The most commonly used methods among vacuum techniques are cathodic arc physical vapour deposition (PVD), magnetron sputtering and hybrid coating systems that are combining both two methods.

There are several recent studies about this topic. In one of these studies, researcher investigated tribological behaviour of MoN, TiN and CrN. After wear tests, he made a comparison between them and found that coefficient of friction (COF) value of MoN coating is lower than the others. But the lowest coefficient of friction value is obtained by adding a soft phase (Cu) into MoN hard coatings that are called nanocomposite coatings.

In existing situation, manganese phosphate coating is applied to only one surface of bearing parts (counterfaces are un-coated) of refrigerator compressors due to its oil-absorbing properties. By the help of this feature, operating life of bearing parts become longer for specific period, but not as long as hard coatings.

In this study, primary investigations was about exploring tribological behaviour of manganese phosphate coated cast iron materials. Tribological experiments of pin on disc samples by using reciprocating motion are conducted at 80°C in oil bath. The oil is a kind of mineral oil-based refrigeration oil for use with refrigerant isobutane (R600a) containing various additives.

First of all, Stribeck curves are found out in order to discover lubrication regimes (hydrodynamic, mixed and boundry lubrication regime) of manganese coated and

uncoated samples. In hydrodynamic lubrication regime, there is a stable oil film layer between tribo-couples, coefficient of friction value is low and it is possible to say that there is no real wear between the surfaces. Mixed lubrication regime is a transition region from hydrodynamic to boundry regime. The most aggressive wear conditions are observed in boundry lubrication regime, because stability of oil film between surfaces spoils and tribo-couples begin to be directly in contact. That's why coefficient of friction value gives a rise in this area. Boundry regime is the most significant region that shows high wear rate.

After discovering lubrication regimes from the graphs of Stribeck curves, long wear experiments (24 hours) under constant load and same temperature (80°C) in oil bath are conducted in order to determine coefficient of friction values. Coefficient of friction value of uncoated pin/ uncoated disc is 0.24, manganese phosphate coated pin/ un-coated disc is 0.20, both sides are coated is 0.14.

The main purpose of this study is to investigate tribological behaviour of MoN-Cu nanocomposite coated cast iron samples and compare them with manganese phosphate coated cast irons in existing situation. For this aim, cast iron disc and pin samples coated with MoN-Cu by cathodic arc physical vapour deposition technique (PVD) by using one cathode (target) material that contain %90 Mo- %10 Cu. This cathode material is produced by the method of spark plasma sintering (SPS). Before coating process, samples are cleaned with bombarding the surface of sample by cathode atoms under Argon atmosphere and during coating process nitrogen is used as reactive gas to obtain MoN phases.

The disadvantage of cathodic arc PVD system is droplet formation. Droplets formed on sample surface spoil the surface roughness and it is not useful tribological applications. So the surfaces must be polished after the coating process with fine sandpaper.

After polishing the surface, thickness and hardness of the coating are measured. The thickness is approximately 3-4 micron and the hardness is 22283 N/mm². Additionally, XRD (X-Ray Diffraction) and SEM-EDS (Scanning Electron Microscope- Energy Dispersive Spectroscopy) analysis are applied to the samples. Mo and Mo₂N phases are determined in XRD pattern, Mo peaks are assumed to come from droplets and Mo₂N phase is coming from coating region.

After characterization, MoN-Cu coated cast iron discs and pins are tribologically tested under same conditions (80°C, 24 hours, constant load: 50 N) that applied to manganese coated samples. Coefficient of friction value of MoN-Cu coated pin/ uncoated disc is 0.11, uncoated pin/ MoN-Cu coated disc is 0.06.

If coefficient of friction versus time curves of wear tests are compared, the most stable curves are obtained in MoN-Cu coated samples.

Wear track of all pin and disc samples are analyzed using optical profilometer in order to measure wear depth of disc, track diameter of pin and view 2D/3D surface morfology. The deepest and biggest value of wear depth and track diameter are observed in uncoated pin/ uncoated disc and smallest values are obtained in wear tests of MoN-Cu coated pin/ uncoated disc.

Addition to these wear depth and diameter measurements, wear volumes of pin materials are calculated depending on pin geometry using original radius and

diameter of wear track after wear experiments. Wear volumes are estimated directly proportional to track diameter of pins.

After finding out wear volume of pins, specific wear rate coefficients are calculated by using Archard Equation (1953);

$$V = k \times F \times s$$

V: Wear volume (m^3)

k: Specific wear rate coefficients (m^3/Nm)

F: Normal load (N)

s: Sliding distance (m)

The specific wear rate coefficient of uncoated pin/ uncoated disc tribo-couple is $3.78 \text{ m}^3/\text{Nm}$, while manganese phosphate coated pin/manganese phosphate coated disc is $1.92 \text{ m}^3/\text{Nm}$ and MoN-Cu coated pin/ un-coated cast iron disc is $0.15 \text{ m}^3/\text{Nm}$.

Amount of wear depending on time also investigated in this study. Long wear experiment (24 hours) of MoN-Cu coated pin and uncoated disc is divided into four sub-durations (3 hours- 6 hours- 12 hours- 24 hours). In every duration step, experiment was stopped and wear depth of the disc, track diameter of pin were measured using optical profilometer. It is observed that the rate of change of wear depth that occurs in the uncoated disc decreases as time progresses; however on the MoN-Cu coated pin, it can be said that the wearing stops after 12 hours.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Amaç

Artan nüfus ve azalan kaynaklar nedeniyle günümüzde enerji tasarrufuna verilen önem gitgide artmaktadır. Enerji tasarrufu sağlamak amacıyla yeni teknoloji alanları geliştirilmekte, mevcut olan teknolojilere ise çeşitli modifikasyonlarla iyileştirmeler uygulanmaktadır. Bu konu buzdolabı endüstrisi için de gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Buz dolaplarının temel soğutma elemanı kompresörlerdir ve verimleri performans sabiti olarak ifade edilmektedir. Bir buzdolabı kompresörünün performans sabiti değerinin yüksek olması, daha yüksek verimle çalışması ve daha fazla enerji tasarrufu sağlaması anlamına gelir. Performans sabiti değerini arttırmak için kompresörü oluşturan elemanları iyi tanımak ve analiz etmek gereklidir.

Bir kompresör sistemi incelendiğinde; birbirleri ile sürtünme-aşınma halinde olan yatak malzemelerinin tribolojik bir sistem oluşturduğu görülmektedir. Bu yatak malzemelerinin aşınması ve sürtünme katsayılarının yüksek olması mekanik kayıpları arttırmakta, dolayısıyla kompresör verimini düşürmektedir. Bu yüzden yatak malzeme yüzeylerine yüzey sertleştirme, kaplama vb. yüzey modifikasyonları yapılmaktadır. Mevcut durumda en fazla kullanılan yöntem dökme demir krank mili ve sinter metal piston/biyellere uygulanan mangan fosfat kaplamalardır. Yağ tutucu özelliği olan mangan fosfat kaplamalar yağlı ortamda belirli bir seviyeye kadar kompresör yataklarını aşınmaya karşı korumaktadır.

Literatürde FBB yöntemleriyle üretilen, yüksek sertlik ve korozyon direnci gibi avantajlara sahip geçiş metal nitrürü esaslı ince film kaplamalar (Mo-N, Ti-N, Cr-N, W-N, Nb-N, Zr-N, Ta-N vs.) ve bu kaplamaların tribolojik amaçlı kullanımıyla ilgili çalışmalar bulunmaktadır [1,2]. Tribolojik özellikleri geliştirilmeye çalışılan bu tip kaplamaların tek katmanlı/çok katmanlı, hibrit, nanokompozit ve süperlatis olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Bu çalışmada incelenen nanokompozit kaplamalar genel olarak manyetik sıçratma, ark-FBB ve bunların kombinasyonu olan hibrit sistemler aracılığı ile uygulanabilmektedir. Literatürde

geçiş metal nitrürleri içerisine sert (Mo, Zr, W vs.) veya yumuşak (Ag, Cu vs.) metallerin katkılandırılmasıyla elde edilen nanokompozit kaplamalar mekanik kayıpları azaltıp mühendislik uygulamalarında performans artışı sağlayabilmektedir. [3,4]

Bu çalışmanın ilk aşamasında mevcut durumda dökme demir krank milleri yüzeylerine uygulanan mangan fosfat kaplamaların yağlı ortamda tribolojik özellikleri incelenmiştir. Sonraki aşamada alternatif olacak nanokompozit kaplamalardan Mo-N-Cu kaplama [5] katodik ark-FBB yöntemiyle dökme demir taban malzemeler üzerine uygulanmış ve bu kaplamaların tribolojik özellikleri aynı parametrelerle yağlı ortamda 80 C'de araştırılmıştır. Çalışmanın amacı; buzdolabı kompresörü hareketli yataklarında mangan fosfat kaplamaya alternatif olabilecek düşük sürtünme katsayılı, aşınmaya dayanıklı Mo-N-Cu kaplamanın kullanılabilme potansiyelinin araştırılmasıdır.

2. BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİ

Kompresörler genel olarak pozitif sıkıştırımlı ve santrifüj kompresörler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Pozitif sıkıştırımlı kompresörler ise; pistonlu (reciprocating), paletli dönel (rotary), helisel vida tipi dönel (screw type), çift spiralli (scroll), trokoidal (trochoidal) kompresörler olarak sınıflandırılabilir. [6]

Sıkıştırma ve tahrik mekanizmalarının pozisyon ve konumuna göre ise; hermetik, yarı-hermetik ve açık-tip kompresörler olarak üç farklı grupta incelenebilir. Hermetik tipi kompresörlerde motor ve kompresör aynı kapalı muhafaza içerisinde iken yarı-hermetik kompresörlerde motor ve kompresör farklı muhafaza içerisinde bulunmaktadır. Kayış kasnak mekanizmalı ve kavramalı kompresörler ise açık tip kompresörler olarak adlandırılmaktadır. [7]

Endüstriyel olarak kullanılan ilk tip kompresörler pistonlu tip kompresörlerdir. Hermetik tip kompresörler ise daha geniş basınç aralıklarında çalışma olanağı tanımaktadır. Santrifüjlü kompresörlerin endüstriye geçmesiyle birlikte bir miktar popülaritesini kaybeden pistonlu kompresörler günümüzde tekrar önem kazanmaya başlamıştır. Santrifüjlü kompresörlerle karşılaştırıldığında pistonlu hermetik kompresörlerin bakım maliyetleri daha yüksektir. [8]

Bu çalışmada kompresör elemanlarının motor ve kompresörün aynı kapalı muhafaza içinde bulunduğu hermetik tipi pistonlu kompresörler konu edilmiştir.

2.1 Buzdolabı Kompresörleri Çalışma Prensipleri

Buzdolabı kompresörlerinin görevi soğutkanı çıkıştırıp buzdolabına göndermek ve yeterli soğutmayı sağlamaktır. Bu olayı kompresör giriş ve çıkış portlarında basınç farkı yaratarak sağlar [6]. Kompresör, evaporatör ve kondenserin de yer aldığı buzdolabı soğutma çevrimi Şekil 2.1’de verilmiştir.

Gaz fazındaki soğutkan kompresör tarafından alçak basınç etkisi ile emilir ve yüksek basınç ile sıkıştırılır. Kondensere (yoğusturucu) gelen gaz aşırı soğutmaya maruz kalarak sıvılaştırılır. Daha sonra kısılma aygıtından geçerek oluşturulan adyabatik

genleşme etkisi ile basınç gradyanı oluşur ve basınç düşer. Soğutkan sıvı evaporatör kısmında ısıyı emerek kendisi ısınırken buzdolabını soğutur ve gaz fazına geçer. Soğutkan gaz tekrar kompresöre ulaşarak çevrimi tamamlamış olur.



Şekil 2.1 : Soğutma çevrimi [7].

2.2 Buzdolabı Kompresörlerini Oluşturan Parçalar

Hermetik pistonlu kompresörler genel olarak; ana gövde, krank mili, piston, biyel, perno, yay sistemi, elektrik motoru ve muhafazadan oluşur. Örnek bir kompresörün muhafazası açık ve kapalı haldeki görüntüsü Şekil 2.2’de, patlatılmış çizimi ise Şekil 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.2 : Muhafaza açık (solda) ve muhafaza kapalı (sağda) kompresör görüntüsü.

Sızdırmazlık, kompresör gövdesi için önemli bir husustur ve gövdeler genellikle dökme demir veya alüminyum alaşımlarından üretilirler. Ana gövde üzerinde; silindir, emme ve egzoz susturucuları, emme ve egzoz manifoldları, emme ve egzoz valfleri, valf tablası, kapasite kontrollü sistemlerde kontrol mekanizması ve elektrik motorunun stator ve rotor bağlantı yuvaları bulunur. [6]

Kompresörün çalışması esnasında hareketli yataklardan kaynaklanan titreşimler oluşur, bu titreşimleri sönmölemek amacıyla yay sistemleri kullanılmaktadır. [9]

Elektrik motoru, rotor ve stator ana parçalarından oluşur ve elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrimini sağlar. [9]

Muhafaza ise hem yağ haznesi görevi görür hem de diğer tüm parçaları içerisinde barındırarak dış ortam ile sızdırmazlık sağlar. [9]

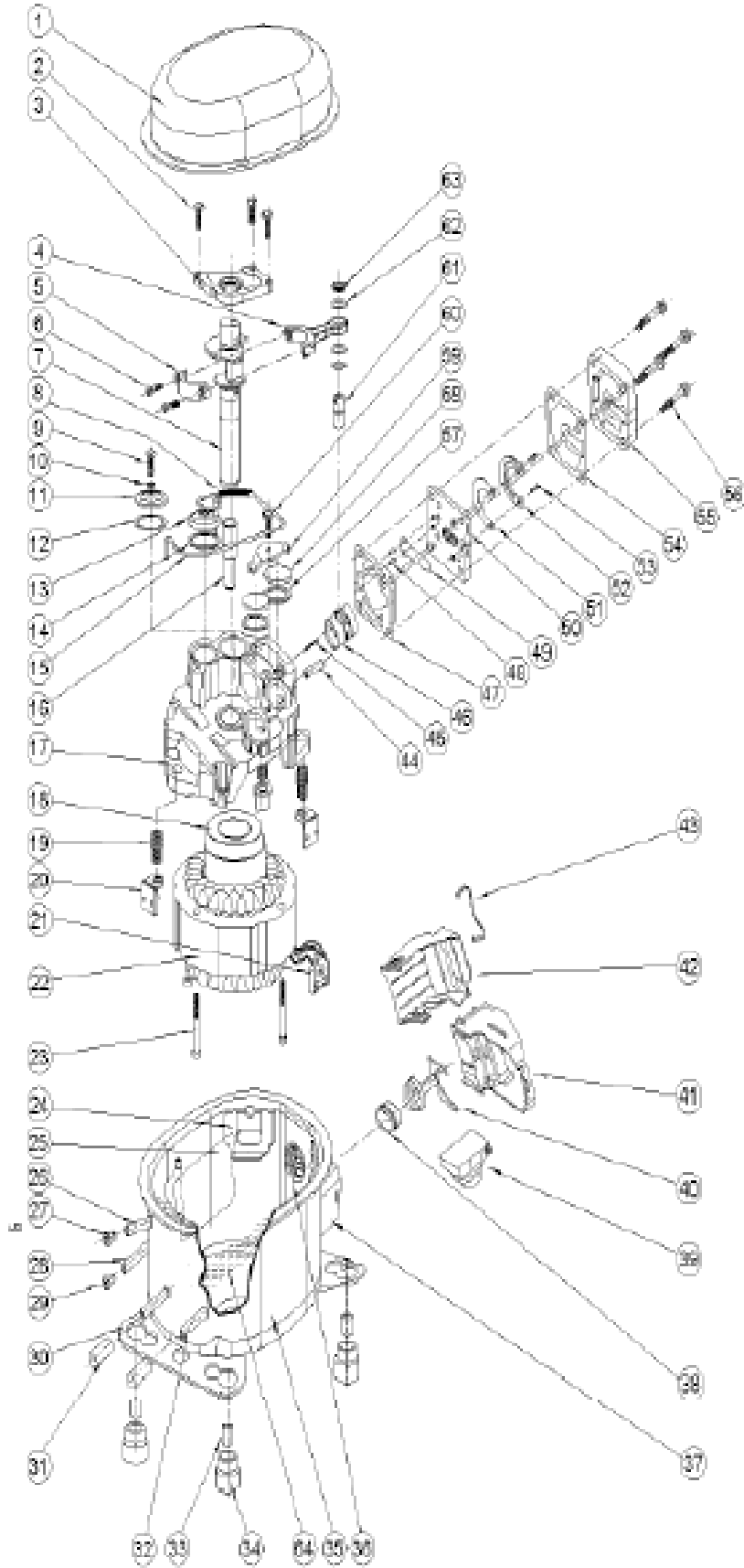
Kompresör mekanik hareketli yatak sistemleri genel olarak; krank mili, piston, biyel ve pernodan meydana gelir. Elektrik motorundan tahriklenerek dairesel hareket yapan krank mili genellikle dökme demir veya çelik malzemelerden imal edilir. Ürettiği dairesel hareketi, pistonun doğrusal hareketine çevirerek soğutkan gazın sıkıştırılmasına öncülük eder.

Krankın dairesel hareketini pistonun doğrusal hareketine çeviren, bir taraftan krank milinin eksantrik muylu kısmına diğer taraftan ise perno yardımıyla pistona bağlı olan parçaya biyel ismi verilir. Piston ve biyel genellikle sinter metal, çelik veya alüminyumdan üretilirken, perno yapımında ise döküm veya dövme çelik kullanılabilmektedir. [6]

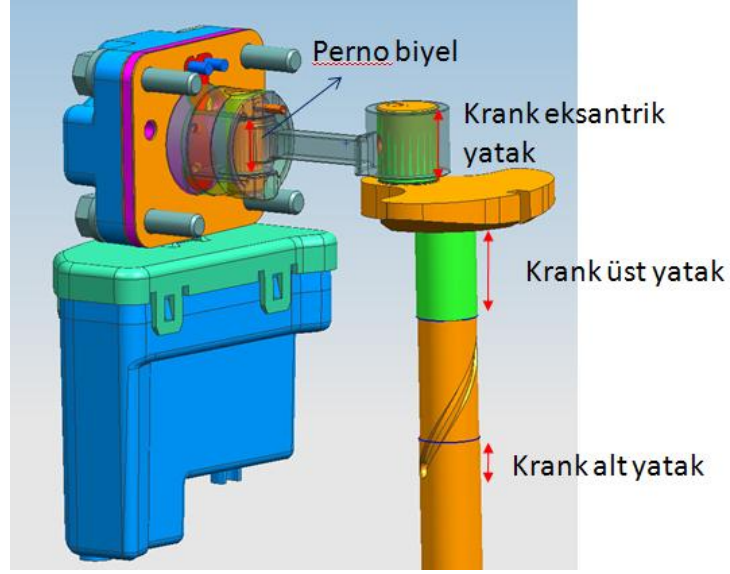
2.3 Buzdolabı Kompresörlerinde Bulunan Yatak Sistemleri

Yatak, bir mekanizmadaki iki hareketli parça arasında yük iletimini sağlayarak parçaların birbirine göre rölatif olarak tek veya çift eksenli hareketine olanak sağlayan makine elemanıdır. [11]

Beraber çalışacak olan yataklar tribolojik bir sistem oluşturur. Bu yüzden yatakların birbirleri ile uyumu, korozyon dayanımı, yağlayıcı ve soğutkan gaz ile beraber çalışabilme yeteneği, sıcaklık dayanımı ve diğer mekanik özellikleri malzeme seçimi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Şekil 2.4'teki gibi kompresör gövdesindeki yatak sistemleri görölmektedir. Yatak çiftleri ise Çizelge 2.1'deki gibi özetlenebilir.



Şekil 2.3 : Patlatılmış pistonlu kompresör görüntüsü [10].



Şekil 2.4 : Kompresör gövde görüntüsü [10].

Çizelge 2.1: Kompresör yatak çiftleri.

Numara	Yatak çifti-a	Yatak çifti-b
1	Gövde krank deliği	Krank uzun muylu
2	Gövde silindir deliği	Piston
3	Krank eksantrik muylu	Biyel
4	Biyel	Perno

Krank mili üzerinde en yüksek aşınma miktarı genellikle krank üst yatak ve eksantrik muylu kısımlarında görülmektedir. Bu yatak çiftlerinin tribolojik özelliklerini belirlemek için öncelikle yatakların aşınma ve sürtünme davranışları karakterize edilmelidir.

2.4 Buzdolabı Kompresörlerinde Mevcut Durum ve Karşılaşılan Problemler

Buzdolabı kompresör yatakları incelendiğinde; krank mili ve gövdenin dökme demir malzemeden, piston ve biyelin demir esaslı sinter metalden, perno parçasının ise çelikten üretildiği görülmektedir. Mevcut durumda krank mili, piston ve biyel parçalarına mangan fosfat kaplama uygulanmaktadır. Uygulanan mangan fosfat kaplamaların yağ tutucu özelliği olup, yatakları çalışma esnasında aşınmadan bir

miktar koruyabilmektedir, fakat sert bir kaplama türü olmadığı için zamanla aşınmaya maruz kalmaktadır. Aşınma sonucunda kaplama kalkması sorunu ortaya çıkarak taban malzeme de aşınmaya başlamaktadır ve kompresörün verimi zamanla düşmeye başlamaktadır.

2.4.1 Mangan fosfat kaplama

Temel olarak hureaulite ($Mn, Fe)_5H_2(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 'ten meydana gelen mangan fosfat kaplamalar yağ tutucu özellikleri sayesinde çalışan yüzeylerde sürtünme katsayısını azaltıp, parçaların kullanım ömrünü arttıırırlar. Ayrıca çalışma esnasında oluşturdıkları yumuşak katman basınç altında hafifçe deforme olur ve yüzey gerilimini azaltır. [12]

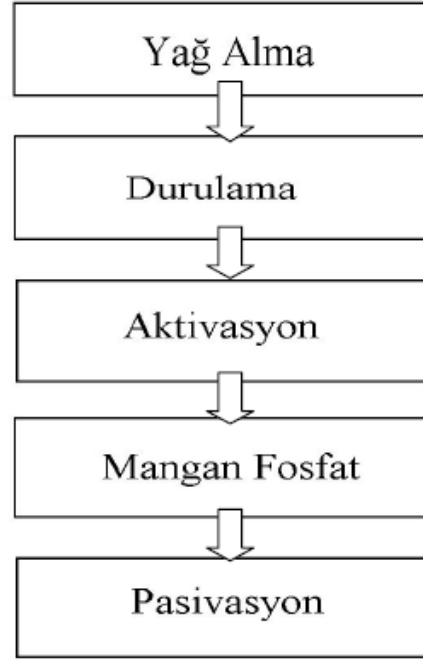
Mangan fosfat kaplamalar da hureaulite dışında banyo bileşimine bağlı olarak bulunan demir miktarına göre demir fosfat ve demir hidroksitler de bulunmaktadır. Daldırma yöntemiyle kaplanan bu kaplamalar da tane boyutu sürtünme katsayısı açısından çok önemli olup, küçük taneli mangan fosfat kaplamalar da bu katsayı daha düşüktür [13]. Tane boyutu; banyo parametreleri ile kontrol edilebilmektedir. En temel banyo parametreleri;

- Sıcaklık
- Banyo konsantrasyonu
- Daldırma süresi olarak sıralanabilir.

Daldırma yöntemiyle mangan fosfat kaplama prosesi Şekil 2.5'teki gibi gösterilebilir.

Mangan fosfat kaplama öncesi yüzey temizliği çok önemlidir, çünkü tozlu veya yağlı kalan yüzey, kaplama kalitesini ciddi oranda kötü etkilemektedir. Bu yüzden parçalar kaplama öncesinde yağ alma banyosundan geçirilir. Kullanılan alkalilerin yüzeyi iyi ıslatması, yağları parçalayabilmesi ve sonrasında iyi durulanabilmesi gereklidir. [14]

Ön fosfatlama olarak kabul edilen aktivasyon banyosunda içeriğinde bulunan mangan ve sodyum fosfatlar sayesinde yüzeyde metalik bir tuz tabakası oluşur. Aktivasyon banyosu tane boyutunun küçük olup homojen dağılması açısından önemlidir. Bu banyo, yüzeydeki katodik çekirdek sayısını arttırdığı için kaplama son kalitesi açısından çok önemlidir. [12,13] Aktivasyon işlemi ile; optimum kaplama kalınlığı ve reaksiyon süresi de sağlanmaktadır [14].



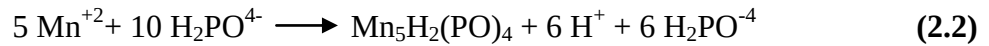
Şekil 2.5 : Mangan Fosfat kaplama prosesi [11].

Fosfatlamanın asıl yapıldığı kademe fosfatlama banyosudur. Bu banyoda ortofosforik asit, mangan fosfat tuzu, katalizör ve oksidanlar bulunur. Banyoyu oluşturan ana iyonlar Mn^{2+} , PO_4^{3-} ve NO_3^- iyonlarıdır ve pH yaklaşık 2 civarındadır. Mangan fosfat oluşumu iki aşamada özetlenebilir; ilki demirin elektrokimyasal olarak çözünmesi, ikincisi ise fosfat kristallerinin çökme reaksiyonlarıdır.

Banyoda ilk olarak demirin çözünme reaksiyonu gerçekleşir ve hidrojen redüklenir, H_2 gazı açığa çıkar. NO_3^- gibi oksidanlar, demirin çözünmesi sırasında H_2 gaz baloncuklarının fiziksel olarak yüzeyi bloke etmesini engellemektedir.[12]



Artan pH ile birlikte, çözünürlüğü düşük olan fosfat taneleri çökmeye başlar.



İlk reaksiyonda yükseltgenmiş olan demir iyonları fosfat ile birleşerek hureaulite yapısını meydana getirir. Ancak banyoda Fe^{2+} iyonlarının varlığından dolayı karma hureaulite yapısı $((Mn, Fe)_5H_2(PO_4)_4 \cdot 4H_2O)$ meydana gelebilir. [12]

Kaplama prosesi sırasında serbest asit miktarında artış gözlenmektedir ve optimum bir kaplama kalitesi için serbest asit konsantrasyon değeri kontrol altında tutulmalıdır [14].

3. TRİBOLOJİ SİSTEMLERİ

Triboloji, malzemelerin aşınma, sürtünme ve yağlama davranışlarını inceleyen bir bilim dalıdır. Çeşitli kuruluşlarca yapılan araştırmalara göre dünyada üretilen enerjinin üçte biri sürtünme kaynaklı kayıplar tarafından yok olmaktadır, bu da dolayısıyla ekonomik kayıplara yol açmaktadır [15]. Bu kayıpları önlemek adına, çalışan tribolojik sistemi oluşturan komponentler iyi tanınmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır. Süregelen yöntemlerde çalışan yatak parçalarına ısıtma işlemi veya yüzey setleştirme yöntemleri uygulanarak parçaların aşınma dayanımı artırılmaktadır. Vakum altına ince film kaplama yöntemleri de son dönemlerde hızla gelişmekte olan ve parçaların ömrünü artırmada ciddi katkılar sağlayan bir alandır.

3.1 Aşınma ve Sürtünme Davranışları

Sürtünme, temas halindeki iki yüzeyin birbirine göre rölatif olarak yaptıkları harekete veya bu hareketin başlaması için etki eden kuvvete karşı gösterdikleri dirençtir [11]. Bazı uygulamalarda yüksek sürtünme kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır, fakat önemli olan bu sürtünme kuvvetinin limitlerini belirleyip bu limitlerin dışına çıkmamaktır.

Sürtünme kuvveti; sürtünme katsayısının (μ) ve yüzeye etki eden normal kuvvet (N) ile çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

$$F = \mu N \quad (3.1)$$

F: Sürtünme kuvveti

μ : Sürtünme katsayısı

N: Normal kuvvet

Sürtünme durumundaki gerçek temas alanı aşağıdaki formülden hesaplanabilir;

$$A = N/H \quad (3.2)$$

N: Yüzeye etki eden dik kuvvet

H: Akma mukavemeti

Aşınma ise bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır. Katı bir parça üzerinden malzeme kaybı, kimyasal bozunma ve atomların fiziksel olarak ayrılması şeklinde olabilir. Farklı aşınma mekanizmaları farklı aşınma tiplerine neden olmaktadır, başlıca aşınma türler adhesif, abrasif, yorulma ve korozyon olarak sınıflandırılabilir. [16]

Parçalar arasındaki aşınma miktarını azaltmak için tribolojik sistemi oluşturan komponentleri iyi tanımak ve ortam koşullarını (yağ, sıcaklık vs.) da bu sisteme uygun bir biçimde optimize etmek gereklidir. Bir tribolojik sistem;

- Ana malzeme (aşınan)
- Karşı malzeme (aşındıran)
- Ara malzeme (tribofilm, yağlayıcılar vs.)
- Yük ve temas basıncı ile tanımlanabilir.

3.1.1 Adhesif aşınma

Adhesif aşınma, birbirleri üzerinde kayarak sürtünen metal çiftlerinde rastlanan bir aşınma türüdür. Bu tür aşınmalarda parçaların sürtünmesi esnasında yapışma kuvvetlerinin de etkisiyle parçalar arasında soğuk kaynaklanma meydana gelir ve yüzeyden kopmalar gerçekleşir.

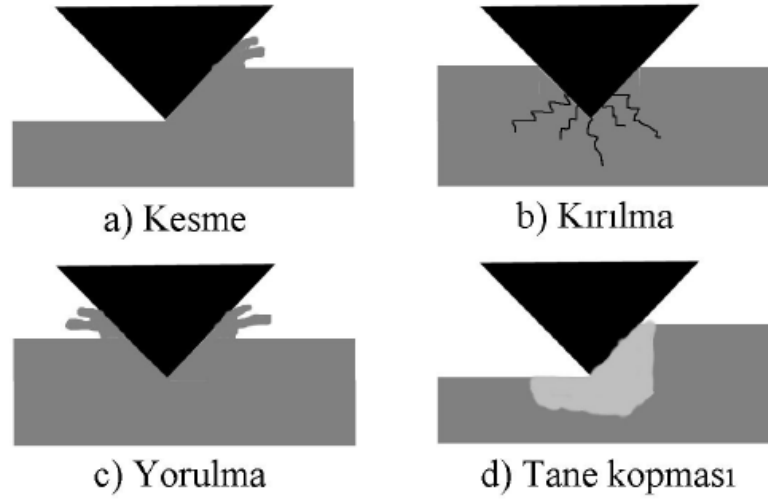


Şekil 3.1 : Adhesif aşınma [16].

Adhezyon tipi aşınmada genellikle yumuşak malzemeden sert malzemeye geçiş görülmektedir [16]. Adhesif aşınma örneği Şekil 3.1’de verilmiştir.

3.1.2 Abrasif aşınma

Sert parçaların kendileri ile aynı sertlikte ya da daha düşük sertlikte bir yüzeye teması sonucu görülen aşınma türüne denir. Abrasif aşınma, biri diğerinden daha pürüzlü olan metal yüzeylerinden sert olan yüzeyin yumuşak yüzeye batarak çapak kaldırması şeklinde gerçekleşebileceği gibi; sert aşındırıcı malzemelerin karşılıklı çalışan iki yüzey arasında girmesi sonucunda da gerçekleşebilir [17]. Bu aşınma genellikle başka aşınma mekanizmalarını da beraberinde getirir. Şekil 3.2'de abrasif aşınma çeşitleri görülmektedir.



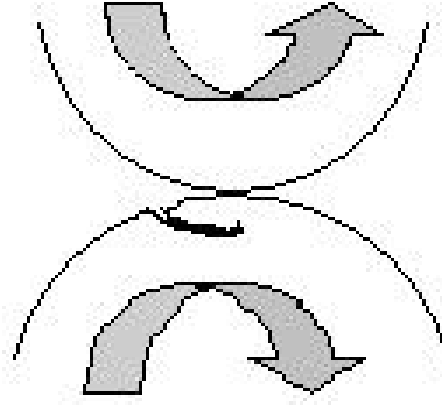
Şekil 3.2 : Abrasif aşınma çeşitleri [16].

Abrasif aşınma, malzeme yüzeyine etki eden yük azaltma veya yüzey sertleştirme (alaşımlandırma, ısıtma işlemi, kaplama vs.) yöntemleri ile azaltılabilmektedir. [17]

3.1.3 Yorulma aşınması

Bu aşınma türü, tekrarlı periyodik yüklemelere maruz kalan malzemelerin yüzeylerinde veya yüzeye yakın bölgelerinde iç çatlakların oluşması ile başlangıç gösterir. Kayma düzlemi boyunca çatlak ilerler ve yüzeyden partiküller kalkmaya başlar. Yorulma aşınması, gerilim kaynaklı bir aşınma olmasına rağmen genellikle abrasif ve adhesif aşınmadaki kadar ciddi bir aşınma miktarı görülmemektedir. [17]

Şekil 3.3'de örnek bir yorulma aşınması şematize edilmiştir, çatlak ilerlemesi ile kopmaya başlayan parça görülmektedir.



Şekil 3.3 : Yorulma aşınması örneği [18].

3.1.4 Korozi aşınma

Korozif aşınma tek başına veya diğer aşınma türleriyle birlikte ortaya çıkabilir. Aşınma ve sürtünme etkisiyle ortaya çıkan ısı ile birlikte aşınan yüzeylerde oksitlenmeler meydana gelebilir. Bu oksitler sert karakterli olup yüzeyler arasında abrasif etkisi yaratabilir ve bu da aşınma hızını ve miktarının artmasına yol açabilmektedir.

Korozif aşınma örneği Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Korozif aşınma örneği [18].

3.2 Yağlama

Mühendislik uygulamalarında kullanılan yağlar, tribo-çiftlerin sürtünme ve aşınma davranışını geliştirmek amacıyla kullanılırlar. Doğru yağın doğru uygulamada kullanılması parçaların servis ömrünü arttırmak açısından çok önemlidir. Bu yüzden

ihtiyaç duyulan yağın fiziksel özellikleri ve çalışacağı servis koşulları (sıcaklık, basınç vb.) iyi belirlenmelidir.

Yağın fiziksel özelliklerinden olan viskozite, temel olarak akışkanlığa karşı gösterilen direnç olarak tanımlanabilir. Özellikle yüksek temas basıncına sahip yataklarda aradaki yağ filminin stabilitesi açısından viskozite değeri çok önemlidir. Viskozite; sıcaklığa, basınca ve kayma oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. [19]

Yüksek viskoziteye sahip yağların daha stabil yağ filmi oluşturacağı öngörülse de her zaman bu varsayım doğru olmamaktadır, çünkü yüksek viskoziteli yağların kullamında parçalar için gerekli kayma gerilmesi daha yüksek olabilmektedir. Bu da güç kaybına, ortaya daha fazla ısı çıkmasına ve parça yüzeylerinde bozulmaya yol açabilir. [16]

Kompresörlerde ise yağ; sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak, piston-silindir arasındaki yağ kaçıını engellemek ve sürtünme ile ortaya çıkan ısıyı başka bölgelere taşıyarak bölge sıcaklık artışını engellemek amacıyla kullanılır. [11]

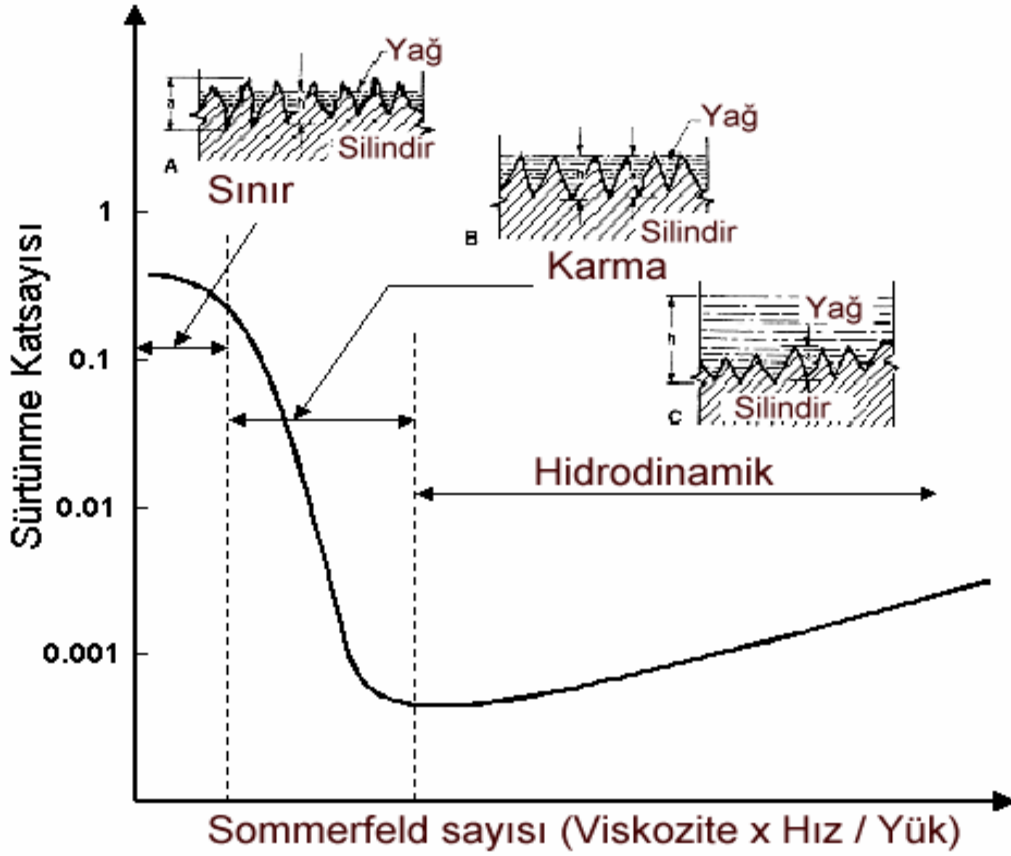
Kompresörde pistonun görevi soğutkan gazın sıkıştırmak olduğundan bu bölgede yağ ile soğutkan gazın bir miktar karışması mümkündür, bu değer limitlerin dışına çıktığında yağın performansında düşüş gözlenmektedir. Bu yüzden uygun yağın seçimi yapılırken, soğutkanın özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. [19]

3.2.1 Yağlama rejimlerinin belirlenmesi

Yağlama rejimleri genel olarak; hidrodinamik, karma ve sınır yağlama koşulları olarak üç ana grupta incelenebilir. Hidrodinamik yağlama koşullarında parçalar arasında stabil bir yağ filmi oluşmuştur, bu yüzden sürtünme katsayısı çok düşüktür ve aşınma gerçekleşmez. Karma yağlama koşullarında; yağ filminin stabil olmadığı bölgelerde parçalar arası temas gerçekleşir, bu yüzden sürtünme katsayısında artış gözlenir. Sınır yağlama koşullarında ise parçalar artık yoğun olarak temas halindedir, yağ filmi stabilitesini kaybetmiştir, dolayısıyla sürtünme katsayısı yükselir ve ciddi oranda aşınma gerçekleşir.

Bahsedilen yağlama rejimleri Stribeck eğrileri ile tespit edilebilir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Stribeck eğrileri; sürtünme katsayısının, Stribeck parametresine (Hız x Viskozite / Yük) bağlı olarak değişimini gösterir. Stribeck parametresi,

Sommerfeld sayısı olarak da ifade edilebilir. Parçalar arası kayma hızı ve uygulanan kuvvet sabit seçildiğinde, viskozite arttıkça sürtünme katsayısının düştüğü görülmektedir [20,21].



Şekil 3.5 : Stribeck eğrisi [11].

Stribeck eğrileri, tirbo-çiftlerin sürtünme katsayısı tayininden daha çok yağlama rejimlerinin geçiş bölgeleri hakkında bilgi verir. Parçaların belirli servis koşulları altındaki sürtünme katsayısını belirlemek amacıyla sabit yük, sabit hız ve sabit sıcaklık altında uzun süre (örneğin 24 saat) aşınma deneyi yapılmalıdır.

3.3 Triboloji Testleri

Sürtünme ve aşınma halindeki parçalar arasındaki tribolojik ilişkiyi incelemek amacıyla farklı tiplerde deney düzenekleri geliştirilmiştir. Genellikle laboratuvar tipi olan bu düzenekler, kullanılacak parçaların gerçek servis koşullarını simüle edip aşınma miktarı ve tipi hakkında bilgi verebilmektedir. Bu noktada önemli olan parçaları ve servis koşullarını iyi anlayıp, uygun düzeneğin seçimidir. Uygun test düzeneği seçildikten sonra ise kullanılacak elemanlar ve parametreler belirlenmelidir.

Bunlar belirlenirken ya standartlar ya da servis koşulları göz önüne alınmalıdır. Bu sistem ve parametreler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Aşınan ve aşındıran malzeme geometrisi (disk, pim, halka vs.)
- Ortam yağlı ise; yağ cinsi ve yağın fiziksel özellikleri
- Ortam atmosferi (vakum, kuru hava, nemli ortam vs.)
- Sıcaklık
- Uygulanacak yük ve hız

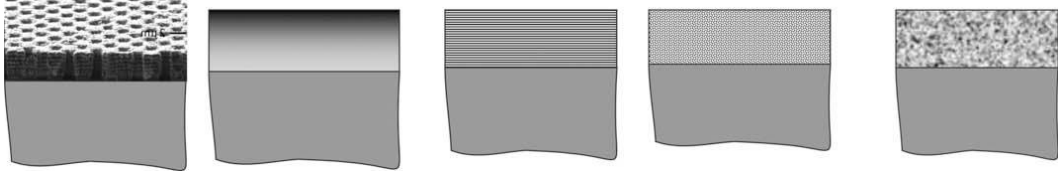
Literatürde belirlenmiş çeşitli test düzenekleri aşağıdaki gibi sıralanabilir; [11]

- Pim/ V blok testi
- Halka/ blok testi
- Disk / pim testi
- Bilye / plaka

Pim, disk, halka, blok, plaka vb. numune geometri tipleri dışında parçaların hareket cinsi de önemlidir. Bu hareket tipleri, doğrusal, dairesel, sarkaç vb. şeklinde olabilir. Belirtilen deney düzenekleri dışında çalışan tribo-çiftlerin kendi servis koşullarını baz alarak yeni bir sistem tasarımı yapmak da mümkündür.

4. NANOKOMPOZİT KAPLAMALAR

Nanomalzemelerin ve kalın nanokompozit kaplamaların; mikroelektronik, takım malzemeleri, biyomalzeme ve enerji alanında kullanımı uzun zamandır mevcut uygulamalar arasındadır [22,23]. Son yıllarda ise nanokompozit kaplamaların kullanımı, üstün performans özelliklerinin yanında ekonomik olması nedeniyle artmıştır [24].



Şekil 4.1 : Çeşitli nanoyapılı ve kompozit kaplamaların şematik gösterimi [25].

Şekil 4.1’de çeşitli nanoyapılı ve kompozit kaplamaların şematik bir gösterimi verilmiştir. Son yıllarda FBB ve KBB yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde bu kaplamaların üretim yöntemleri de gelişmiş ve genişlemiştir. Bu kaplamalar uygulama alanına bağlı olarak malzemelerin tribolojik, termal, elektriksel, korozyon vb. özelliklerini geliştirebilmektedir. En yaygın kaplama yöntemleri arasında iyon kaplama, ark-FBB ve katot sıçratma sayılabilir. Bu yöntemlerin çoğunda plazma enerjisinden yararlanılır. Plazma kimyasının ve enerjisinin kontrolü ile çeşitli kompleks kompozisyon ve nanoyapılar elde etmek mümkündür. Çoklu katot malzemelerin (magnetron) veya buhar kaynaklarının kullanımı ile çok farklı özelliklerde nanokompozit yapılar elde edilebilir. Nanokompozitlerin kaplama olarak kullanımı ana malzeme olarak kullanımıyla kıyaslandığında çok daha ucuza gelmektedir ve farklı türde altlık malzemelere de uygulama imkanı tanımaktadır. Bunun sebebi, çok az miktarda hammadde ile istenilen kaplama kalınlığına ulaşıp hammadde tasarrufu yapmakla bağlantılıdır. [24]

4.1 Nanokompozit Kaplamaların Üretiminde Kullanılan FBB Yöntemleri

Nanokompozit kaplamalarda üretim tekniği olarak, FBB, KBB ve bu yöntemlerin çeşitli kombinasyonları kullanılabilir. FBB yönteminin avantajı, farklı altlık

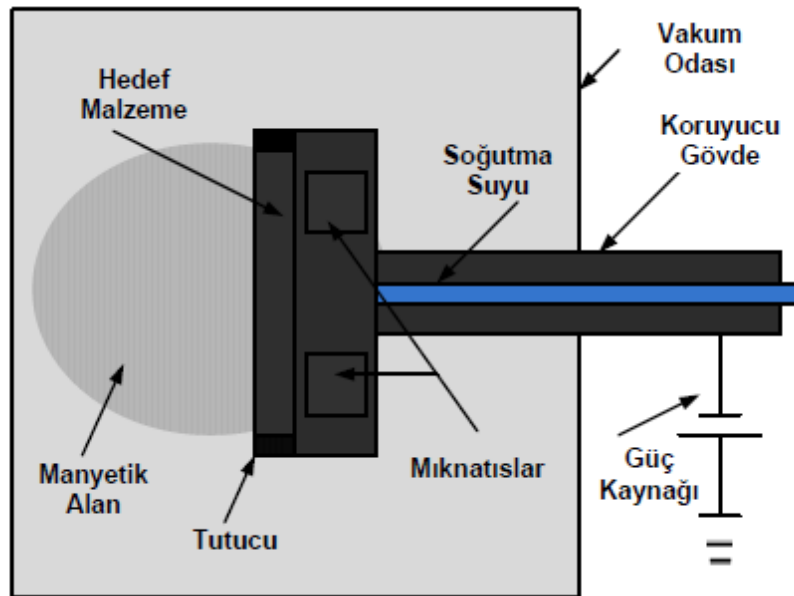
malzemelerin kullanılabilme imkanı ve daha çevre dostu olması olarak söylenebilir. FBB yöntemleri arasında ise manyetik alanda sıçratma, katodik ark ve bu iki yöntemin bir arada kullanıldığı hibrit sistemler ön plana çıkmaktadır. [26]

Bu tez çalışmasında katodik ark yöntemi kullanılmış olarak, katot olarak spark plazma sinterleme ile üretilen Mo-Cu kompozit malzemesi kullanılmıştır.

4.1.1 Manyetik alanda sıçratma yöntemi

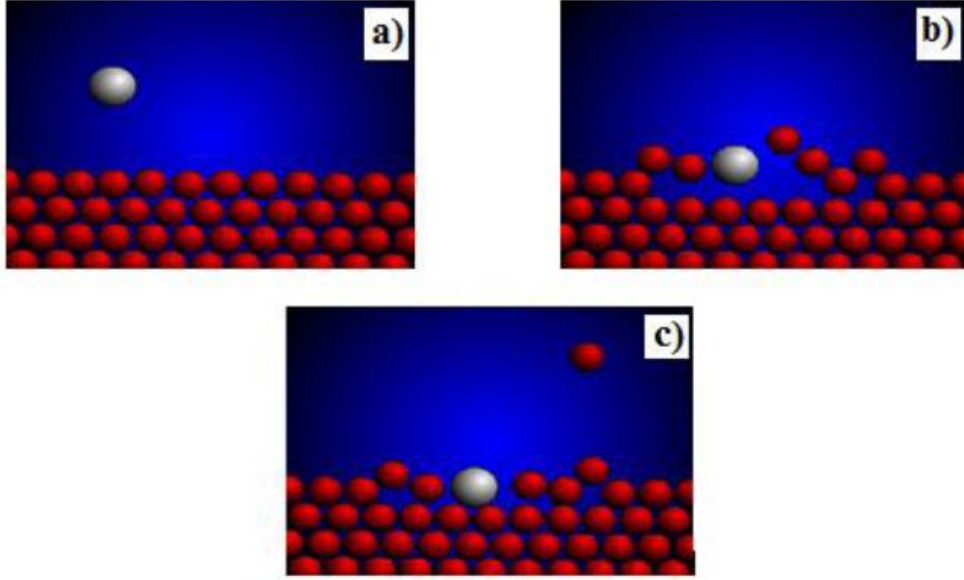
FBB yöntemi ince film kaplamalarda çok sıkça kullanılan yöntemlerden biridir. Kaynağa yerleştirilen malzeme ya yüksek sıcaklıklara ısıtılarak (buharlaştırma) ya da yeterince yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek (sıçratma) buhar haline geçer. Katı kaynak malzemesinin yüzeyinden buhar fazına geçecek parçacıkların yüzeyden ayrılması için gerekli enerji buharlaştırma tekniğinde ısı enerjisi ile, sıçratma tekniğinde ise bombardıman iyonlarının çarpma enerjisi transferi ile elde edilir. [27]

Manyetik alanda sıçratma yöntemi Şekil 4.2'de görüldüğü gibi genel olarak tutucu, hedef malzeme, mıknatıslar, soğutma suyu ve vakum odasından meydana gelir. Hedef malzemeye negatif doğru akım veya RF potansiyeli uygulanır ve çalışma esnasında soğutma suyu ile soğutulur. Tutucuyu da topraklamak veya negatif potansiyel uygulamak mümkündür. [26]



Şekil 4.2 : Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi [26].

Hedef malzemedeki atomlar Ar gibi inert bir gaz tarafından sıçratılıp, tutucuda bulunan altlık malzeme üzerinde biriktirilmektedir. Bu proses Şekil 4.3'teki gibi şematize edilebilir. Hedeften kopartılan atomlar direk altlık malzeme üzerinde birikebileceği gibi ortama reaktif gaz beslenmesiyle (O_2 , N vs.) sıçratılan atomların oksit ve nitrür halindeki bileşikleri de biriktirilebilmektedir. [28]



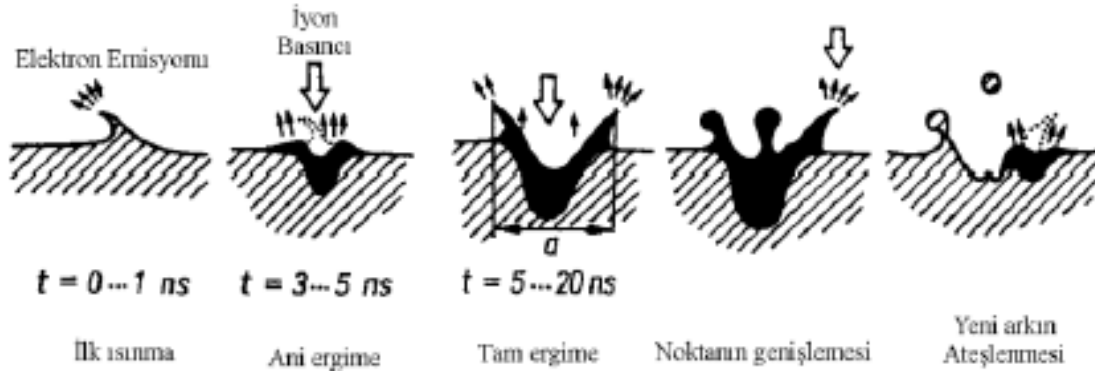
Şekil 4.3 : Hedef malzemedeki atomların inert gaz yardımıyla sıçratılması [39].

Manyetik alanda sıçratma yönteminin en büyük avantajı, yaratılan manyetik alan sayesinde sıçrayan atomların yönlendirilebilme özelliğidir, bu da özellikle büyük boyutlu parçalarda daha üniform bir kaplama kalınlığı elde edilebilmesine olanak verir [29]. Bu sistemde mıknastısların bir kutbu merkezde, diğer kutbu ise çevrede olmalıdır, böylece iyonize elektron ve atom arasındaki çarpışma miktarı artar ve bu da daha yoğun bir plazma oluşturarak sıçratma verimini artırır [26].

4.1.2 Katodik ark-FBB yöntemi

Bu yöntem, katot malzemesine yüksek akım, düşük voltaj uygulayarak ark yaratma prensibine dayanır. Katodun yüzeyinde arkın sebep olduğu ergime ve buharlaşma olayları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Katot üzerinde tetikleme yoluyla oluşturulan ark, yüzeyde gezinerek katot yüzeyinin homojen olarak buharlaştırılmasını sağlar ve oluşan bu buhar fazı yüksek elektron yoğunluğuna sahip katot önünde meydana gelen bölgesel çarpışmalar sonucunda iyonize olup taşınır [40]. Her bir noktadaki elektrik boşalması 10-20 sn sürmekte ve ardından bu nokta komşu bölgeleri

gelişigüzel gezerek yeni arkları tetiklemektedir. İyonizasyon derecesi malzeme cinsine bağlı olarak değişmektedir. [27]



Şekil 4.4 : Katodik ark noktalarının oluşum aşamaları [27].

Katodik arkın tetiklenmesi genellikle ark devresini mekanik olarak katot yüzeyine değdirerek veya katodu yalıtın tutucunun üzerine ince bir metal film yerleştirilerek yapılabilmektedir. Yerleştirilen ince film istenildiğinde tetikleme elektrodu ve katot arasında iletken bir köprü görevi görür ve elektronik anahtar yardımıyla anot-katot arasında anlık kısa devre oluşturmaktadır. [27]

Katodik ark yönteminde kaplama yapılacak olan altlık malzemeye çeşitli yüzey temizleme, ısıtma ve yüzey aktive edici işlemler uygulanabilir. Bu işlemler yapılırken katot iyonlarını kullanarak yüzeyi bombardıman etmek tercih edilen bir yöntemdir, fakat bu esnada katot atomlarının altlık yüzeyinde birikmesi engellenmelidir. Bunun için altlık malzemelere yüksek BİAS voltajı uygulanır. [27]

Bu yöntemde kaplama yapılmak istenen olan altlık malzeme vakum odasına anot olarak, buharlaştırılarak kaplanacak olan malzeme ise katot olarak yerleştirilir [26].

Katodik ark yönteminin en büyük dezavantajı, altlık malzeme yüzeyinde oluşturduğu droplet (damlacık) oluşumudur. Bu dropletler, katot yüzeyinden kopan ergiyik metalin altlık malzeme yüzeyine yapışması ile oluşan kusurlardır ve kaplama homojenitesini bozar. Yüzey pürüzlülüğünü artırır ve özellikle tribolojik açıdan istenmeyen sonuçlara yol açar. Kullanılan katot malzemesine göre bu dropletlerin yükseklikleri 40-50 μ 'lara kadar varabilmektedir. Ergime noktası ve ısı iletkenliği daha düşük olan katot malzemesinde droplet oluşum riski daha fazladır, ayrıca katot yüzeyinde ark noktalarının hareket hızı artırılarak yüzeydeki droplet sayısı azaltılabilir [27].

İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüzey Teknolojileri Laboratuvarı'nda bulunan ark-FBB sistemi Şekil 4.5'te verilmiştir.

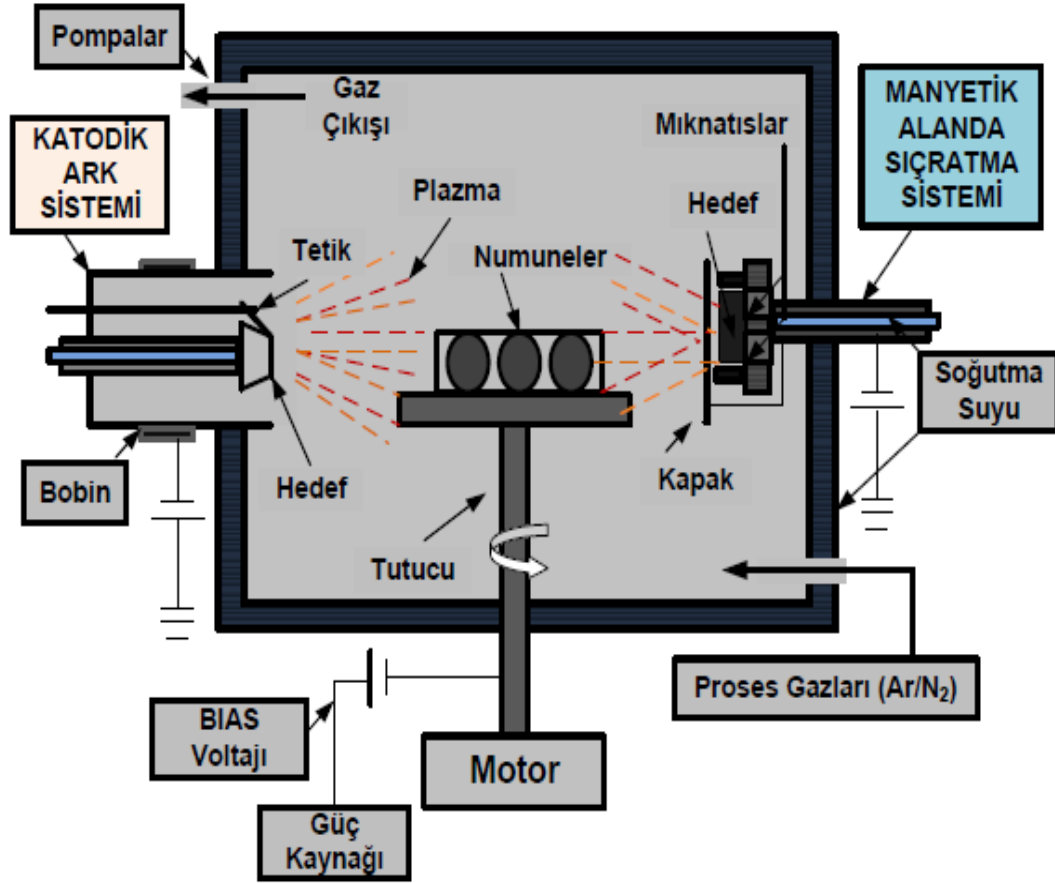


Şekil 4.5 : Ark-FBB sistemi (İTÜ).

4.1.3 Hibrit sistemler

FBB ve KBB yöntemleri tek başına kullanılabildiği gibi bu yöntemlerin beraber kullanıldığı hibrit sistemler de mevcuttur. Ürgen ve çalışma grubunun en çok kullandığı yöntem; manyetik alanda sıçratma ve katodik ark-FBB yöntemlerinin bir arada kullanıldığı hibrit sistemlerdir. [30, 31, 32]

Katodik ark sisteminde kaplama birikme hızı, manyetik alanda sıçratmaya göre daha yüksek olduğundan dolayı ana kaplama matrisi ark-FBB yöntemiyle, katkılandırma ise manyetik alanda sıçratma yöntemiyle yapılması tercih edilmelidir. Şekil 4.6'da bahsedilen örnek hibrit sistem verilmiştir.



Şekil 4.6 : Hibrit kaplama sistemi [26].

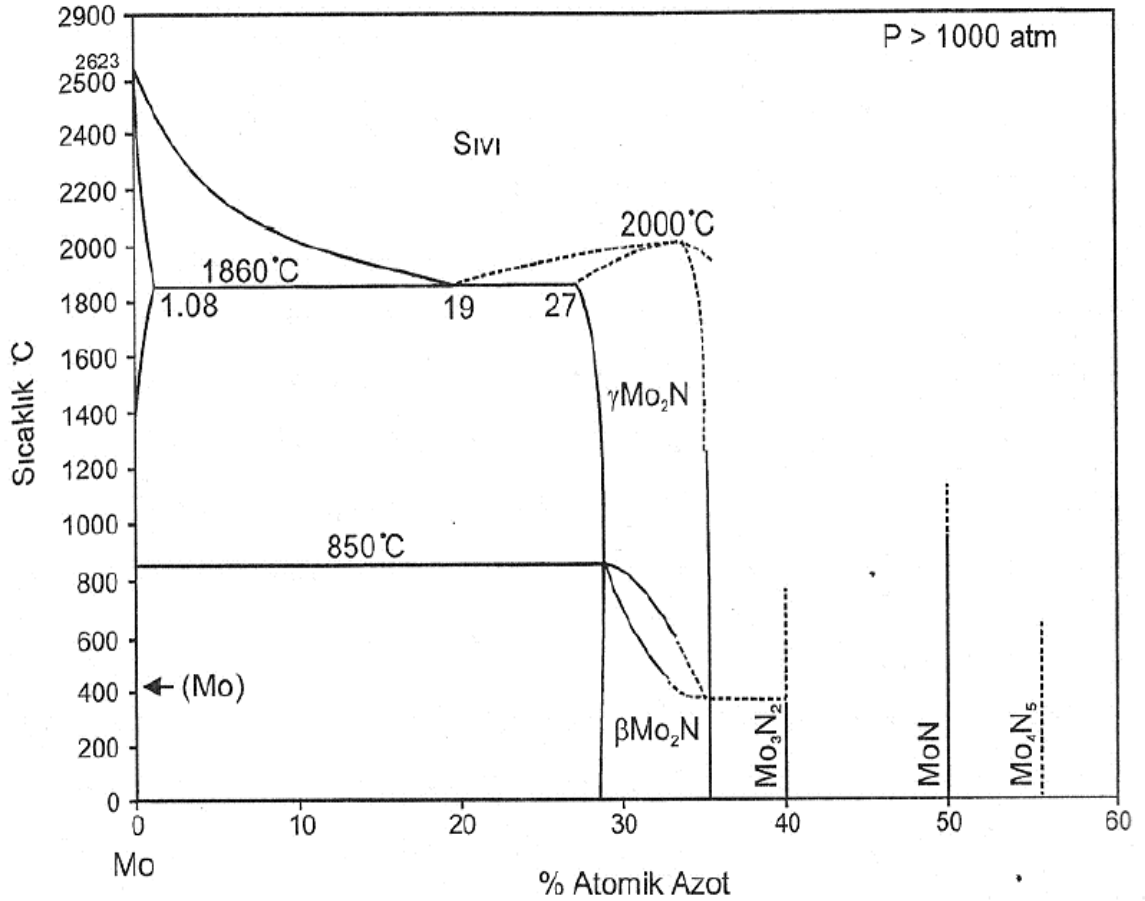
4.2 Mo-N-X (X: Alaşım Elementi) Nanokompozit Kaplamalar

4.2.1 Mo-N sistemi

Mo-N elementlerine ait ikili faz diyagramı Şekil 4.7'de verilmiştir. Düşük sıcaklıklarda (1000°C altı) molibdenin içerisinde azot çözünürlüğü çok düşüktür. Sıcaklık arttıkça molibdenin içerisinde azot çözünürlüğü artarken, 1860 °C'de maksimum %1.08 oranını bulmaktadır. Diyagramda ayrıca katı eriyiği, γ -Mo₂N, β -Mo₂N ve δ -MoN fazları ve diğer nitrürler yer almaktadır.

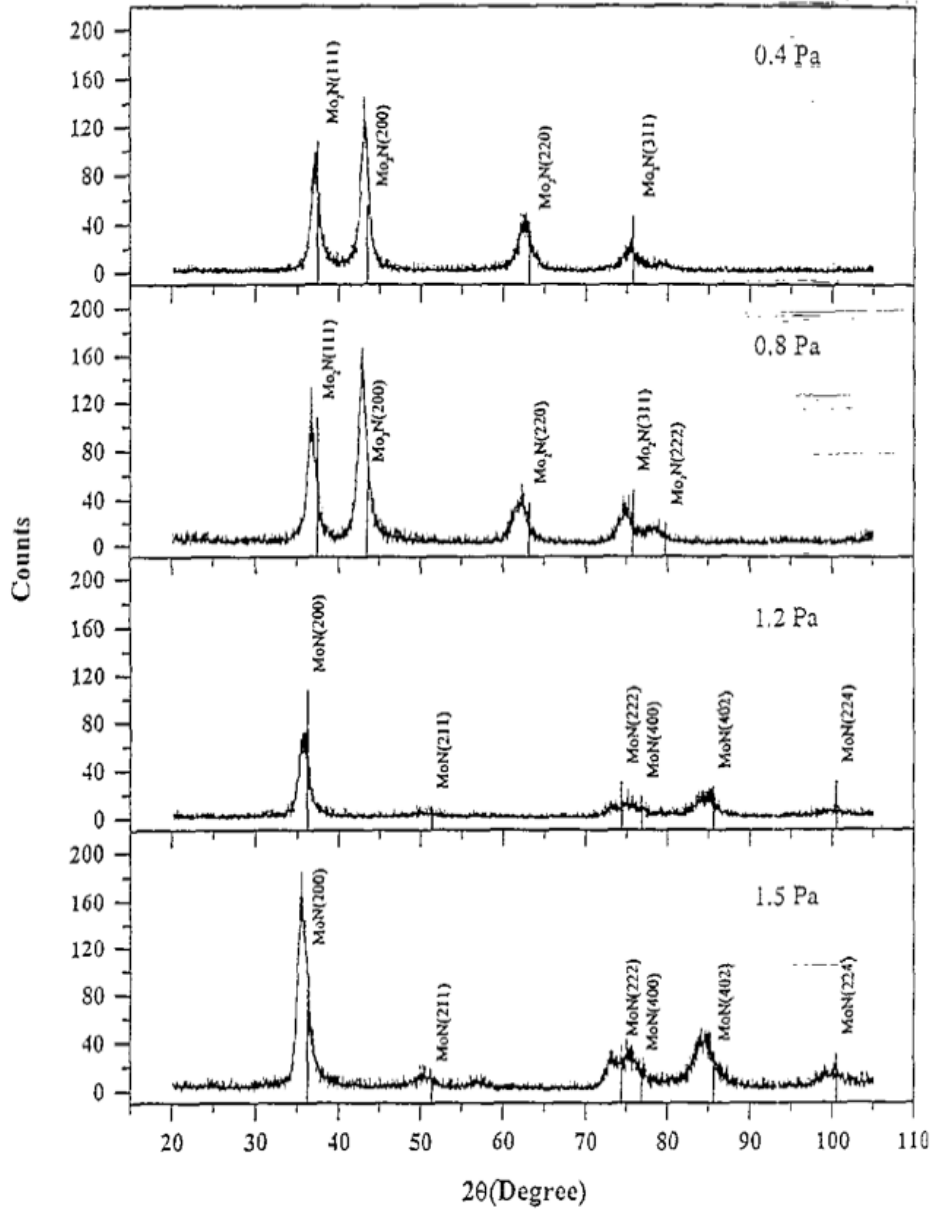
Molibden, HMK yapıdadır, alt nitrür fazları ise düzenli tetragonal yapıdadır.

Literatürde MoN kaplamaların tribolojik uygulamaları ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Ürgen ve grubu [33], yüksek hız çeliği altlık malzemeler üzerine katodik ark FBB yöntemini kullanarak MoN kaplamalar yapılmıştır. Sabit BIAS voltajı (-50 V) uygulanarak farklı azot basınç değerleri (0.4, 0.8, 1.2, 1.5 Pa) denenmiştir.

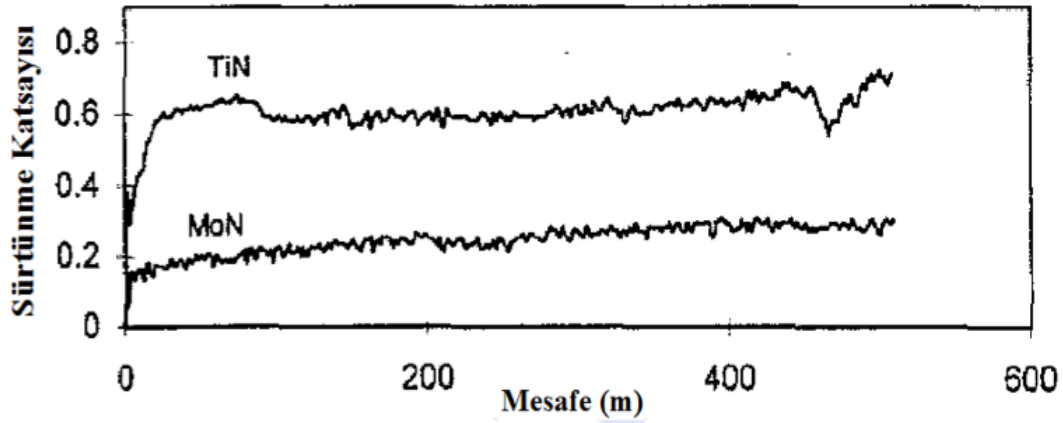


Şekil 4.7 : Mo-N ikili faz diyagramı [29].

Yapılan kaplamaların XRD faz analizleri yapılmış, sertlik değerleri ölçülmüş ve aşınma testleri uygulanmıştır. XRD analizi sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir. Analiz sonucunda 0.4 ve 0.8 Pa azot basıncı uygulanan numunelerde kübik $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ fazı, 1.2 ve 1.5 Pa uygulanan kaplamalarda hegzagonal $\delta\text{-MoN}$ fazı görülmüştür. Tahmin edildiği gibi azot basınç miktarı arttıkça azotça zengin faza dönüşüm gerçekleşmiştir. En düşük basınçta (0.4 Pa) kaplamanın sertliği 3306 HV çıkarken, en yüksek basınçta (1.5 Pa) sertlik 3928 HV’e yükselmiştir. Aşınma deneyleri 7 N ve 10 N yükler altında yağsız ortamda, alümina bilya ile disk üzeri bilya düzeneği kullanarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri aynı koşullarda karşılaştırma yapılabilmek adına TiN kaplamalı numunelere de uygulanmıştır. MoN (1.5 Pa basınç altında kaplanan) ve TiN kaplamalı numunelere 10 N yük altına uygulanan aşınma testi sonuçlarında elde edilen mesafeye bağlı sürtünme katsayısı grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir. Görüldüğü üzere MoN kaplamalı numunelerin sürtünme katsayısı, TiN kaplamalı numunelere göre 2-3 kat daha düşüktür.



Şekil 4.8 : Farklı azot basınç değerlerinde yapılan kaplamaların XRD paternleri [33].

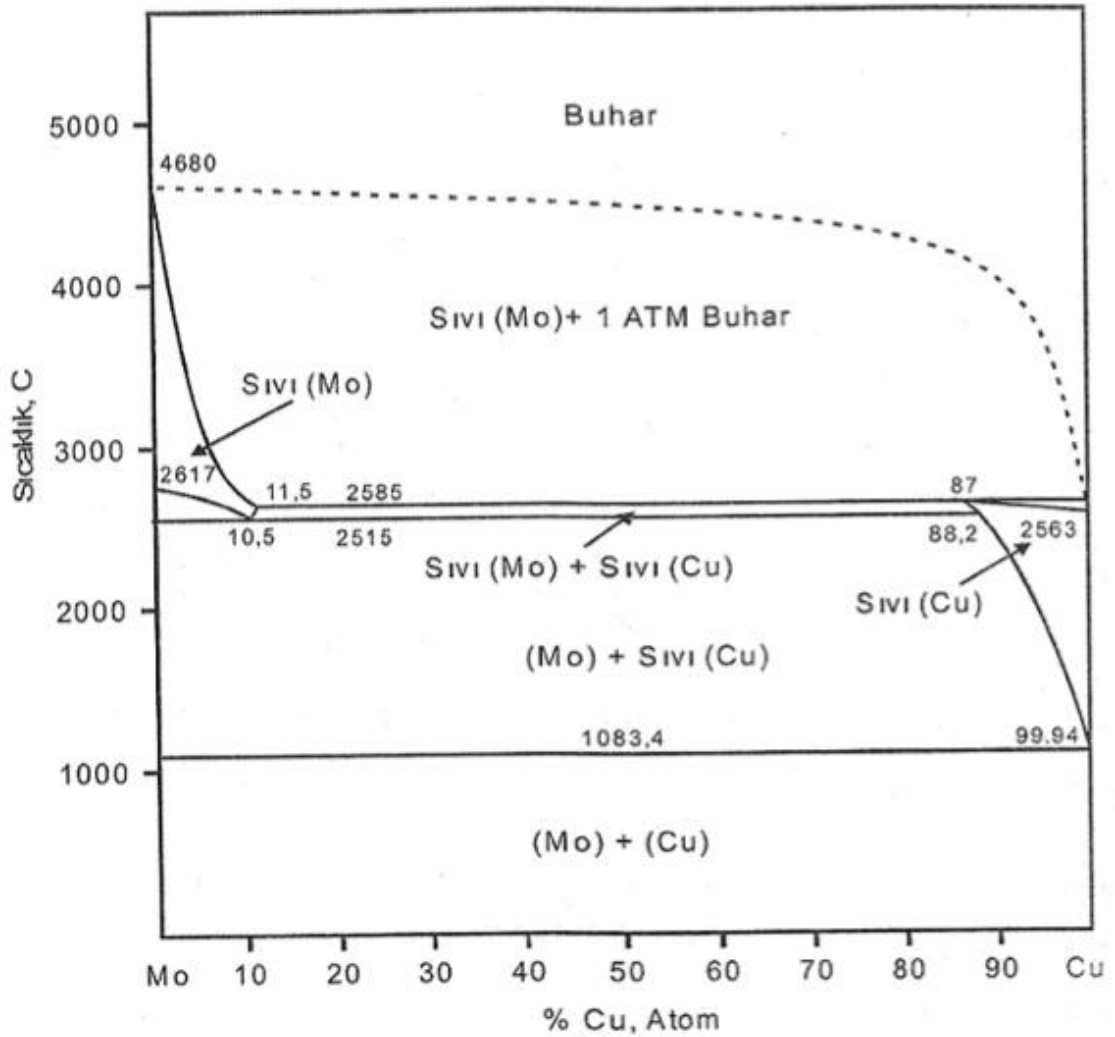


Şekil 4.9 : MoN ve TiN kaplamalı numunelere uygulanan aşınma testi sonucu [33].

4.2.2 Mo-Cu sistemi

Mo-Cu sistemine ait faz diyagramı Şekil 4.10'da verilmiştir. Molibden ve bakırın katı halde birbirleri içerisinde çözünürlükleri bulunmamaktadır. Yaklaşık 1083 °C'de molibdenin sıvı bakır içerisinde çözünürlüğü % 0.06 at.'dir, maksimum çözünürlüğü ise 2585 °C'de % 13 olmaktadır. Verilen faz diyagramında görülmemesine rağmen yapılan literatür incelemelerinde 900 °C'de molibdenin bakır içerisinde çok az bir çözünürlüğünün bulunduğu ve 950 °C'de bakırın molibden içerisinde %1.5 ağı. çözünürlüğünün olduğu bilinmektedir [34].

Molibden-bakır alaşımları genel olarak, düşük ısı iletkenlik, düşük ısı genleşme katsayısı, yüksek elektrik iletkenliği ve yüksek aşınma direnci gösterirler. Ayrıca düşük yoğunluğa sahip olmalarından dolayı havacılık ve uçak-uzay endüstrilerinde sıkça kullanılırlar. [26]



Şekil 4.10 : Mo-Cu ikili faz diyagramı [29].

4.2.3 Cu-N sistemi

Bakır ve azotun birbirleri içerisinde çözünürlükleri bulunmamakla birlikte yüksek enerjili sistemlerde (örneğin plazma destekli KBB) metastabil fazları mevcuttur. Cu-N sisteminde en bilinen faz Cu_3N , RF-FBB yöntemi ile kaplama üretimi mümkündür, fakat bu kaplamalar nanokristalin veya amorf yapıdadır. Oda sıcaklığında kararlı olan bu faz 300-350 °C sıcaklıklardan itibaren bozunmaya başlar. [35]

4.2.4 Mo-N-X (X: alaşım elementi) sistemi

Sert geçiş nitrür fazlarına, yumuşak faz katkılandırmaları yaparak üstün tribolojik özellikler elde etmek mümkündür. Literatür taraması yapıldığında molibden nitrür kaplamalara, Si, Al, Cu, Ag gibi katkılandırmaların yapıldığı çalışmalar rastlanmaktadır. [26]

Eryılmaz, doktora çalışmasında [30], molibden ve bakır katotları kullanarak farklı azot basınçlarında (0.2 ve 1.0 Pa) Mo-N-Cu hibrit kaplamalar elde etmiştir. Bakır katoda farklı akım değerleri (50, 70, 100 A) uygulanmıştır. Uygulanan azot basıncı değiştikçe kaplamada bulunan Cu oranı değişmiştir. XRD analizleri sonucunda 1 Pa azot basıncı uygulanan kaplamalarda hegzagonal $\delta\text{-MoN}$ fazı görülürken, 0.2 Pa azot basıncında gerçekleştirilen kaplamalarda kübik $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ fazına rastlanmıştır. 1 Pa azot basıncı kullanılarak yapılan kaplamalarda yapıya bakır girmesiyle XRD piklerinde genişleme ve tane boyutlarında küçülme ile birlikte kübik $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ fazının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. 0.2 Pa azot basıncında yapılan kaplamalarda ise yapıya bakır girmesiyle birlikte XRD pikleri yine genişlemiştir, fakat genişlemenin $\delta\text{-MoN}$ fazındaki kadar belirgin olmadığı görülmüştür. Kaplama sertlik değerinin belirli bir bakır miktarına kadar arttığı daha sonra düşmeye başladığı görülmüştür. Elde edilen en yüksek sertlik değeri olan $5657,7 \pm 148 \text{ kg/mm}^2$, % 3.04 at. bakır içeren $\delta\text{-MoN-Cu}$ kaplamasına aittir. $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ kaplamasında da en yüksek sertlik değeri % 3.26 at. bakır içeren $\gamma\text{-Mo}_2\text{N-Cu}$ kaplamasında elde edilmiştir (4470 kg/mm^2).

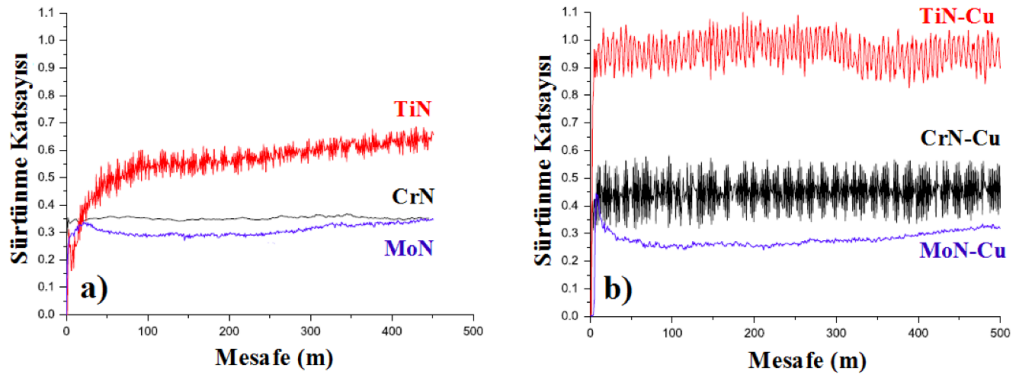
Ürgen ve çalışma grubu başka bir çalışmada [32], MoN, TiN ve CrN kaplamaların ve bu kaplamaların Cu katkılı hallerinin kaplama kalınlıklarını, sertliklerini ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Taban malzeme olarak sertleştirilmiş yüksek hız çeliği kullanılmıştır. Elde edilen kalınlık ve sertlik değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

MoN ve MoN-Cu kaplamaların kesit görüntüleri SEM’de (Scanning Electron Microscopy) incelendiğinde kaplamaya bakır girmesiyle kolonsol yapının ortadan kaybolduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1 : Kaplama kalınlık ve sertlik değerleri.

Kaplama	Cu (% at.)	Kalınlık (μm)	Sertlik (GPa)
MoN	-	2.5	37 ± 0.6
MoN-Cu	5.5	2.4	42 ± 0.7
TiN	-	2.5	32 ± 0.6
TiN-Cu	12.8	1.8	30 ± 0.6
CrN	-	3.0	28 ± 0.5
CrN-Cu	11.2	3.8	27 ± 0.5

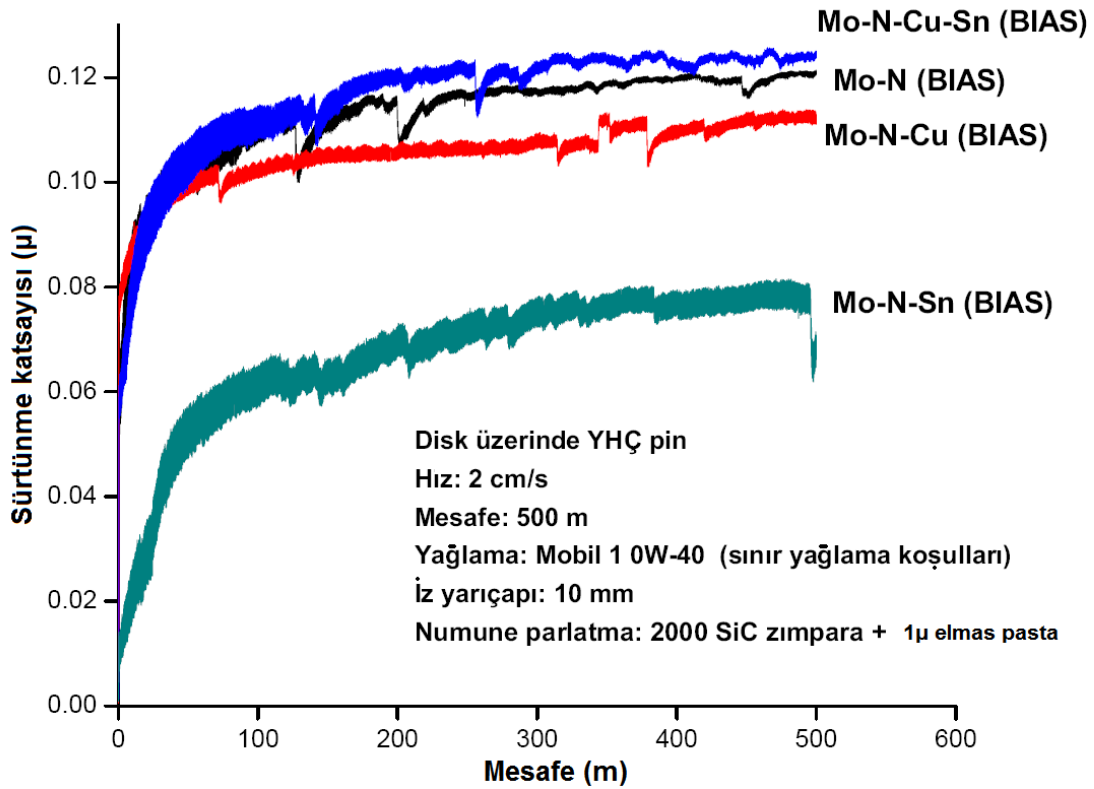
Aşınma testleri, 5N yük altına alümina top ($\varnothing 10$ mm) kullanarak 0.2 m/s dönme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. Görüldüğü üzere Cu ilavesi TiN kaplamaların sürtünme katsayısını arttırmış, CrN kaplamalarda fazla bir değişime yol açmamış, MoN kaplamaları ise sürtünme ve aşınma yönünden olumlu etkilemiştir.



Şekil 4.11 : Disk/bilya deneyi sonucunda sürtünme katsayısı değerleri [32].

Sezgin, yüksek lisans çalışmasında [26], Mo-N-Cu, Mo-N-Sn, Mo-N-Cu-Sn nanokompozit kaplamalar üretmiştir. Tüm kaplamalar AISI M2 kalite yüksek hız takım çeliği üzerine uygulanmıştır. Çalışmada farklı BIAS voltajının ve gaz basınçlarının kaplama üzerine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca manyetik sıçratma

yöntemiyle tek katot malzemesinin kullanılabilmesi için SPS yöntemiyle çeşitli hedef malzemeler (%90 Mo-%10 Cu, %90 Mo- %10 Sn, %90 Mo-% 10 bronz (%90 Cu-%10 Sn)) üretilmiştir. Daha sonra yapılan kaplamaların sertlik, SEM-EDS, XRD, GDOES analizleri yapılarak disk üzeri pin aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek sertlik değeri (2362 ± 53 HV) BIAS voltajı uygulanarak kaplanan %2,34 at. Cu içeren Mo-N-Cu kaplamada elde edilmiştir. XRD faz analizleri sonucunda bütün kaplamaların γ -Mo₂N fazına sahip olduğu gözlenmiştir. -100 V BIAS voltajı uygulanarak elde edilen kaplamaların aşınma deneyi sonucunda mesafeye bağlı elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 : Kaplamaların mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değerleri [26].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Taban Malzeme Analizleri

Kompresör yataklarında kullanılan dökme demir numunelerinin spektrometrik analizleri yapılmış ve metalografik incelemeler ile mikroyapı özellikleri belirlenmiştir.

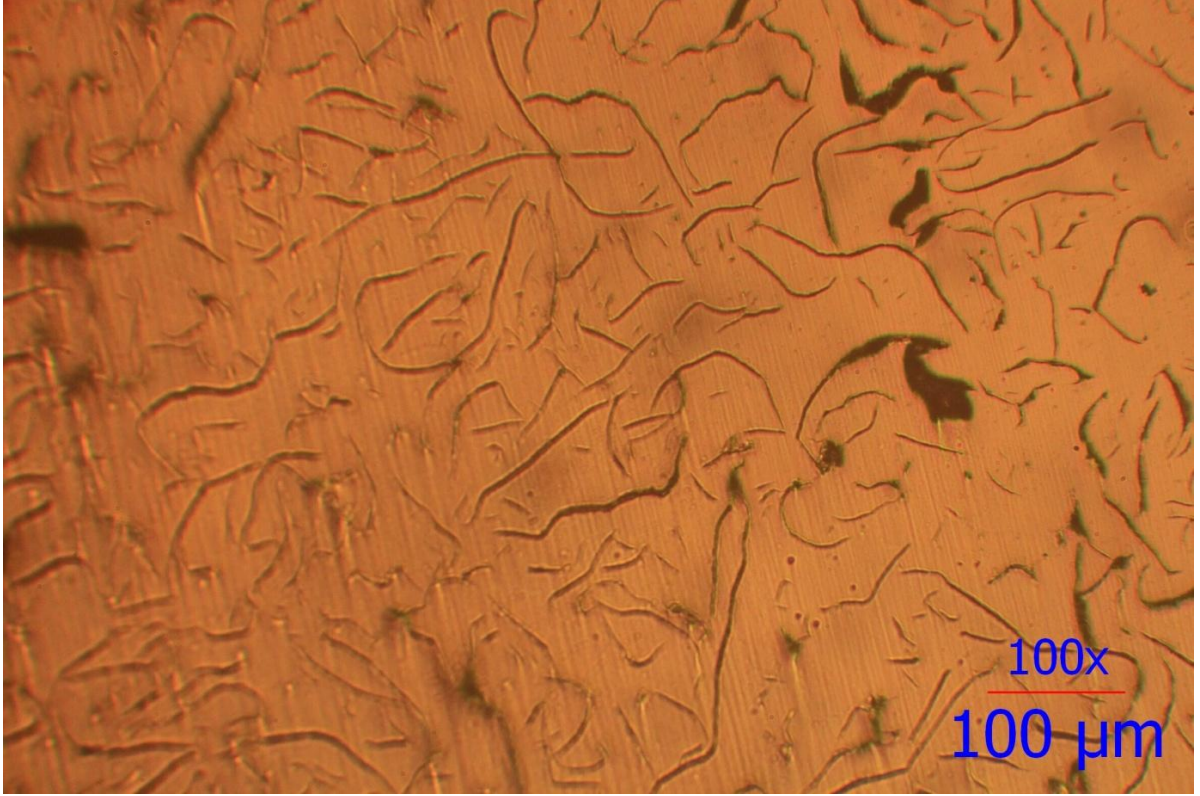
Kompresör yataklarında kullanılan dökme demir numunelerin kimyasal bileşimi, optik emisyon spektrometresi ile belirlenmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Sonuçlar; %3.41’lik C oranı da göz önüne alındığında gri dökme demir sınıfına uygundur.

Çizelge 5.1 : Kimyasal Bileşim.

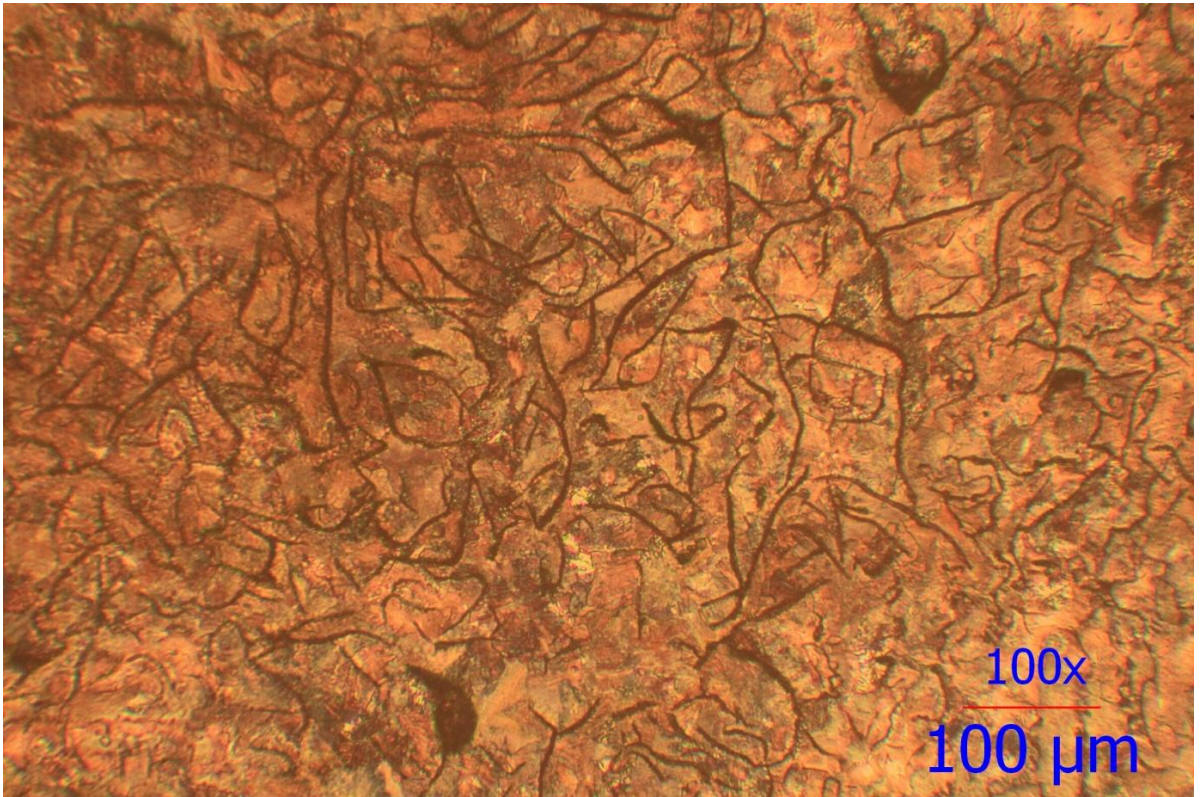
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al
Ortalama (% ağı.)	93.6	3.41	2.46	0.373	0.0588	<0.0030	0.0120	0.0023
	Co	Cu	Mg	Nb	Ti	V	Pb	Zr
Ortalama (% ağı.)	0.0051	0.0288	0.0015	0.0108	0.0153	0.0097	0.0128	0.0064

Numuneler sırasıyla 180, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400 numaralı disklerde zımparalanmış ve 9 µ'luk elmas süspansiyon ve parlatma keçesi kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numunenin dağlama öncesi mikroyapısına bakılmıştır ve Brinell sertliği 191 HB olarak ölçülmüştür. Şekil 5.1 incelendiğinde homojen dağılmış lamel grafitli dökme demir görülmektedir ve grafit yapısı incelendiğinde A-tipi lamel özelliği gösterdiği anlaşılmaktadır [36].

%5’lik nital (5 ml nitrik asit+95 ml etil alkol) ile 5 sn dağlama sonrası mikroyapısı Şekil 5.2’de verilmiştir. Lamel grafit yapıları arasında perlit yapısına ve az miktar ferritik yapıya rastlanmaktadır.



Şekil 5.1 : Dağlama öncesi parlatılmış numunenin mikroyapısı.

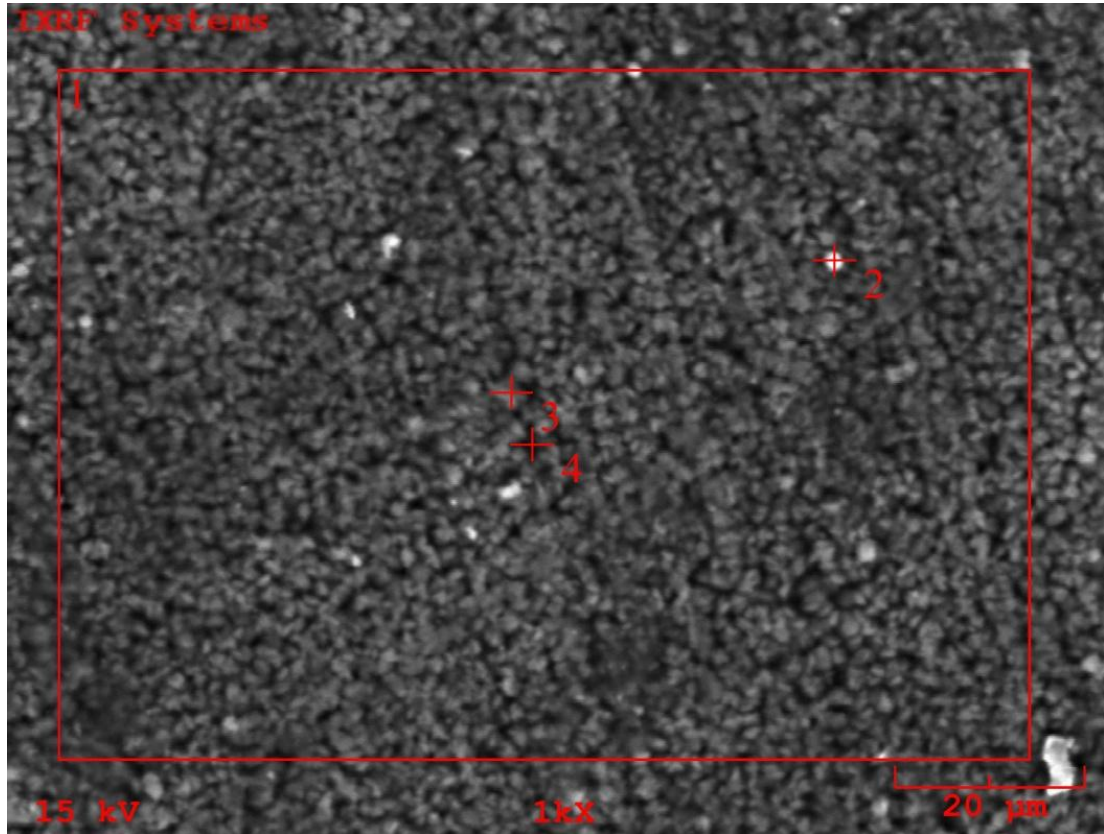


Şekil 5.2 : Dağlama sonrası mikroyapı (100X).

5.2 Mangan Fosfat Kaplama ve Karakterizasyonu

Taban malzeme analizleri tamamlanan dökme demir disk ve pim numuneleri Eskişehir Kompresör İşletmesi'nde orjinal krank millerinin kaplandığı aynı parametrelerle aynı hatta daldırma yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplama sonrası elde edilen kaplama kalınlığı 2-3 μm 'dur.

Elde edilen kaplamanın SEM görüntüsü Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekilde homojen olarak dağılmış mangan fosfat kristalleri görülmektedir. Görüntü üzerindeki 1 No'lu bölgeden alınan genel EDS analizi sonuçları ise Çizelge 5.2'de verilmiştir.



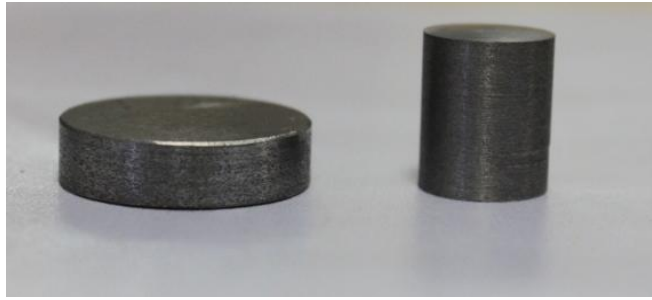
Şekil 5.3 : Mangan fosfat kaplanmış numunenin SEM görüntüsü (1000X).

Çizelge 5.2 : 1 No'lu bölgenin EDS analizi.

Element	Bileşim	Birim	
P	28.245	% ağı.	
Mn	42.880	% ağı.	
Fe	28.875	% ağı.	
	100.000	% ağı.	Toplam

5.3 Mo-N-Cu Kaplama ve Karakterizasyonu

MoN-Cu kaplamalar İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği-Yüzey Teknolojileri Laboratuvarı'nda katodik ark-FBB cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi kaplanan numuneler pim ve disk şeklinde dökme demir malzemelerdir. Kaplama öncesi yüzeyler zımparalanıp (R_a : $\sim 0.2 \mu m$), asetonla ultrasonik olarak temizlenmiştir. Kaplama sırasında kullanılan target malzemesi %90 Mo, %10 Cu içermektedir. Kaplama parametreleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.



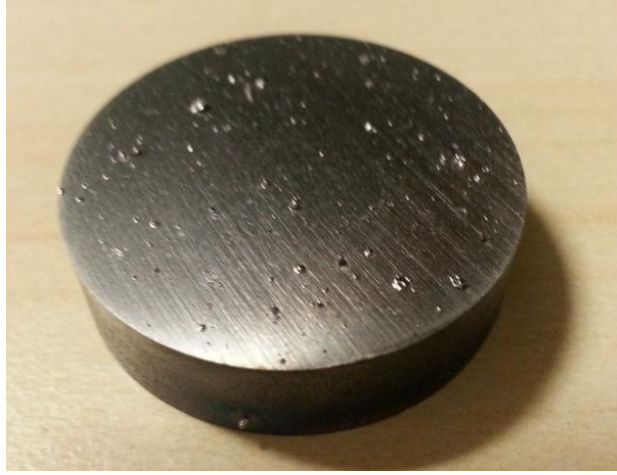
Şekil 5.4 : Dökme demir disk (solda) ve pim (sağda).

Çizelge 5.3 : Kaplama parametreleri.

Temizleme	• Taban basınç: 5×10^{-5} torr • Gaz akış hızı: 7 sccm Argon • Hedef malzeme: Mo-Cu katot • BİAS: - 1000 V • Katot akımı: 120 A • Süre: 3 dk
Kaplama	• Katot: Mo-Cu • Reaktif gaz: 35 sccm Azot • BİAS: -150 V • Katot akımı: 120 A • Sıcaklık: 700 °C • Süre: 20 dk

Katodik ark-FBB cihazlarında karşılaşılan en önemli sorun kaplama sonrası numune üzerinde oluşan damlacıklardır (droplet). Bu damlacıklar yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı için triboloji testleri öncesinde yüzeyler hafifçe 500 numaralı zımpara disk

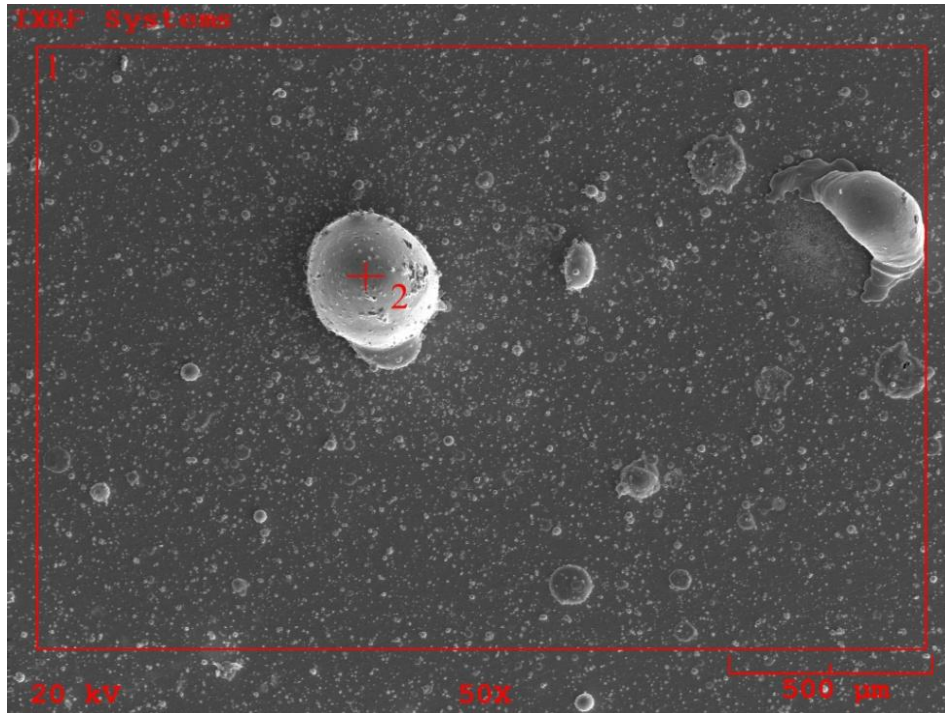
ile zımparalanmıştır. Kaplama sonrası disklerde görülen damlacıklar Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 : Kaplama sonrası droplet oluşumu.

Kaplama yüzeylerine SEM cihazında bakılıp, EDS alınarak ağırlıkça elementel yüzdeleri çıkarılmıştır. Zımpara öncesi SEM görüntüsü Şekil 5.6'da verilmiştir. Görüntü üzerindeki 1 ve 2 bölgelerinin EDS analiz sonuçları ise Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Zımpara sonrası kaplama kalınlığı yaklaşık 3-4 μm aralığındadır. Pim kesitinden alınan kalınlık ölçümünün SEM görüntüsü Şekil 5.7'de verilmiştir.



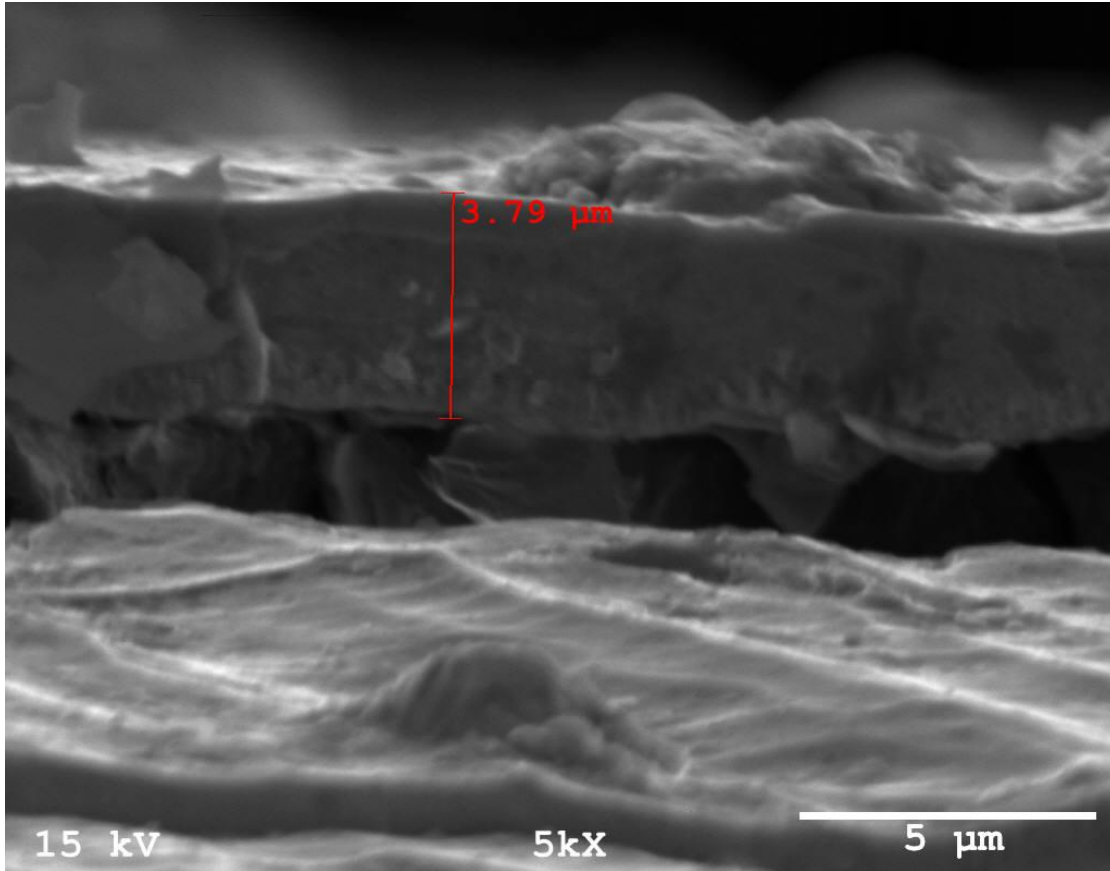
Şekil 5.6 : Zımpara öncesi MoN-Cu kaplama SEM görüntüsü (50X).

Çizelge 5.4 : 1 No'lu bölgenin EDS analiz sonucu.

Element	Bileşim	Birim
Fe	0.205	% ağı.
Cu	7.638	% ağı.
Mo	92.157	% ağı.
	100.000	% ağı.

Çizelge 5.5 : 2 No'lu bölgenin EDS analiz sonucu.

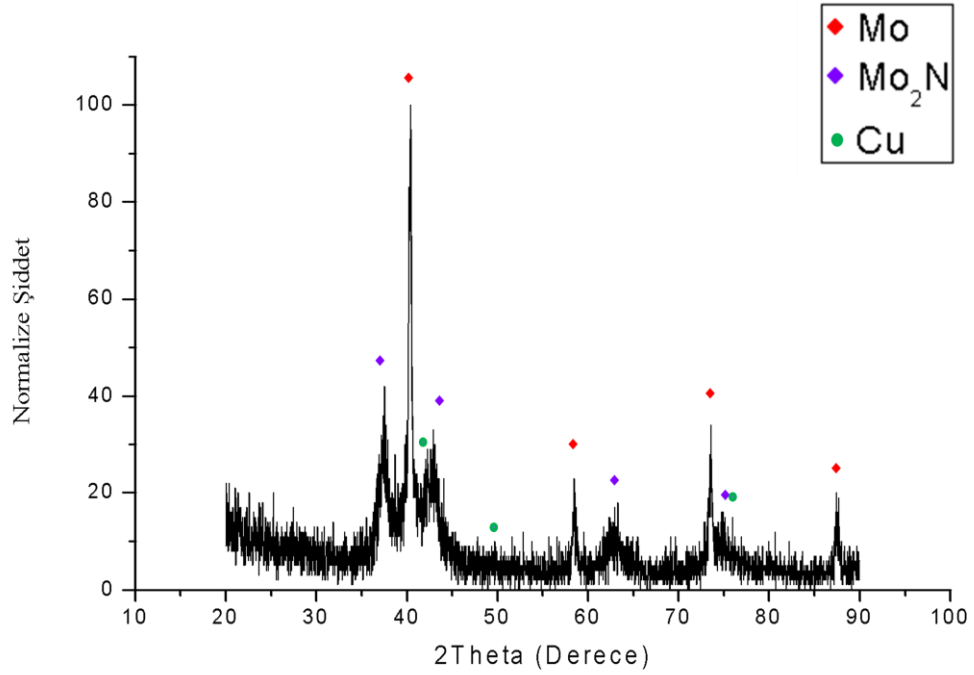
Element	Bileşim	Birim
Fe	0.663	% ağı.
Cu	2.088	% ağı.
Mo	97.249	% ağı.
	100.000	% ağı.



Şekil 5.7 : Pim kesitinden alınan kalınlık ölçümü (5000X).

Kaplama sertlikleri ölçülmüş ve yaklaşık 22283 N/mm² bulunmuştur.

MoN-Cu kaplamaların XRD faz analiz sonuçları ise Şekil 5.8’de verilmiştir. XRD paterninde Mo ve Mo₂N fazları gözlenmiştir. Mo pikleri kaplamanın dropletlerinden (damlacık) kaynaklanırken, asıl kaplama bölgesinde kübik Mo₂N fazının hakim olduğu söylenebilir. Cu ise nanoyapıda olduğundan dolayı XRD paterninde fazla ayırt edilememektedir.



Şekil 5.8 : MoN-Cu kaplamasına ait XRD paterni.

5.4 Triboloji Deneyleri

5.4.1 Stribeck eğrilerinin çıkarılması

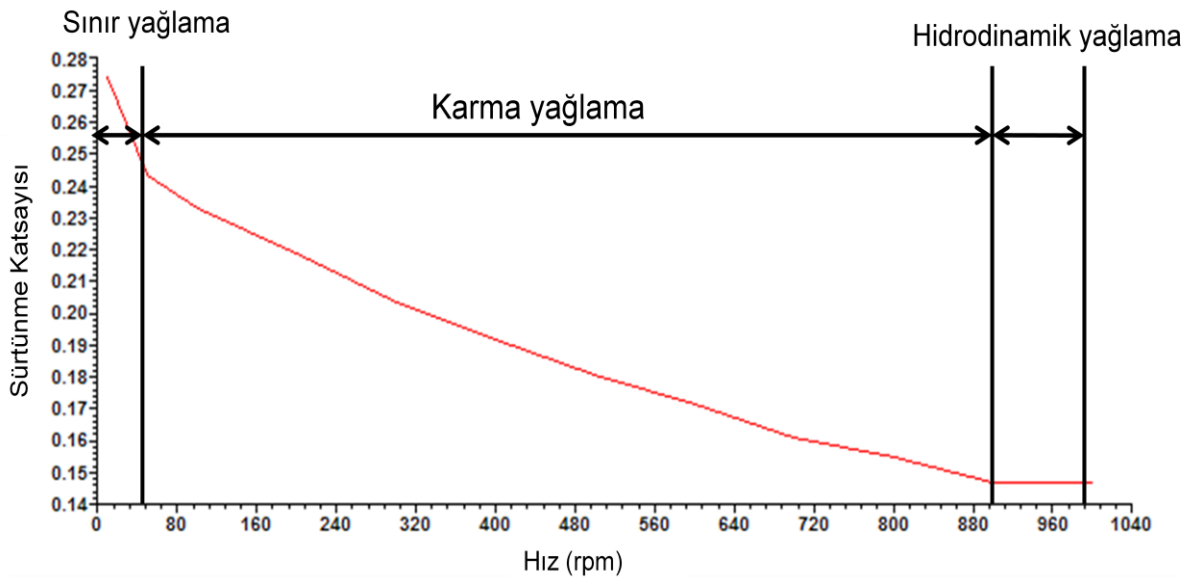
Triboloji deneyleri, UMT-Tribometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerin hepsi yağlı ortamda, ileri-geri (reciprocating) hareketi kullanılarak yapılmıştır (ASTM Designation: G133-95/Standart test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear).

İlk olarak dökme demir pim (Radius: 50 mm) ve dökme demir disk kullanarak, dökme demirlerin yağlama rejimleri Stribeck eğrileri çıkarılarak tespit edilmiştir. Bütün deneyler yağlı ortamda (RENISO WF5A), 80°C'de gerçekleştirilmiştir. Yağ özellikleri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Yağ özellikleri.

Yağ cinsi	Mineral yağ bazlı
Soğutkan uyumu	R600a (izobütan) ile uyumlu
Kinematik viskozite (40 °C)	5.00 mm ² /sn
Kinematik viskozite (100 °C):	1.7 mm ² /sn
Yoğunluk (15 °C)	827 kg/m ³
Katkılar	Aşınma önleyici katkılar Fosfor-korozyon inhibitörü Silisyum- köpük önleyici

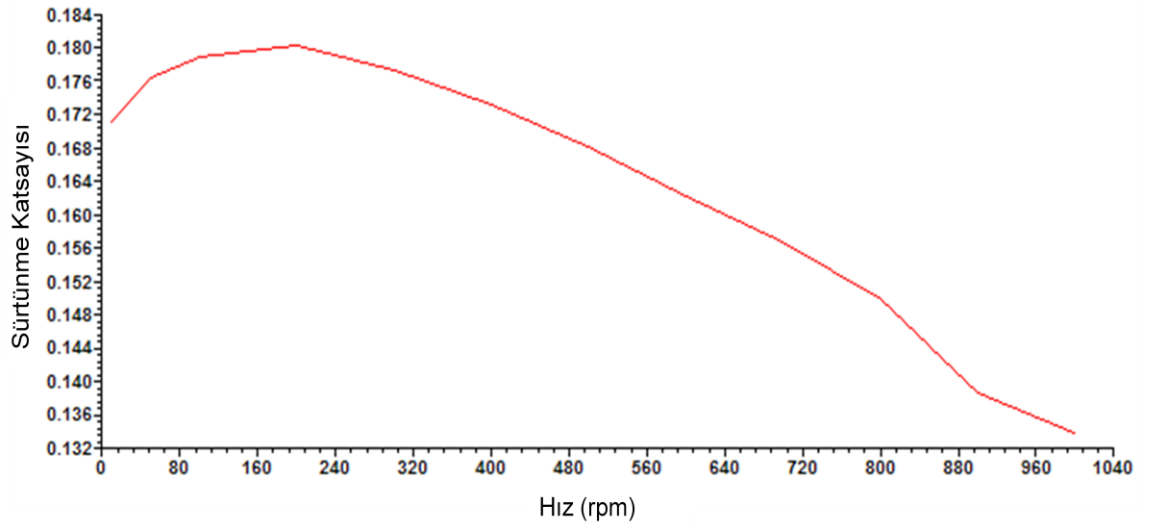
Dökme demir pim ve dökme demir disk kullanılarak çıkarılan Stribeck eğrisi Şekil 5.9'da verilmiştir. Stribeck parametresinde (Hız x Viskozite / Yük) değişken olarak "Hız" alınmıştır. Viskozite sabit kabul edilip, yük olarak deney boyunca 50 N uygulanmıştır. Pim ve disk geometrisinden yola çıkılarak yapılan hesaplarda Hertz Temas Basıncı 220 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılan dökme demir malzemesinin akma mukavemeti değerinden düşüktür. Deney başlangıç hızı; 1000 rpm olup, 20 sn'de bir hız düşürülmüştür. Uygulanan hızlar sırasıyla 1000, 900, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100, 50, 10 rpm'dir. Rpm olarak bahsedilen hızlar tribometre alt motorunun dönme hızı olup, bu hızlar disk ve pimplere ileri-geri lineer hareket olarak yansımaktadır. 1000 rpm alt motor hızı, numune üzerinde 0,166 m/sn lineer hızına denk gelmektedir.



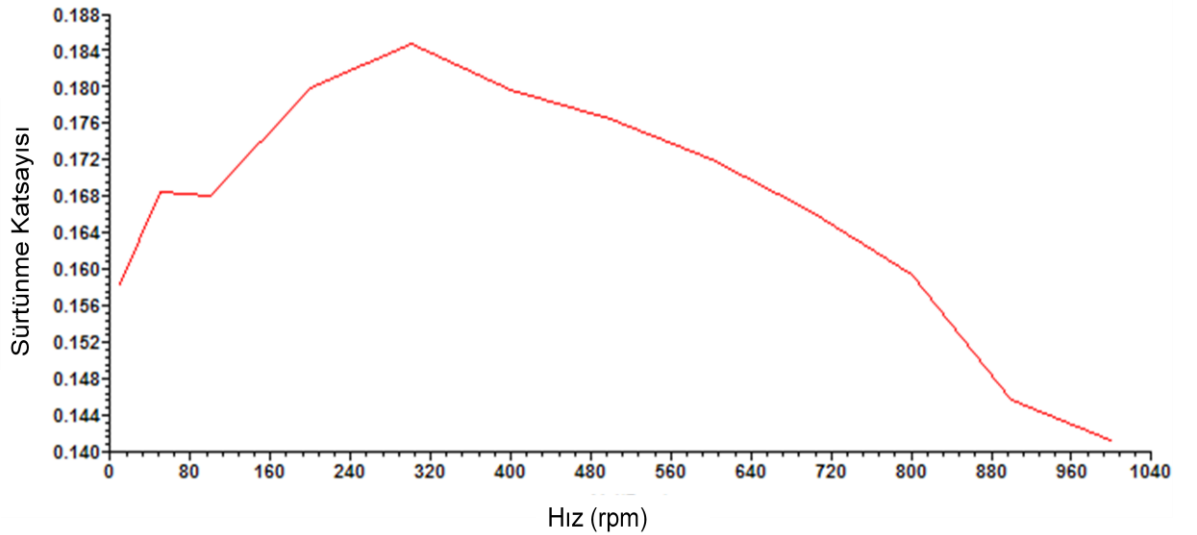
Şekil 5.9 : Dökme demir pim-dökme demir disk-Stribeck eğrisi.

Şekil 5.9'daki grafik incelendiğinde, yaklaşık 1000 rpm-900 rpm arasında hidrodinamik yağlama koşullarının, 900 rpm-80 rpm arasında karma yağlama koşullarının, 80 rpm-10 rpm aralığında ise sınır yağlama koşullarının etkin olduğu görülmektedir.

Aynı deney parametreleri (Yük:50 N, Sıcaklık: 80°C, Ortam: Yağlı) MnP kaplamalı pim- kaplamasız disk ve MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk için de uygulanmıştır. MnP kaplamalı pim ve kaplamasız disk için elde edilen Stribeck eğrisi Şekil 5.10'da verilmiştir. MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk için elde edilen Stribeck eğrisi ise Şekil 5.11'de verilmiştir.

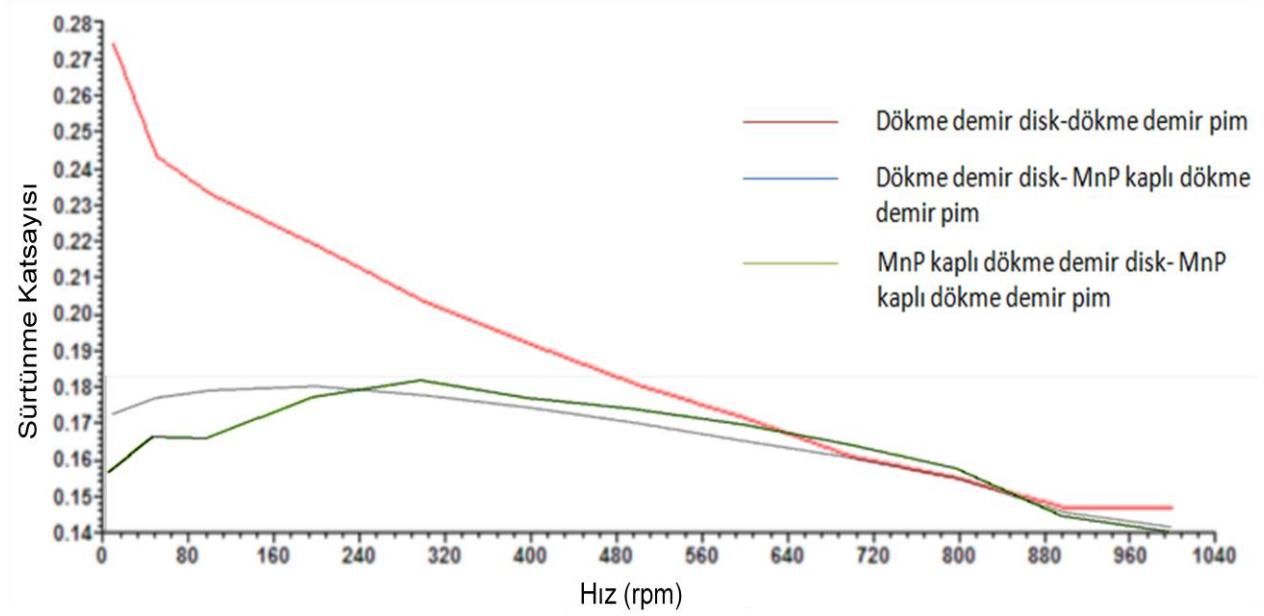


Şekil 5.10 : MnP kaplamalı pim-kaplamasız disk-Stribeck eğrisi.



Şekil 5.11 : MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk-Stribeck eğrisi.

Elde edilen üç sonuç üst üste bindirildiğinde Şekil 5.12'de verilen grafik elde edilmiştir. Karşılaştırmalı bakıldığında MnP kaplamanın sınır koşullarında, sürtünme katsayısına pozitif etkisi görülmüştür. Hem pim hem de disk MnP kaplamalı olduğunda ise sınır koşullarında sürtünme katsayısı daha da düşmüştür. Mevcut kompresör yataklarında tek taraf MnP kaplamalı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5.12 : Karşılaştırmalı Stribeck eğrileri.

5.4.2 Uzun deneyler (24 saat) ile sürtünme katsayılarının belirlenmesi

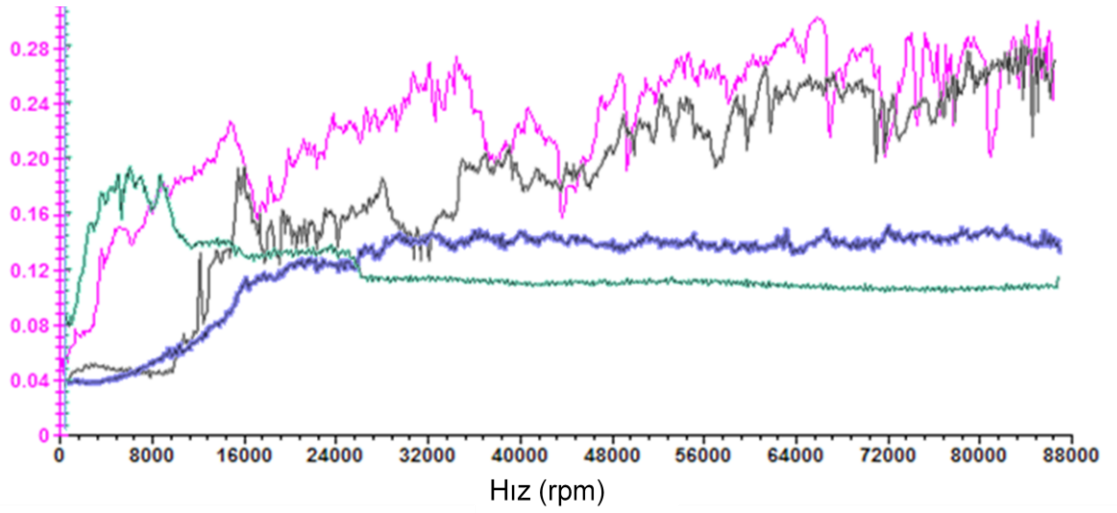
Stribeck eğrileri çıkarıldıktan sonra, 24 saatlik uzun aşınma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sınır koşullarından seçilen sabit bir hızda (40 rpm:0,006 m/sn) yağlı ortamda 80°C'de gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük 50 N olup, Hertz Temas Basıncı 220 MPa'dır.

Deneylerde; sınır yağlama rejiminde 24 saat boyunca sürtünme katsayısında meydana gelen değişimin ölçülmesi amaçlanmıştır. Deney setleri üçer kere tekrarlanmıştır.

Karşılaştırmalı 24 saatlik aşınma deneyleri Şekil 5.13'te verilmiştir. Sınır yağlama koşullarında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7'de görüldüğü üzere deneyler arasında en düşük sürtünme katsayısı (0.11) MoN-Cu kaplamalı pim/ kaplamasız disk çiftinde gözlenmiştir.

Sürtünme
Katsayısı



- Dökme demir pim-Dökme demir disk
- MnP kaplamalı dökme demir pim-Dökme demir disk
- MnP kaplamalı dökme demir pim-MnP kaplamalı dökme demir disk
- MoN-Cu kaplamalı dökme demir pim-Dökme demir disk

Şekil 5.13 : Karşılaştırmalı 24 saatlik aşınma deneyleri.

Çizelge 5.7 : 24 saatlik aşınma deneyi sonrasında ortalama sürtünme katsayıları.

Pim	Disk	Ortalama Sürtünme Katsayısı (COF)
Dökme demir	Dökme demir	0,24
MnP kaplamalı dökme demir	Dökme demir	0,20
MnP kaplamalı dökme demir	MnP kaplamalı dökme demir	0,14
MoN-Cu kaplamalı dökme demir	Dökme demir	0,11

5.4.3 Süreye bağlı aşınma miktarlarının belirlenmesi

Süreye bağlı aşınma miktarlarının değişimini saptamak amacıyla 24 saatlik uzun deneyler, aynı yük ve sıcaklık parametreleri ile alt sürelerle bölünerek (3 saat- 6 saat- 12 saat ve 24 saat) tekrarlanmıştır. Bu deneyde MoN-Cu kaplamalı dökme demir pim

ve kaplamasız dökme demir disk kullanılmıştır. Her bir zaman aşamasındaki aşınma miktarları optik profilometre cihazı ile analiz edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, diskte ve pimde meydana gelen aşınmanın zamana bağlı olarak nasıl bir artma eğilimi gösterdiğini belirlemektir.

5.5 Aşınma Sonrası Yüzey Analizleri

5.5.1 Uzun deney (24 saat) sonrası yüzey profil analizleri

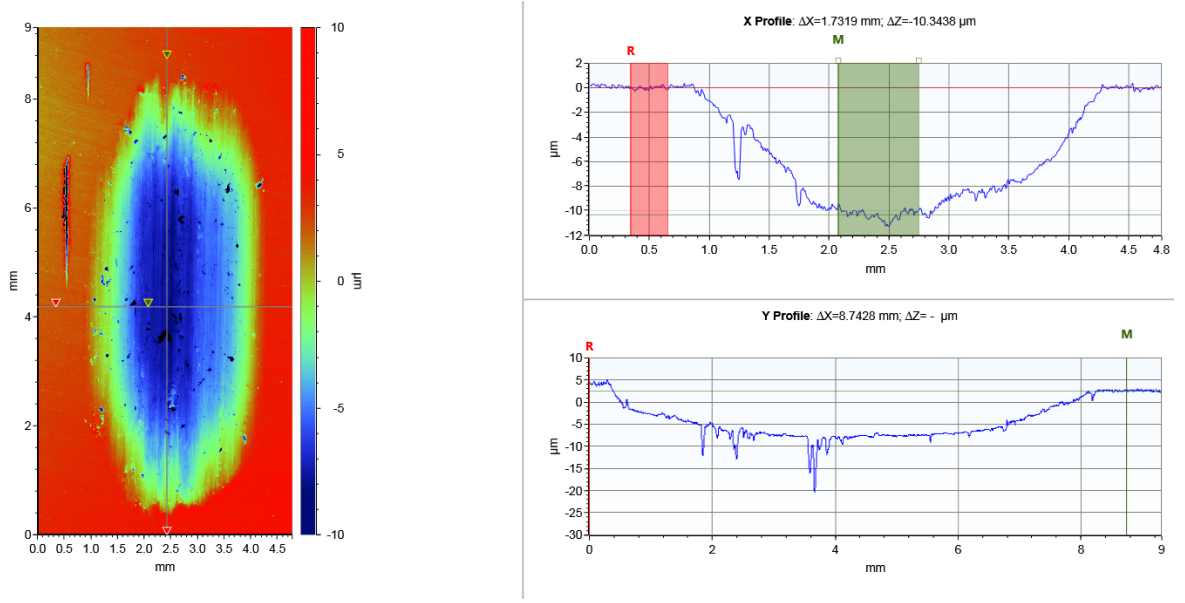
Yapılan 24 saatlik aşınma deneyleri sonrasında disklerde oluşan aşınma derinliği ve pimlerde oluşan iz çapları ARÇELİK A.Ş’de bulunan Şekil 5.14’te görülen BRUKER-ContourGT marka optik profilometre yardımıyla karakterize edilmiştir.



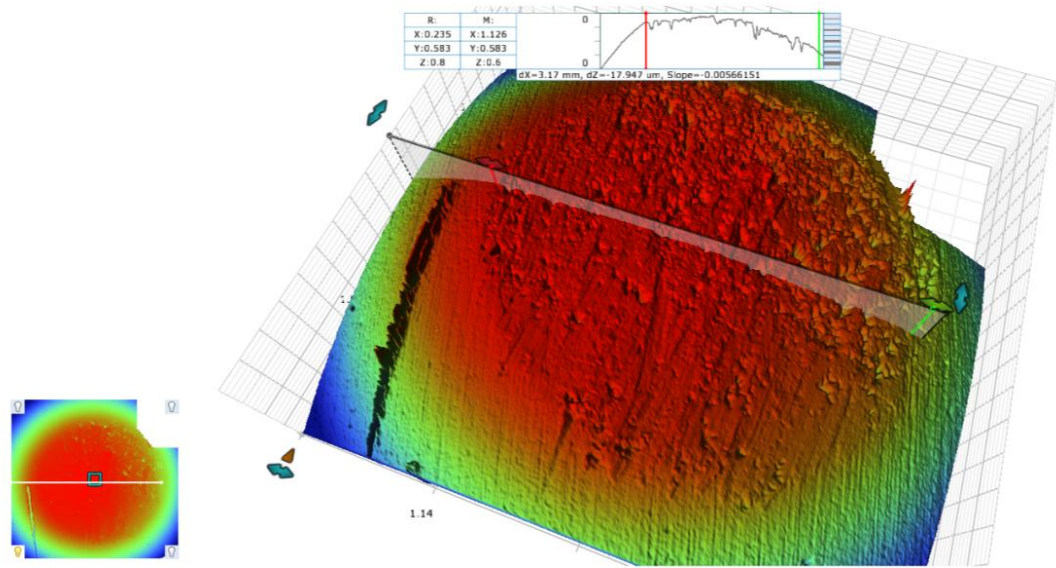
Şekil 5.14 : BRUKER ContourGT model optik profilometre.

Dökme demir pim, dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk ve pim aşınma profilleri sırasıyla Şekil 5.15’te ve Şekil 5.16’da verilmiştir.

Diskte oluşan aşınma derinliği 10.34 μm , pim aşınma iz çapı ise 3.17 mm çıkmıştır.

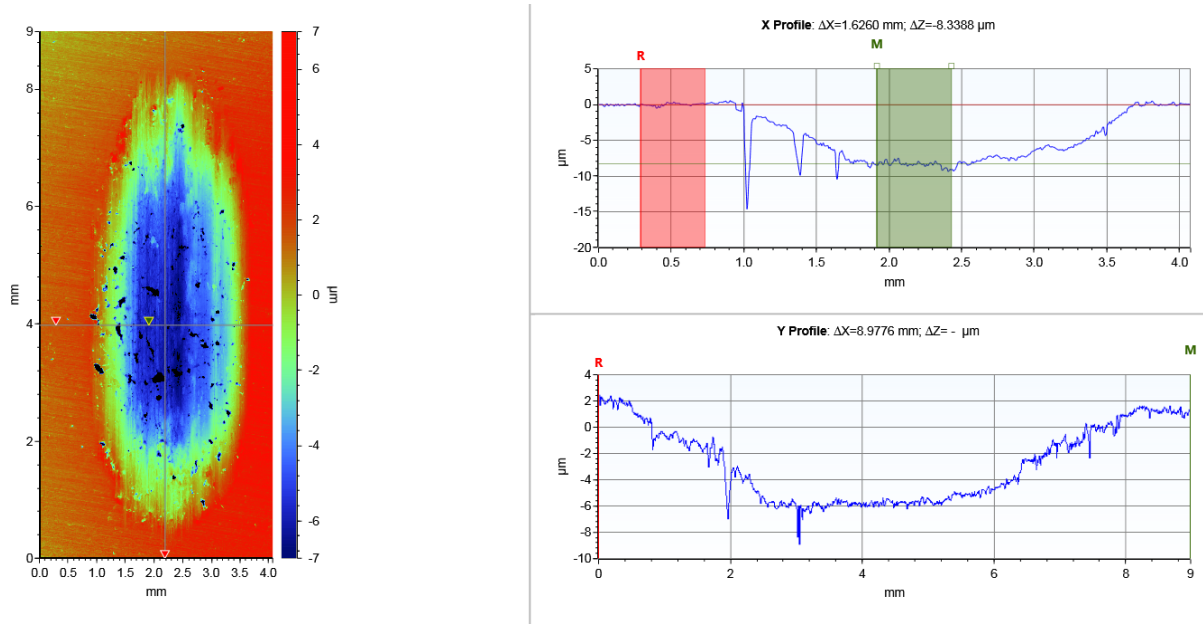


Şekil 5.15 : Dökme demir pim-dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu).

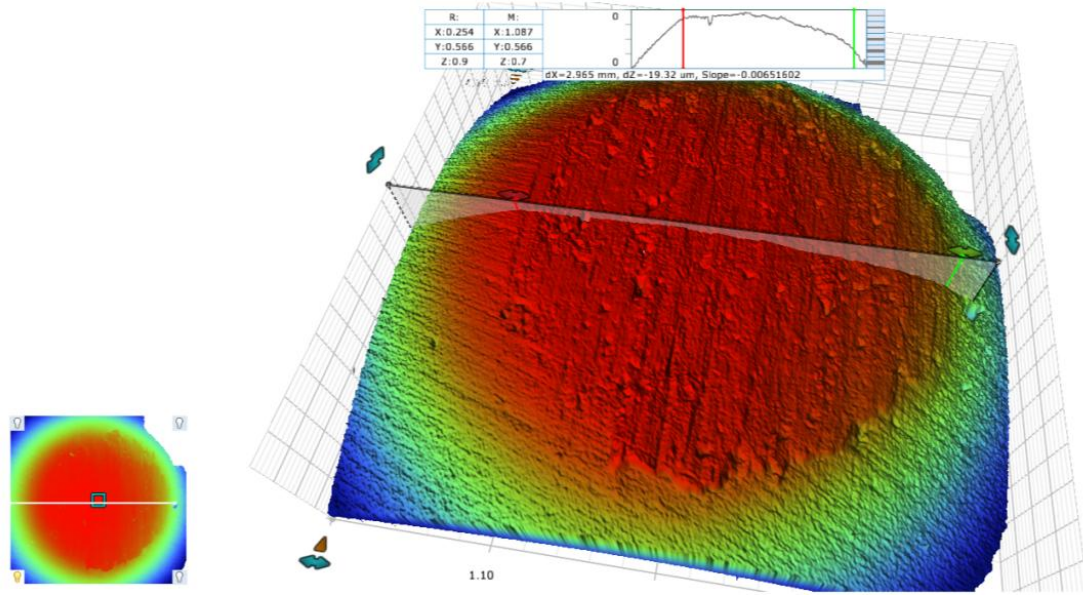


Şekil 5.16 : Dökme demir pim-dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).

MnP kaplamalı dökme demir pim ve kaplamasız dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk ve pim aşınma profilleri sırasıyla Şekil 5.17'de ve Şekil 5.18'de verilmiştir. Diskte oluşan aşınma derinliği 8.34 μm, pim aşınma iz çapı ise 2.96 mm çıkmıştır.

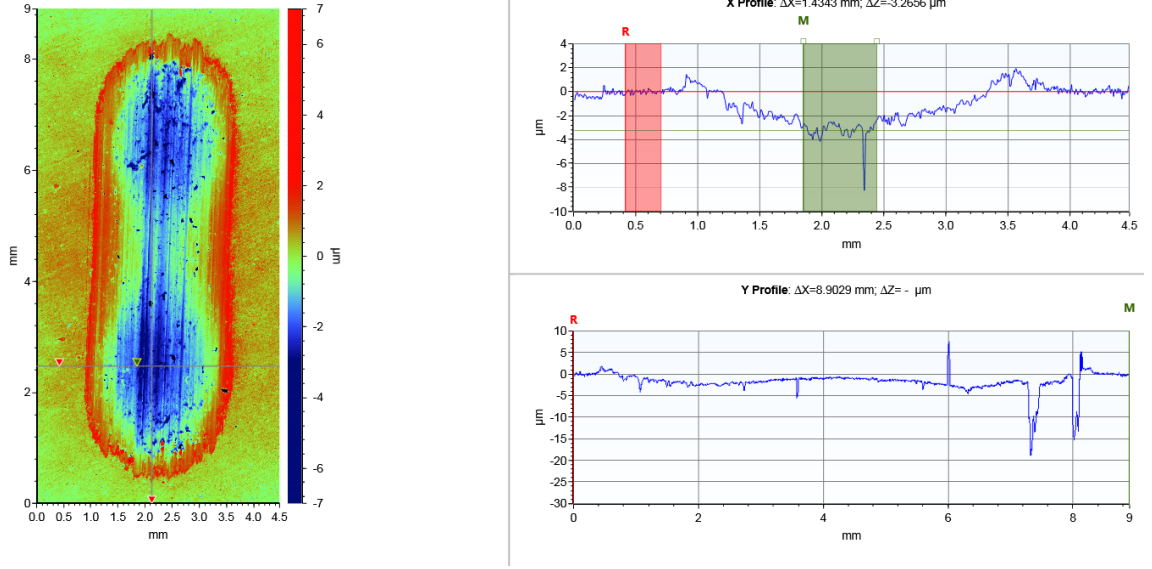


Şekil 5.17 : MnP kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu).

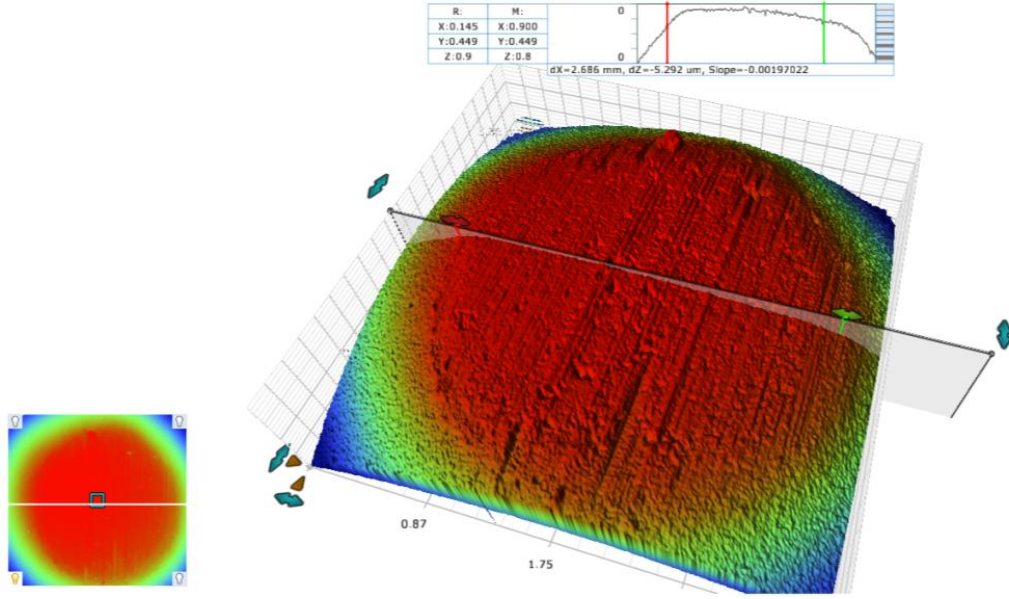


Şekil 5.18 : MnP kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).

MnP kaplamalı dökme demir pim ve MnP kaplamalı dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk ve pim aşınma profilleri sırasıyla Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de verilmiştir. Diskte oluşan aşınma derinliği 3.26 μm , pim aşınma iz çapı ise 2.68 mm çıkmıştır.

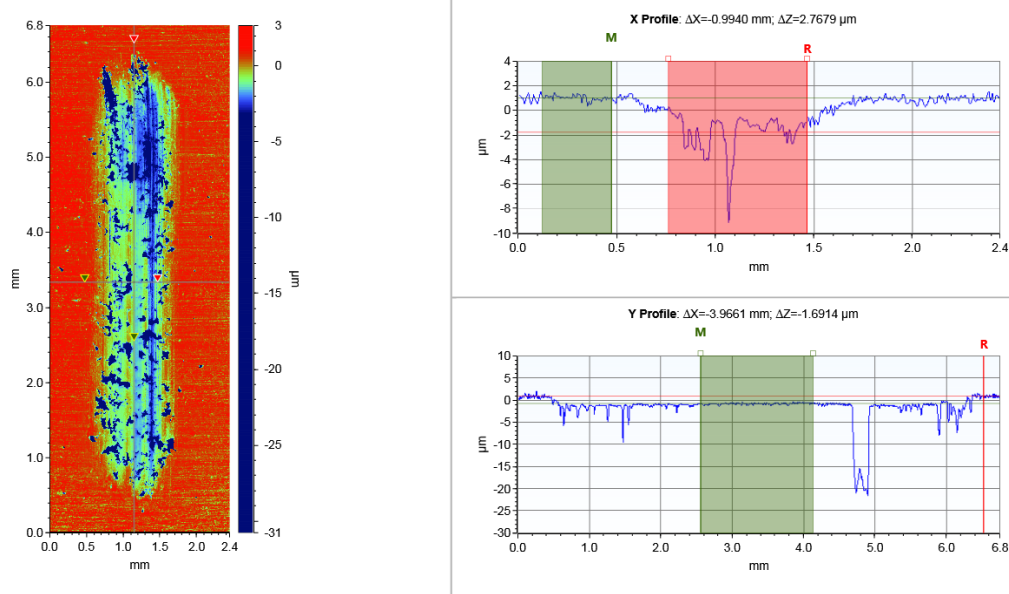


Şekil 5.19 : MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu).

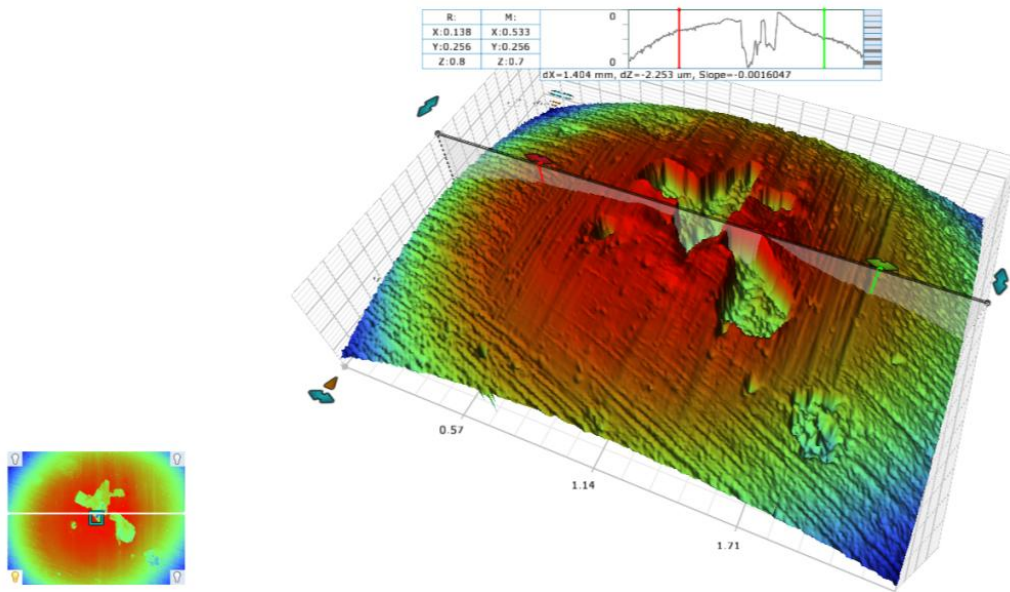


Şekil 5.20 : MnP kaplamalı pim-MnP kaplamalı disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).

MoN-Cu kaplamalı dökme demir pim ve kaplamasız dökme demir disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk ve pim aşınma profilleri sırasıyla Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de verilmiştir. Diskte oluşan aşınma derinliği 2.76 μm, pim aşınma iz çapı ise 1.40 mm çıkmıştır.



Şekil 5.21 : MoN-Cu kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen disk aşınma profili (2 boyutlu).



Şekil 5.22 : MoN-Cu kaplamalı pim-kaplamasız disk kullanılarak yapılan 24 saatlik aşınma deneyi sonucunda elde edilen pim aşınma profili (3 boyutlu).

24 saatlik aşınma deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayıları, diskte oluşan aşınma miktarı ve pim iz çapı değerleri Çizelge 5.8'de toplanmıştır. En düşük sürtünme katsayısının (0.11) görüldüğü MoN-Cu kaplamalı pim/ kaplamasız disk tribo-çiftinde disk aşınma derinliği (2.76 μm) ve pim iz çapı (1.40 mm) değerleri de en düşük çıkmıştır.

Çizelge 5.8 : 24 saatlik aşınma deneyi sonrasında elde edilen ortalama sürtünme katsayıları, diskte ve pimde oluşan aşınma miktarları.

Pim	Disk	Sürtünme katsayısı	Disk aşınma derinliği (µm)	Pim iz çapı (mm)
Dökme demir	Dökme demir	0.24	10.34	3.17
MnP kaplamalı dökme demir	Dökme demir	0.20	8.34	2.96
MnP kaplamalı dökme demir	MnP kaplamalı dökme demir	0.14	3.26	2.68
MoN-Cu kaplamalı dökme demir	Dökme demir	0.11	2.76	1.40

Optik profilometre analizleri sonrasında aşınma sonrası izlerde meydana gelen kayıp hacim miktarı ve özgül aşınma hızı katsayısı pim aşınma izleri üzerinden hesaplanmıştır ve hesaplanan değerler Çizelge 5.9'da verilmiştir. Özgül aşınma hızı katsayısı için kullanılan formül (Archard, 1953);

$$V = k \times F \times s \quad (5.1)$$

V: Kayıp hacim (m³)

k: Özgül aşınma hızı katsayısı (m³/Nm)

F: Uygulanan kuvvet (N)

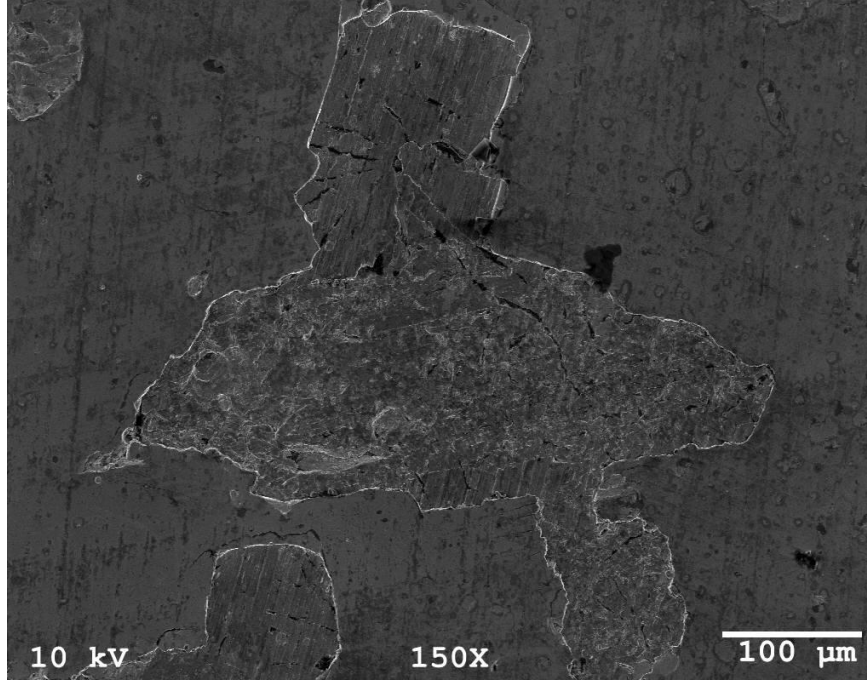
s: kayma mesafesi (m)

Çizelge 5.9 : Aşınma sonrası pimdeki kayıp hacim ve özgül aşınma hızı katsayısı.

Tribo-çift	Pimdeki kayıp hacim (mm ³)	Özgül aşınma hızı katsayısı (10 ⁻¹⁵ m ³ /Nm)
DD-DD	0.098	3.78
MnP-DD	0.075	2.89
MnP-MnP	0.050	1.92
MoN-Cu-DD	0.004	0.15

5.5.2 Uzun deney (24 saat) sonrası SEM analizleri

Yüzey profil analizleri sonucunda en düşük aşınma değerleri elde edilen MoN-Cu kaplamalı pim/kaplamasız disk tribo-çiftinin SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Aşınma izi bölgesinden alınan MoN-Cu kaplamalı pimin SEM görüntüsü Şekil 5.23'te verilmiştir, EDS analizi sonucu ise Çizelge 5.10'da verilmiştir.



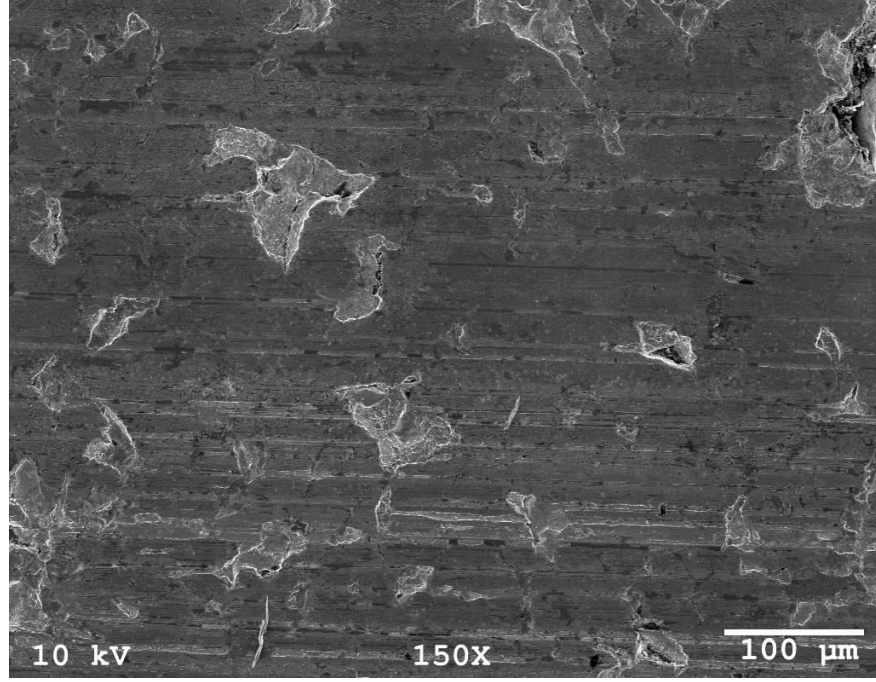
Şekil 5.23 : Aşınma sonrası MoN-Cu kaplamalı pim SEM görüntüsü (150X).

Çizelge 5.10 : Aşınma sonrası MoN-Cu kaplamalı pimin EDS analizi.

Element.	Bileşim	Birim	
Si	3.148	% ağı.	
Fe	80.180	% ağı.	
Cu	8.542	% ağı.	
Mo	8.129	% ağı.	
	100.000	% ağı.	Toplam

Aşınma izi bölgesinden alınan kaplamasız diskin SEM görüntüsü Şekil 5.24'te verilmiştir, EDS analizi sonucu ise Çizelge 5.1'de verilmiştir. Kaplanmasız diskte

karşı tribo-çiftten gelen Mo ve Cu elementlerine ve oksijene rastlanmıştır. EDS analizleri değerlendirildiğinde aşınma testi sırasında katı yağlayıcılık görevi gören Mo oksitlerinin oluştuğu öngörülmektedir. Erdemir'in ortaya koyduğu bu kristal kimyası yaklaşımına göre, oksitler kristal kimyası yaklaşımı ile incelendiğinde MoO₃'ün en iyi katı yağlayıcı özellik gösteren oksitlerden biri olduğu görülmektedir [37, 38].



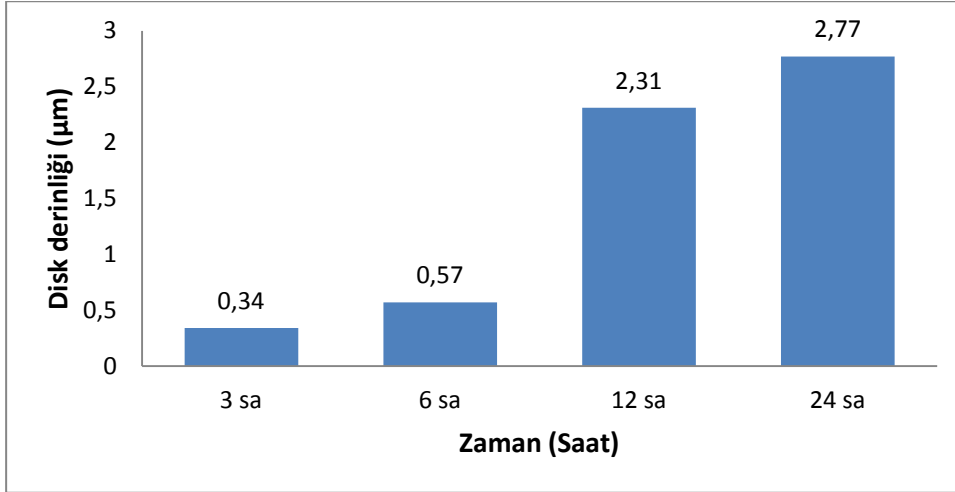
Şekil 5.24 : Aşınma sonrası kaplamasız disk SEM görüntüsü (150X).

Çizelge 5.11 : Aşınma sonrası kaplamasız disk EDS analizi.

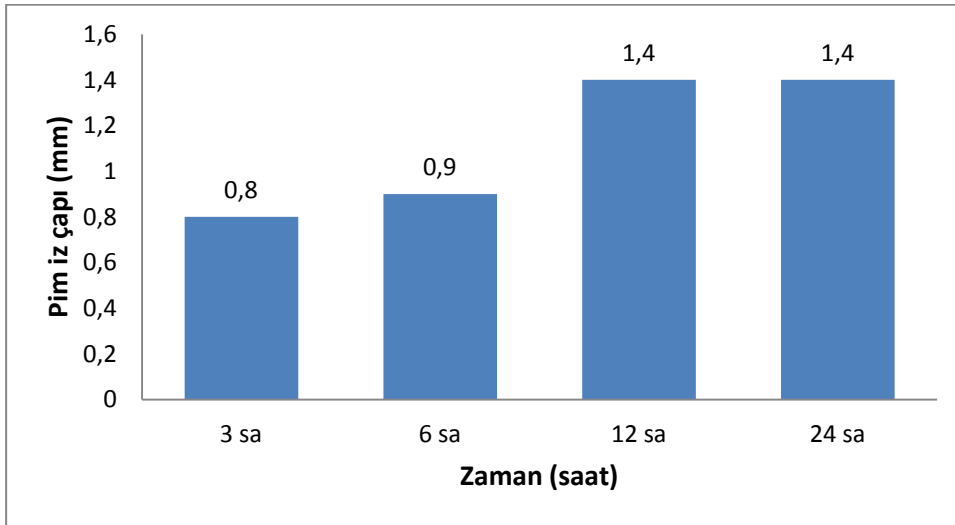
Element.	Bileşim	Birim	
O	6.913	% ağı.	
Si	2.889	% ağı.	
Fe	79.174	% ağı.	
Cu	8.053	% ağı.	
Mo	2.97	% ağı.	
	100.000	% ağı.	Toplam

5.5.3 Süreye bağlı aşınma testlerinin analizleri

Süreye bağlı aşınma miktarlarının değişimini saptamak amacıyla aynı yük ve sıcaklık parametreleri ile alt süreler bölünerek (3 saat- 6 saat- 12 saat- 24 saat) tekrarlanan aşınma deneyi sonucunda elde edilen kaplamasız disteki aşınma derinliği ve MoN-Cu kaplamasız pimdeki iz çapı değerleri Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da verilmiştir.



Şekil 5.25 : Zamana bağlı olarak kaplamasız diskte meydana gelen aşınma derinliği.



Şekil 5.26 : Zamana bağlı MoN-Cu kaplamalı pimde meydana gelen iz çapı değerleri.

Görüldüğü üzere, kaplamasız diskte meydana gelen aşınma derinliği zamana bağlı olarak azalarak artmakta iken, MoN-Cu kaplamalı pimde ise 12 saat sonunda aşınmanın stabil hale geldiği söylenebilir.

6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

1. Çalışmanın ilk aşamasında mangan fosfat kaplamalı dökme demir taban malzemelerin pim-disk aşınma testleri yapılmıştır. Stribeck eğrileri çıkarılarak hidrodinamik, karma ve sınır yağlama rejimleri tespit edilmiştir. En ağır aşınma, sınır koşullarında gerçekleştiği için bu rejimden bir hız seçip, uzun süreli (24 saat) sabit hız deneyleri yapılarak, sürtünme katsayısı değerleri bulunmuştur. En yüksek sürtünme katsayısı (0.24), hem diskin hem pimin kaplamasız olduğu numunelerde görülmüştür. Diskte meydana gelen aşınma derinliği 10.34 μm , pimde meydana gelen iz çapı ise 3.17 mm'dir. En düşük sürtünme katsayısı (0.14) ve aşınma derinliği, hem pimin hem diskin mangan fosfat kaplamalı olduğu dökme demir malzemelerde görülmüştür. Bu deneyde ise diskte meydana gelen aşınma derinliği 3.26 μm , pimde meydana gelen iz çapı ise 2.68 mm'dir.
2. Dökme demir disk ve pim malzemeleri katodik FBB yöntemi ile, tek katot (%90 Mo-%10 Cu) kullanarak azot atmosferinde kaplanmış, MoN-Cu nanokompozit kaplamaları elde edilmiştir. Droplet (damlacık) giderme zımparasından sonra elde edilen kaplama kalınlığı yaklaşık 3.30 μm 'dir.
3. Elde edilen MoN-Cu kaplamaların XRD faz analizleri yapılmıştır. XRD paterninde Mo ve Mo₂N fazları gözlenmiştir. Mo pikleri kaplamanın dropletlerinden (damlacık) kaynaklanırken, asıl kaplama bölgesinde kübik Mo₂N fazının hakim olduğu söylenebilir.
4. MoN-Cu kaplamaları pim ve diskler, kaplamasız pim ve disklerle karşı, mangan fosfat kaplamalılarla aynı koşullarda Stribeck ve aşınma deneyine tabii tutulmuştur. MoN-Cu kaplamalı pim ve kaplamasız disk kullanıldığında sürtünme katsayısı 0.11, diskte meydana gelen aşınma derinliği 2.76 μm , pimde meydana gelen iz çapı 1.40 mm çıkmıştır. Bu değerlerin mangan fosfat kaplamalı numunelerden daha düşük olduğu görülmektedir.
5. MoN-Cu kaplamalı pim ve kaplamasız diskte meydana gelen aşınmanın zamana bağlı olarak nasıl bir artma eğilimi gösterdiğini belirlemek amacıyla 24 saatlik uzun deneyler, aynı parametreler ile alt sürelerle bölünerek (3 saat- 6 saat- 12 saat ve 24 saat) tekrarlanmıştır. Belirlenen her süre sonunda diskteki ve pimdeki aşınma miktarı

analiz edilmiştir. Kaplamasız diskte meydana gelen aşınma derinliği zamana bağlı olarak azalarak artmakta iken, MoN-Cu kaplamalı pimde ise 12 saat sonunda aşınmanın stabil hale geldiği söylenebilir.

6. Yapılan tüm aşınma (24 saatlik uzun deneyler) test grafikleri incelenip kıyaslama yapıldığında kaplamasız dökme demir pim- kaplamasız dökme demir disk tribo-çiftinde sürtünme katsayısı değerinin zamana bağlı olarak daha saçınık eğri çizdiği ve stabilitesini koruyamadığı görülmektedir. Hem pimin hem diskin mangan fosfat kaplamalı numunelerde eğri stabilitesi artmakta ve en stabil eğri MoN-Cu kaplamalı numunelerde elde edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Polcar, T., Parreira N. M. ve Cavaleiro A.** (2008). Structural and tribological characterization of tungsten nitride coatings at elevated temperature, *Wear*, 319-326.
- [2] **Havey, K. S., Zabinski, J. S. ve Walck, S. D.** (1997). The chemistry, structure, and resulting wear properties of magnetron-sputtered NbN thin films, *Thin Solid Films*, cilt 303, no. 1-2, 238-245.
- [3] **Aouadi, S. M., Wong, K. C., Mitchell, K. A., Namavar, F., Tobin, E., Mihut, D. M. ve Rohde, S. L.** (2004). Characterization of titanium chromium nitride nanocomposite protective coatings, *Applied surface science*, cilt 229, no. 1-4, 387-394.
- [4] **Li, Z. G., Miyake, S., Kumagai, M., Saito, H. ve Muramatsu, Y.** (2004). Hard nanocomposite Ti–Cu–N films prepared by d.c. reactive magnetron co-sputtering, *Surface and Coatings Technology*, no. 183, 62–68.
- [5] **Erdemir, A., Ürgen, M., Çakır, A. F., Eryılmaz, O. L., Kazmanlı, K. ve Keleş, Ö.** (2007) Hard and low friction nitride coatings and methods for forming the same, Patent US7211323 B2.
- [6] **Özkoç, N.** (1999). Uygulamalı Soğutma Tekniği, Makine Mühendisleri Odası Yayını, 115, Ankara.
- [7] **Anderson, E. P.** (1966). Home Refrigeration And Air Conditioning Guide, Howard W. Sams & Co., Inc., Indianapolis, Indiana.
- [8] **Brown, R. N.** (1986). Compressors Selection & Sizing, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- [9] **Cinisi, M. F.** (2003). Hermetik Kompresörlerde Soğutucu Akışkanların İndikatör Diyagramına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [10] **Turfan, M. E.** (2005). Hermetik Pistonlu Kompresörlerde Sürtünme Kayıplarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] **Parıldar, B.** (2007). Buzdolabı Kompresör Yatakları İçin Aşınmaya Dayanıklı Malzemelerin Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] **Hivart, P.H., Hauw, B., Crampon, J, Bricout, J. P.** (1998). Annealing improvement of tribological properties of manganese phosphating coatings, Wear 219, 195-204.
- [13] **Rausch, W.** (1990). The Phosphating of Metals, ASM International finishing Publications.
- [14] **Chemetall GmbH.** (2000). Mangan Fosfat Kaplama Prosesi Sunum Notları.
- [15] **Temiz, V.,** Makine Elemanları-I, Triboloji Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [16] **Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W.** (2001). Engineering Tribology, Butterworth-Heinemann Woburn, MA.
- [17] **Kayalı E.S., Eruslu N, Ürgen M., Taptık Y., Çimenoglu H.** (1997). “Hasar Analizi Seminer Notları”, TMMOB, İstanbul.
- [18] **Yıldız, T., Gür, A.K.** (2006). Aşınma Sistemleri. Aşınma Sistemleri, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, Elazığ.
- [19] **Na B.C., Chun K.J., Han D.C.** (1998). A tribological study of refrigeration oils under HFC-134a environment, Tribology International 30 (9) 707–716.
- [20] **Hutchings, I.M.** (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, CRC Press: Boca Raton.
- [21] **Boyde, S. et al.** (2000). Effect of Lubricant Properties on Efficiency of Refrigeration Compressors, Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue.
- [22] **Ajayan P.M., Schadler L.S.** (2003). Braun P.V., Nanocomposite Science and Technology, Wiley-VCH, Weinheim.

- [23] **Vollath D., Szabo D.V.** (2004). Synthesis and properties of nanocomposites, *Adv.Eng.Mater.* 6, 117–127.
- [24] **Erdemir, A., Voevodin A. A.** (2010) Nanocomposite Coatings for Severe Applications, Chapter 14, 679-715.
- [25] **Donnet, C., Erdemir, A.** (2004). Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings, *Surf. Coat. Technol.* 180–181, 76–84.
- [26] **Sezgin, A.** (2010). Mo-N-Cu, Mo-N-Sn ve Mo-N-Cu-Sn Nanokompozit Yapılı Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [27] **Keleşoğlu, E.** (2011). Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri.
- [28] **Kelly, P. J., Arnell, R. D.** (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, *Vacuum*, 56, 3, 159-172.
- [29] **Öztürk, A.** (2003). Manyetik sıçratma tekniği ile üretilmiş Mo₂N ve nanokompozit Mo-N-Cu kaplamaların kazımalı aşınma davranışlarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **Eryılmaz, O. L.** (2001). Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle nanokompozit Mo-N-Cu kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Kazmanli, K., Daryal, B., Urgen, M.** (2007). Characterization of nano-composite TiN–Sb coating produced with hybrid physical vapor deposition system, *Thin Solid Films*, 515, 7-8, 3675-3680.
- [32] **Öztürk, A., Ezirmik, K. V., Kazmanlı, K., Ürgen, M., Eryılmaz, O. L., Erdemir, A.** (2008). Comparative tribological behaviors of TiN–, CrN– and MoN–Cu nanocomposite coatings, *Tribology International*, 41, 49–59.
- [33] **Ürgen, M., Eryılmaz, O. L., Çakır, A. F., Kayalı, E. S., Nilüfer, B., Işık, Y.** (1997). Characterization of Molybdenum Nitride Coatings Produced by arc-PVD Technique, *Surface and Coatings Technology*, 94/95, 501-506.

- [34] **Luby, S., Majkova, E., Jergel, M., Brunel, M., Leggieri, G., Luches, A., Majni, G., Mengucci, P.** (1996) . Stability of interfaces in Mo/Cu multilayered metallization, *Thin Solid Films*, 277, 138-143.
- [35] **Çavdar, Z. F.,** (2007) Mo₂N-Cu, MoN, TiN ve CrN Kaplamaların, Yağlı Ortam İçerisinde İs Oluşumu Özelliklerinin Ana Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Türk Standartları,** (1985), TS 4566.
- [37] **Erdemir, A.,** (2005). A crystal chemical approach to formulation of self-lubricating nanocomposite coatings, *Surface & Coatings Technology*, 200, 1792-1796.
- [38] **Erdemir, A.,** (2000). A crystal-chemical approach to lubrication by solid oxides, *Tribology Letters*, 8, 97-102.
- [39] **Url-1** <<http://www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-magnetron-sputtering.htm>> alındığı tarih 15.04.2014.
- [40] **Url-2** <<http://www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-arc-evaporation.htm>> alındığı tarih 15.04.2010.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Pınar YAVUZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Neuss/B. Almanya, 17.04.1989

E-Posta: yavuzp@itu.edu.tr, p.yavuz@windowslive.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi/Metalurji ve malzeme mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller: ARÇELİK A.Ş./Ar-Ge mühendisi (2011-...)

- Süleyman Demirel Üniversitesi, 15. Bilim ve Bahar Şenliği, Öğrenci Proje Yarışması, Sağlık kategorisi ikinciliği, 2012
Proje konusu: Polimer kaplanmış nanotüp morfolojisine sahip titanyum yüzeylerinden kontrollü ilaç salınımı
- Ben-Nissan Başarı Ödülü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2010
(Malzeme Bilimi-I Dersi Dönem Birinciliği)
- Kadıköy Anadolu Lisesi Mezuniyet Onur Ödülü, 2008

Yayın ve Patent Listesi:

Yavuz, P., Bostan, B., Çulhaoglu S., Deprem Ö., Demirtaş, B., Polimer kaplanmış nanotüp morfolojisine sahip titanyum yüzeylerinden kontrollü ilaç salınımı, 2. Uluslararası Nanoteknoloji Kongresi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2012

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Yavuz, P., Yeşilçubuk, A., Ürgen, M., Kazmanlı, K., 2014 : Tribological Behaviour of Manganese Phosphate Coating On Gray Cast Iron in Boundry Lubrication Regime, 2. *Yüzey İşlemleri Sempozyumu*, 25-27 Haziran, İstanbul, Türkiye