



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVILAŞTIRILMIŞ BOR KATKILI
YAĞLARIN AŞINMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

FIRAT SERİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Kasım-2015
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

SIVILAŞTIRILMIŞ BOR KATKILI YAĞLARIN AŞINMA KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

FIRAT SERİN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU

2015, 78 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Recai KUŞ
Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Yrd. Doç. Dr. Mürsel EKREM

Yağlama yağının en önemli rolü her şeyden önce enerji kaybını azaltmak, aşınmayı minimum seviyeye indirmek ve yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemek ve dolayısıyla sürtünme karakteristiklerini geliştirmektir. Yağlama yağlarından, metallerde bozulmayı engelleme ve pas önleme direncini geliştirmek ikinci fonksiyon olarak istenmektedir. Bu nedenle baz yağın tek başına yetersiz olduğu pek çok fonksiyon, baz yağda çözülebilen özel katkı maddeleri tarafından sağlanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada; ticari olarak kullanılan sıvılaştırılmış bor (bormax) katkısının %10 oranında madeni yağın içine karıştırılarak, farklı çalışma sıcaklıklarında ki yağlama performansı bor katılmamış madeni yağ ile karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda Bilye-Disk (ball on disc) yöntemi kullanılarak aşınma sürtünme gibi değerler analiz edilmiştir. Ayrıca numuneler üzerindeki ağırlık kayıpları hesap edilmiş ve aşınan yüzeyler mikroskopta incelenmiştir. Deneysel sonuçları göstermiştir ki; Bor katkılı yağın sıcaklığın artışı ile birlikte yağlama performansını da arttırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Bor, Bilye-Disk, Yağlar.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF ABROSION CHARACTERISTICS OF LIQUIFIED DOPED BORON OILS

FIRAT SERİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL EDUCATION**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU

2015, 78 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Recai KUŞ
Assoc. Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Asst. Prof. Dr. Mürsel EKREM**

The most important role of the lubrication oil is first of all, reducing of the energy loss, then decreasing of the wear to its minimum level and prevention to bonding of the surfaces, because of that, friction characteristics have developed. Developing of the corrosion prevention resistance and prevention of the corrosion at the metals are desired as a secondary function from lubrication oils. Therefore, base oil is inadequate alone for many functions which are supply by special contribution materials which can be soluble at base oil.

At this study, liquidized boron additive which is used for commercial purposes has mixed with a 10 % ratio to mineral oil inside. Lubrication performance at different operating temperatures has compared with mineral oils without boron additive. At studies, values have been analyzed like wear, friction using with ball-disc (ball on disc) method. Also weight loses have calculated on specimens and ablative surfaces have investigated with microscope. The test results illustrated that; with increasing of the boron additive oil temperature, the lubrication performance developing has investigated.

Keywords: Boron, Disc-Ball, Oils, Wear.

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışmamda engin bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, her aşamasında beni yönlendiren değerli hocam Sn. Doç.Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU'na, her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen biricik eşim Tuğba Serin'e ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım için gerekli olan bor katkıasını temin eden UNEX firması ve çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Fırat SERİN
KONYA-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Triboloji.....	2
1.1.1. Sürtünme	2
1.1.2. Aşınma	5
1.2. Motor Yağları	7
1.2.1. Madeni Yağlar	8
1.2.2. Sentetik Yağlar	8
1.2.3. Yarı Sentetik Yağlar	9
1.3. Yağlama	9
1.3.1. Yağlama Rejimleri	9
1.4. Motor Yağı Katkı Maddeleri	11
1.4.1. Viskozite İndeksi Geliştiriciler	11
1.4.2. Aşınma Önleyiciler	12
1.4.3. Sürtünme Önleyiciler	12
1.4.4. Aşırı Basınç Katkıları	13
1.4.5. Pas ve Korozyon Önleyiciler	13
1.4.6. Antioksidanlar.....	14
1.4.7. Deterjanlar ve Dispersanlar	14
1.4.8. Akma Noktası Düşürücüler	15
1.4.9. Köpük Önleyiciler.....	15
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI	17
2.1. Bor	20
2.1.1. Bor Bileşikleri.....	21
2.1.2. Borik Asit.....	22
2.1.3. Borik Asitin Bulunuşu	22
2.1.4. Borik Asitin Kullanım Alanları	22
2.1.5. Borik Asitin Üretim Yöntemleri	23
2.1.6. Borik Asit ve Yağlayıcı Olarak Kullanılması.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Deney Prosedürü.....	34
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	36

4.1.	Bilye Ağırlık Kaybı	38
4.2.	Sürtünme Katsayısı	39
4.3.	Aşınma Miktarı	47
4.4.	Bilye Aşınma Oranı	55
4.5.	Bilye Aşınma Davranışı.....	56
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		62
5.1	Sonuçlar	62
5.2	Öneriler	63
KAYNAKLAR		65
ÖZGEÇMİŞ		68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_r	Gerçek temas alanı
A_n	Normal temas alanı
α	Düzeltilme katsayısı.
α'	0 ile 1 değerleri arasında değişen metalden metale temas sabiti
F	Kuvvet [N].
f	Sürtünme katsayısı.
f_h	Yağlayıcı moleküllerin iç viskoz sürtünmesinden dolayı oluşan akışkan veya
f_s	Metalden metale kuru sürtünme katsayısı.
K	Düzeltilme katsayısı.
P	Birim yüzeye etki eden yük (temas eden yüzeylerdeki basınç) [N/m ²].
P_{max}	Birim yüzeye etki eden maksimum kuvvet
P_{min}	Birim yüzeye etki eden minimum kuvvet
Z	Sommerfeld sayısı.

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu, (Atomic Force Microscope)
AISI	Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
ASTM	Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
AW	Aşınma Önleyici (Anti-Wear)
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
DIN	Alman Endüstri Normu (Deutsche Industrie Norm) 1 DIN = 1,12 SAE
Disk-1	AISI 8620 Sementasyon Çelik Diski
Disk-2	TiN Kaplanmış Sementasyon Çelik Diski
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
EP	Aşırı Basınç (Extreme Pressure)
O ₂	Oksijen
PPM	Milyondaki Parça Sayısı, (Part Per Million)

PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi
R&D	ABD Arge Ödülleri
SAE	Otomotiv Mühendisleri Derneği (Society of Automotive Engineers)
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TGA	Thermal Gravimetric Analysis
TiN	Titanyum Nitrür
VI	Viskozite indeksi
ZDDP	Çinko Dialkilditiofosfat (Zinc Dialkyldithiophosphate)
ZnDTP	Çinko dialkilditiofosfat (Zinc dialkyldithiophosphate)

1. GİRİŞ

Günümüzde aşınma ve sürtünmeyi önlemek için madeni yağlara çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. Bunlarla birlikte yağ kuvvetlendirici olarak adlandırılan katkı maddeleri madeni yağlara yaklaşık %5 ila %10 gibi bir oranda eklenebilmektedir. Ayrıca bu ürünlerin makine yağlarında, dişli yağlarında ve greslerde de kullanıldığı belirtilmektedir.

Sanayileşme ve konfor yapısının artmasıyla taşıt sayısı da hızlı bir şekilde artmaktadır. Bununla birlikte taşıtlarda kullanılan madeni yağ tüketimi de artış göstermektedir. Piyasalardaki madeni yağların %70'e yakını motorlu taşıtlar tüketmektedir. (Öztürk, 2005)

Motorlarda yağlama yoluyla sürtünmelerin iyileştirilmesi ve azaltılmasıyla motorun yakıt tüketimi azalır ve çıkış gücü artırılır. Bunun yanında iyi bir yağlayıcı yağ tüketimini ve zararlı egzoz emisyonlarını da azaltır. Motorun sağlamlığını koruması, arızasız çalışması, uzun ömürlü olması ve düşük tamir bakım gereksinimleri için yağlama yağının iyi olması gerekmektedir. Motorların dünya ekonomisinde ve enerji tüketiminde oynadıkları rolün büyüklüğü de bunlarda yapılacak iyileştirmelerin, enerji tüketiminin ve dolayısıyla dünya tüketimine çok faydalı olacağı gibi atmosfere salınan emisyonların azaltılmasında da etkili olacaktır.

Sürtünmeler yakıt enerjisinin yaklaşık %15'ini tüketmektedir. Sürtünmelerin %10 azaltılması bile yakıt tüketimini %1,5 azaltmaktadır. Sürtünmelerin yarısı motor içinde olurken diğer yarısı debriyaj ve diferansiyel kutusu gibi diğer elemanlarda ortaya çıkmaktadır. Motordaki sürtünmeler göz önüne alındığında en büyük sürtünme kayıpları piston segmanları ile silindir yüzeyi arasında olmaktadır.

Bor katkılı yağların, motorun mekanik verimini, motor test düzeneklerinin yük taşıma performansını, motorlu taşıtların işletme performansını arttırdığını ve bunlarla birlikte yakıt ekonomisi kazandırdığını savunan üretici firmalar aynı zamanda malzeme ömrünün de iki kata yakın artacağını savunmaktadırlar. İyi bir yağlama her zaman sağlıklı bir motorun garantisidir. Üstelik modernleşen teknolojiyle üretilen motorlar, yağlardan çok daha fazla performans beklemektedirler.

Bu çalışmada ticari bor katkılı madeni yağın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısı ve aşınma kayıpları deneysel olarak incelenmiştir. Bor katkısının yağ haznesine oda sıcaklığı, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda eklendiğinde aşınma

performanslarında ki değişimi incelenmiştir. Bunun için aşınma ve sürtünme kayıplarının ölçümünde sıkla kullanılan ball on disc yöntemi kullanılmıştır.

1.1. Triboloji

Triboloji, genellikle malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma oranlarının belirlenmesi ve bunlara sebep olan doğal mekanizmaların bulunması (yük miktarı, hız vb.), sürtünme ve aşınma değerlerinin azaltılmasını sağlayacak malzemeleri ya da yağ, yağ katkı maddelerini konu edinen bilim dalıdır.

Alman makine mühendisi Richard Stribeck (1861-1950), kaymalı yataklar üzerinde çok sayıda deney yapmıştır. Bu deneylerde sürtünmeye etki edebilecek bütün değerleri sabit tutmuş, devir sayısını ve buna bağlı olarak çevresel hızı değiştirerek bugün Stribeck eğrisi olarak bilinen eğriyi elde etmiştir (Wikipedia.org).

Triboloji alanında Türk mühendis Ali Erdemir'in çalışmaları dünyada yankı uyandırmaktadır. Erdemir, R&D (ABD-ARGE dlleri) dln daha önce 1991 yılında, borik asidin motor ve makinelerde sürtünme ve aşınma özelliğini bularak, 1998 yılında ise geliştirdiği atom karbon bir film kaplama ile sürtünme katsayısını sıfıra indirerek kazanmıştır. Son olarak nanoteknoloji kullanarak geliştirdiği yapay elmas özelliği taşıyan buluşu ile R&D dln 2003 yılında 3. kez kazanmıştır (Wikipedia.org).

1.1.1. Sürtünme

Teknik olarak sürtünme, birbiriyle temas eden ve birbirlerine göre izafi hareket yapan ya da yapma eğiliminde olan iki cismin harekete karşı gösterdikleri direnç olarak tarif edilir. Cisimlerin arasındaki izafi hareketi oluşturmak isteyen kuvvete karşı, cisimlerin temas yüzeyleri arasında hareketi engelleyen ve sürtünme kuvveti olarak tanımlanan bir karşı kuvvet oluşur. Kinematik olarak sürtünme; kayma, yuvarlanma ve kayma ve yuvarlanma şeklinde olur.

Temas eden iki yüzey arasında izafi hareket yoksa statik sürtünme oluşur. İzafi hareket yüzeyler arasında mevcutsa bu durumda sürtünme dinamik veya kinetik sürtünme olarak tanımlanır. Sürtünme kuvveti sürtünme katsayısına bağlıdır ve sabit

değildir. Sürtünme katsayısının değişimiyle birlikte değişir. Sürtünme katsayısı en büyük değerini statik sürtünme durumunda alır. Dolayısıyla izafi hareketin başlangıcından hemen önce sürtünme kuvveti en büyük değerini almış olur.

Cisimlerin izafi hareketi sırasında yüzeyleri arasına yağlayıcı bir madde konulup konulmaması durumunda sürtünme; kuru sürtünme, sıvı sürtünme ve bu iki sürtünme türü arasında kalan yarı sıvı sürtünme olmak üzere üç durumda gerçekleşir.

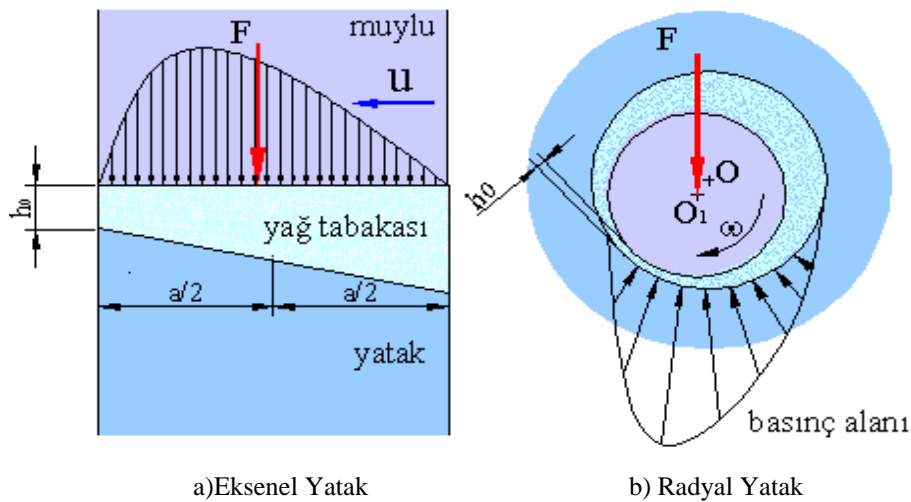
Kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Teknik olarak sürtünme bazen istenilen bazen de istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkar. Kavrama ve fren gibi makine elemanlarında sürtünme istenilen bir olaydır ve bu gibi yerlerde sürtünme artırılmak istenir. Çoğu zaman ise izafi hareket yapan yüzeylerde istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkan sürtünmenin azaltılması gerekir. Sürtünme olayı incelenirken temas halindeki yüzeylerin pürüzlü ve temiz olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır. Bunun için deney numuneleri özenle seçilmeli ve yüzey pürüzlülükleri ve malzeme temizliğinde hassas olunmalıdır. Yapılan inceleme ve deneyler göz önüne alındığında kuru olarak tarif edilen madenlerin yüzeyleri aslında oksit, yağ, pislik vb. gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır. Adsorpsiyon nedeniyle oluşan bu tabakalar maddesel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Fakat talaş kaldırılarak işlenmiş veya temizlenmiş yüzeyler atmosfere maruz kalırlarsa yüzeylerde ani bir oksit tabakası meydana gelmektedir. Sonuç olarak; teknikte kullanılan elemanların yüzeyleri çeşitli kimyasal bileşikler ihtiva eden tabii bir adsorpsiyon tabakası ile kaplıdır.

Temas eden yüzeyler arasına bir yağlayıcı konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak maddesel yüzeylere muntazam bir şekilde yapışırlar. Yağın bu özelliği yapışma kabiliyeti olarak bilinir. Yapışma kabiliyeti yağ ve maddesel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Meydana gelen bu tabaka metal yüzeylerinin doğrudan doğruya temas etmesini önler. Ayrıca bu yağların oluşturduğu yağ tabakasının kayma mukavemetini azaltmak için yağlara ek katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu maddeler genellikle organik yağlardan oluşur ve miktarları oldukça azdır. Genellikle organik yağlardan oluşan katık maddeleri yağ içerisine çok az miktarda konulur.

Sıvı sürtünme hali, metal yüzeylerinin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme şeklidir. Bu yüzeylere temasta bulunan yağ tabakaları,

adsorpsiyon yolu ile bu malzemelere tamamen yapışmış olduğu görülür. Sıvı sürtünmenin oluşmasında ki esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Bu hidrodinamik ve hidrostatik olmak üzere iki farklı şekilde meydana gelir.

Hidrodinamik sıvı sürtünmede, yüzeylerin geometrik ve kinematik şartlarına bağlı olarak yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur. Basıncı bir yağ filminin oluşabilmesi için kinematik ve geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır. Pratikte bu iki şart eğik düzlemsel yüzeylerde (aksenal yataklarda, Şekil-1.1.a) ve birbirine göre eksantrik bir durumda olan silindirik yüzeylerde (radyal yataklarda, Şekil-1.1.b) gerçekleşir.



Şekil 1.1. Hidrodinamik Sıvı Sürtünme

Hidrodinamik sıvı sürtünme kinematik ve dinamik şartlara bağlı olduğundan uygulama alanı sınırlıdır. Genellikle bu sürtünme hali, izafi hareketin sürekli olduğu ve yağ tabakasının hareket yönünde daralan bir yağ kaması oluşturduğu takdirde çok kısa süreli gerçekleşebilir. Ancak bu sürtünme hali hiçbir zaman sürekli olmaz.

Hidrostatik sıvı sürtünmesi halinde dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınç, yüksek basınçlı bir pompa vasıtası ile dışarıdan sağlanır. Yağ basınç ile yüzeyler arasına gönderilir. Bu durumda bütün sistemlerde, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olmaksızın sıvı sürtünmesi sağlanabilir. Yani hidrostatik sıvı sürtünmesi hareketsiz yüzeylerde de oluşturulabilir. Böylece bu sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında sıvı sürtünmesi hali vardır. Kuru ve sınır sürtünmenin bulunmadığı bu yağlama durumunda aşınma da yoktur.

Hidrostatik sıvı sürtünmesi ile çalışan sistemler bu üstünlüklerine rağmen tesisat bakımından (motor, pompa, süzgeç, dirençler) oldukça karışık ve pahalı bir sistemdir. Herhangi bir arıza durumunda ve yatağa yağ gönderilmediği zamanlarda, yüksek hızla çalışan elemanlar direkt temasa geçerler ve şiddetli bozulmalar meydana gelebilir. Ancak modern sistemlerde bu durumu önlemek için uyarıcı cihazlar konulur. Yağlayıcı maddeler sıvı, gaz veya gres olabilir. Buna göre sistemler hidrostatik, gazostatik ve reostatik olarak isimlendirilir (Akkurt, 1990).

1.1.2. Aşınma

Birbirine temas eden ve birbirlerine göre izafi hareket yapan sürtünme halindeki cisimlerin yüzeylerinde sürtünme etkisiyle oluşan ve istenilmeyen malzeme kaybına aşınma denir. Aşınmanın sonucu olarak yüzeyler ilk şekillerini kaybederler. Makine parçaları arasındaki boşluklar giderek büyür ve buna bağlı olarak makinenin hassasiyeti azalır. Ayrıca dinamik kuvvetlerin zamanla büyümesiyle gürültü ve titreşimler meydana gelir, verim azalır. Sonuç olarak makine elemanları giderek aşınır ve fonksiyonlarını sağlıklı olarak yerine getiremez hale gelir.

DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma, “ kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde, mekanik etkenler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenmeyen yüzey bozulmasının meydana gelmesi” şeklinde tanımlanmaktadır. Katı cisimlerin yüzeylerinin oksitlerle ya da yağlayıcılarla kaplanması durumunda dahi, oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonunun zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı-katı teması olmaktadır. Bu temaslar aşınmaya neden olmaktadır (Şen 1997).

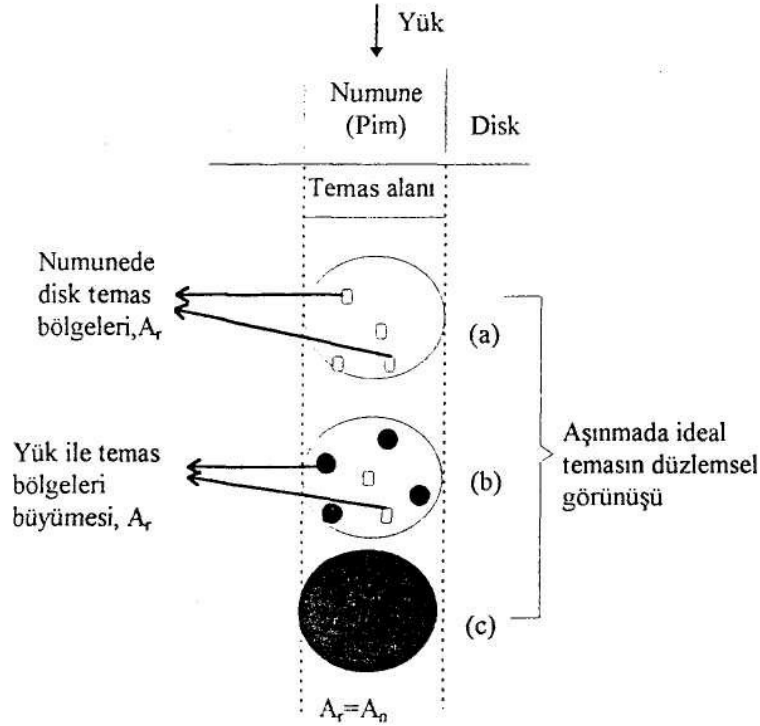
Aşınma genel olarak dört farklı şekilde oluşur. Bunlar; adhezyon aşınması (yapışma), abrazyon aşınması, yorulma (pitting) ve kavitasyon’dur.

Adhezyon (yapışma) aşınması; temas halindeki cisimlerin gerçek temas yüzeyleri altında son derece küçük olduğundan çok küçük yüklerde dahi yüksek basınç altındadırlar. Bu nedenle malzemeler plastik deformasyona uğrar ve gerçek temas yüzeylerinden birbirine mikro kaynak ile bağlanırlar. Bu esnada iki cisim arasında devam eden izafi hareket sonucu kaynak bağı koparak cismin birinden malzeme eksilmesi oluşur.

Abrazyon aşınması; çevrenin etkisiyle yabancı sert parçacıkların, birbirine göre izafi hareket yapan iki cisim arasına girmesi ve bu parçacıkların yumuşak yüzeye gömülerek sert yüzeyden sanki eğe veya zımpara yapıyormuş gibi malzeme kaldırmasıyla kendini gösteren bir aşınma türüdür. Sert parçacıklar gömüldükleri yüzeyde de tahribat yaparlar ve yüzeyi hareket yönünde çizerler.

Yorulma (pitting) aşınması, birbirleriyle sürekli temas halindeki yüzeylerde sıkça görülen bu aşınma türü, genellikle dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında görülür. Temas alanları küçük olduğundan bu tür makine elemanlarının temas yüzeylerinde Hertz basınçları meydana gelir. Bunun sonucunda yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Bu gerilmelerin maksimum olduğu noktada plastik deformasyon meydana gelir. Bu deformasyon zamanla yüzeye ilerleyerek yüzeyde çukurcuklar meydana getirir. Bu olaya yorulma aşınması denir.

Sekil 1.2.'de disk üzerinde Pim-Disk yöntemi ile yapılan aşınma deneyinde, numunenin ideal bir aşınma davranışı gösterdiği özetlenmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, metal yüzeyleri birbirine temas ettirildiğinde gerçek temas alanı A_r , genelde çok küçüktür. Gerçek temas alanlarındaki yüksek bölgesel basınç, hareketsiz durumda bile yüzeyler arasındaki metalik temas alanlarını bir anlamda dövme ile birleştirmektedir. Temas yüzeyleri arasında hareket meydana geldiği anda gerçek temas alanı A_r , nominal temas alanı A_n 'ye eşit oluncaya kadar büyümeye devam etmektedir. Plastik olarak bölgesel hasarın, büyük miktardaki kütleli akışın ve metalik transfer gibi etkilerin, adhesiv aşınmanın temelini oluşturduğu belirtilmektedir (Şen 1997).



Şekil 1.2. Adhesiv aşınmada yapışma mekanizmasının ideal bir modeli (Şen 1997)

(a) normal yük altında plastik olarak deforme olan temas alanları, A_r ; (b) normal yükün artması ve sürtünme kuvvetlerinin devreye girmesi ile temas alanlarının büyümesi; (c) gerçek temas alanı A_r 'nin normal temas alanı A_n 'ye ulaşması ile yapışmanın meydana gelmesi (Şen 1997).

1.2. Motor Yağları

Karter yağı olarak bilinen motor yağı, motorun çalışan parçaları arasında kaygan bir yağ tabakası oluşturarak sürtünen yüzeylerin aşınmasını önler. Ayrıca motor içerisinde çalışan parçaların temizlenmesini sağlar.

Otomotiv Mühendisleri Cemiyeti (Society of Automotive Engineers, SAE), motor yağlarının karakteristiklerini ayırt etmek için kalite isimlendirmesi yapmışlardır. Bu isimlendirme 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 ve 60 şeklinde küçükten büyüğe doğru sıralanabilir. W ile biten bu sayılar yağın soğuk veya kış koşullarında en düşük sıcaklıkta akışkanlığa başlama noktasıdır. Örneğin 20W, 20 derecede yağın akışkan olduğunu göstermektedir. Her zaman düşük sıcaklıklarda akışkanlık motor için

önemlidir ve ilk çalıştırmada soğuk olan motorun yağlanması için düşük değerler daha iyidir. Genel olarak ülkemizde iklim şartları göz önüne alındığında 10W40 veya daha düşük sayılarla isimlendirilen yani daha kaliteli yağlar tavsiye edilir.

Yağlama yağlarının motorun hareketli parçalarının yağlanması dışında sürtünme kayıplarını azaltmak, piston gibi hareketli parçalarda sürtünmeden doğan ısıyı emerek yüzeylerin soğutulmasını sağlamak, yanma sırasında oluşan asitleri nötrleştirmek ve yüzeylere tortu birikimini önlemek gibi görevleri de vardır.

Yağlar elde ediliş şekillerine göre başlıca 3 grupta toplanırlar.

1.2.1. Madeni Yağlar

Hareket eden metallerin arasında bir film oluşturarak hareketi kolaylaştıran, sürtünmeyi, korozyonu önleyen ve ham petrolün rafine edilmesi sonucu elde edilen maddelere kimyasal katkı maddesi ilavesi ile elde edilen ürünlerdir.

Ham petrolden rafine edilen madeni baz yağlar motor yağlarının temelini oluşturmaktadır. Madeni baz yağların motor yağındaki oranı %85 civarında olup, geriye kalan kısım motor yağının çeşitli özelliklerini iyileştirmek için eklenen yağ katkı maddelerinden oluşmaktadır.

1.2.2. Sentetik Yağlar

Aşırı sıcaklık farklılıkları gibi zorlu çalışma şartlarına dayanmak ve daha uzun kullanım ömrü sağlamak amacıyla sentetik baz yağlar geliştirilmiştir. Bu yağlar içerisinde çeşitli hidrokarbonlar, oksijen, azot ve kükürtlü bileşikler bulunmaktadır. Bu sebeple saflaştırılıp rafine edilmesi gereken mineral baz yağlardan farklı olarak belirli birkaç bileşiğin reaksiyonuyla, kullanılacağı koşullara göre özel olarak üretilmektedir. Sentetik yağların endüstride kullanılmaya başlaması 1930'lu yıllarına dayanmaktadır. İkinci Dünya Savaşı ve sonrasında havacılık ve silah sanayi oldukça gelişmiştir. Bu gelişim madeni baz yağların yetersiz kalmasına neden olmuş ve sentetik baz yağların gelişimine önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Ancak madeni baz yağlara nazaran oldukça yüksek olan maliyetleri sentetik baz yağların otomotiv sektöründe kullanımını kısıtlamıştır. Günümüzde ise artan performans ihtiyaçları, gelişen çevresel duyarlılık ve gelişen üretim teknolojisi sayesinde düşen maliyetleri, sentetik yağların otomobillerde kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

1.2.3. Yarı Sentetik Yağlar

Madeni yağlar içerisinde sentetik katkı maddeleri katılmasıyla elde edilen yağlardır. Hem fiyatları, hem de sundukları performans açısından madeni yağlar ile sentetik esaslı yağlar arasındadır. Genellikle %70-80 madeni yağa %20-30 sentetik yağ karıştırılmak suretiyle elde edilirler.

1.3. Yağlama

Cisimlerin temas yüzeylerinde ki hareketlerine engel olan kuvvete sürtünme kuvveti denir. Sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen ya da tamamen önlemek ve sıcaklığın istenilen seviyelere inmesini sağlamak gibi nedenlerden dolayı birbirlerine temas eden makine elemanları arasında yağlayıcılar kullanılırlar. İki katı cismi birbirinden ayırmak ve sürtünme gücünü minimuma indirmek için kullanılan maddeye “yağ” denir. Bu iki katı cismin arasında yapılan iş de “yağlamadır”. Yağlayıcılar katı, sıvı, yarı katı (gresler) ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört gruptan oluşur.

Madeni yağlar yağlama işlemini; sürtünen yüzeyler arasında film teşkil ederek, yüzeyleri kayganlaştırarak, yüzeylere asılıp kalarak yapar.

Yağlama yağlarının görevleri ise; sürtünmeyi kontrol, aşınmayı kontrol, sıcaklığı kontrol, korozyonu kontrol, izolasyon, kuvvet iletmesi, yıkama etkisidir.

1.3.1. Yağlama Rejimleri

Günümüzde kullanılan motorların yüksek güçler üretebilmesi ve daha az yer kaplaması için yapılan çalışmalar, parça tasarımcılarına oldukça fazla bir yük getirmektedir. Bu özellikleri sağlamak için, daha duyarlı tasarımlar elde etme gereksinimi vardır. İçten yanmalı motorların, birbirlerine temas halindeki parçalarında daha iyi bir tasarım elde etmek için, fiziksel ve kimyasal mekanizmaların sorumlu olduğu yükleme kabiliyeti ve hata mekanizmalarının anlaşılması gerekmektedir. Çalışmalar, yağlama rejimleri üzerinde yoğunlaşmakta, bu rejimler genel bir şekilde ifade edilerek, daha sonra otomobil motoruyla ilişkilendirilmektedir.

Yağlayıcılar, değişik yağlama şartlarında farklı özellikler gösterdiğinden, yağlayıcıların fiziksel-kimyasal özellikleri ve katkı malzemelerinde kritik değişimlerin

yapılması gerekmektedir. Yataklar, supap mekanizması ve piston tertibatı gibi farklı işlev gösteren motor parçalarını yağlamak için tek bir yağlayıcı kullanılmış ve bu yağlayıcı ile her birinin performansı optimize edilmek istenmiştir. Bu durum, yağlayıcıların önemini bize en iyi şekilde ortaya koyar. Birçok genel mühendislik uygulamasında sürtünen parçaların karşıt yüzeyleri toplam sürtünmeyi azaltacak ve aşınmayı düşürecek yağlayıcılar ile ayrılmıştır.

Gelişen teknolojiyle birlikte üretilen modern yağlayıcılar, yağ filmi oluşturarak sürtünme kayıplarını kolaylıkla minimize edebilirler. Fakat toplam ayrılma yağlamanın ön şartı değildir. Değişik yağlama rejimleri, yüklü temaslar arasında yer almaktadır. Bu yağlama tiplerini (rejimleri) şu şekilde sıralayabiliriz;

- Hidrodinamik yağlama,
- Elastohidrodinamik yağlama,
- Sınır yağlama.

Hidrodinamik yağlama; metal elemanlar arasındaki madeni yağ filminin kalınlığı 6000 angstromdan fazla ise bu tip yağlamaya (kalın film yağlaması) denir. Bu yağlama rejiminde, yüzeyler yağ filmi tarafından tamamen birbirinden ayrılmıştır ve yükü taşımak için filmdeki basınçların oluşumu klasik hidrodinamik hareket ile kazanılmaktadır. Bu, birbirine göre bağıl hareket eden veya kayan iki yüzey arasında yeterli sıvı filminin ve basıncının oluştuğu sürtünme şekli olarak da açıklanabilir. Harekete karşı oluşan direnç yağlayıcının viskozitesi ile meydana gelir. Bu şartlar altında ki sürtünme katsayısı oldukça düşüktür ($f= 0.001$ ila 0.005) ve aşınma teorik olarak sıfırdır (Taylor 1998).

Elastohidrodinamik yağlama; çoğunlukla uygun olmayan yüzeylerde ve daha yüksek yük koşullarında oluşan bu yağlama şeklinde, yüzeyler teoride ayrıdır, ancak temas daha fazla yoğunlaşmıştır. Yağ filmleri daha incedir ve diğer fiziksel fenomenler (yüzeylerdeki elastik değişimler ve dinamik viskozitedeki basınç) etkilidir. Yüzey pürüzlülükleri söz konusu olduğu durumlarda yüzeylerin elastik deformasyonunun etkisi dikkate alınmak zorundadır. Bunun yanında, temas yüzeylerinde yüksek basınçlar oluştuğundan, yağlayıcı maddenin viskozitesi üzerine basıncın etkisinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Yüksek basınçlı rejimlerde, akışkanın viskozitesi önemli ölçüde yükselebilir.

Sınır yağlama; sınır filmi yağlaması olarak da bilinen bu yağlama rejiminde, yüzeylere yapışmış ince film hareketleri vardır. Yağlayıcının dinamik viskozitesinin önemi yoktur, ancak katkı malzemesinin önemi büyüktür. Bu yağlama rejimi, motorların ilk hareketinde ve durması esnasında yatak, segman ve silindirlerde görülür. İçten yanmalı motorların değişik çalışma şartlarında ise özellikle piston-segman ve silindir yüzeyleri arasında, oldukça ağır yük altında çalışan alt ve üst ölü noktalarda ve yavaş hareket eden subaplarda ve subap iticilerinde, krank mili yataklarında, yağ pompası dişlilerinde sınır yağlama şartları meydana gelir.

1.4. Motor Yağı Katkı Maddeleri

Aşınma ve sürtünmeyi en aza indirebilmek için motor yağlarına farklı türlerde katkı maddeleri eklenmektedir. Karter yağı olarak da bilinen motor yağlarının performansı, sürtünmeyi azaltma, oksidasyon direnci, artık oluşumunu minimuma indirme, korozyon ve aşınmayı önleme, motor ısısını istenilen düzeye düşürme gibi kabiliyetleri ile değerlendirilmektedir. Bu katkı maddeleri madeni yağdaki mevcut özellikleri geliştirmek, arzu edilen özellikleri kazandırmak ve modern motorlarda gerekli olan spesifik özellikleri arttırmak için kullanılmaktadır. Modern motorlar için gerekli olan bu performansları karşılamak için aşınma önleyici (AW), viskozite indeks arttırıcı (VI), köpük önleyici, akma noktası düşürücü, temizleyici ve dağıtıcı, antioksidan, yüksek basınç (EP), pas önleyici, yatak korozyon inhibitörleri vb. gibi çok çeşitli katkı maddeleri günümüzde motor yağlarına eklenmektedir.

1.4.1. Viskozite indeksi geliştiriciler

Viskozite indeks arttırıcılar, yüksek molekül ağırlıklı, uzun zincirli polimerlerdir. Bu tip katkıların fonksiyonları; herhangi bir yağın düşük sıcaklıklardaki viskozitelerini çok daha yüksek sıcaklıklarda da muhafaza etmektir. Düşük sıcaklıklarda yağın viskozitesini minimum seviyede tutarken, yüksek sıcaklıklarda maksimum bir artış sağlamaktadır (Durak 2005).

Yağın sıcaklığa karşı olan hassasiyetini düşürmek için, yüksek moleküler ağırlıklı polimerler, viskozite indeks geliştiriciler (iyileştiriciler) olarak bilinen 25 polimerler yağa eklenir (Viskozite indeksi veya VI, viskozitenin sıcaklığa duyarlılığının ampirik ifadesidir, değeri arttıkça duyarlılık azalır) (Taylor 1993).

Başka bir ifade ile viskozitenin sıcaklık ile değişimini azaltır. Viskozite indeks geliştiriciler, polimerize edilmiş olefinler veya izoolefinler, bütül polimerler, selüloz esterleri, hidrojenli kauçuk gibi bileşiklerden meydana gelmektedir (Leslie 2003).

1.4.2. Aşınma önleyiciler

Özellikle rodaj süresinde, ilk harekete başlama ve durma anında, karışık ve sınır yağlama boyunca kayan yüzeyler arasındaki bazı temaslar, çalışma çevriminde bu gibi kritik noktalarda önlenemez. Burada aşınmanın önlenmesini, metal yüzeylerde oksit filmleri ve yağın içindeki sülfür bileşenleri sağlar. Günümüzde aşınma önleyici katkıları kullanılarak modern motorlarda aşınma kabul edilebilir seviyelerde tutulmaktadır (Taylor 1993).

Aşınma önleyiciler, daha çok karışık yağlama bölgesinde etkili olmaktadır. Sürtünen yüzeylerdeki sınırlı metalik temaslarda bu katkı maddeleri yüzeye yapışma özelliği göstermektedir. Metal ile reaksiyona girerek bir yüzey bileşiği oluşturmakta ve bu yeni tabaka aşınmaları önleyebilmektedir (Durak 2005).

En etkili AW katkı maddesi Çinko (ZDDP), fosfor ve sülfür bileşikleridir (Leslie 2003).

1.4.3. Sürtünme önleyiciler

İçten yanmalı motorlardaki sürtünme kayıplarında yağlayıcıların önemli etkileri vardır. Esterlerin, amitlerin ve metal sabunlarının farklı çeşitleri ile yapılan ve sınır sürtünmede oldukça etkili olan bu katkı maddeleriyle basit laboratuvar testlerinde %30'dan fazla düşüş elde edilebilmektedir. Kompleks test düzeneklerinde yakıt ekonomisi içinde yaklaşık %4'lük bir fayda demektir (Taylor 1993).

Sürtünme önleyiciler, genellikle fiziksel adsorbsiyonla yağ filmi mukavemetini arttırıp, sürtünmeyi azaltmaktadır. Bunlar, metal yüzeye absorblanarak eş çalışan iki yüzeyi birbirinden ayırmaktadırlar. Genel olarak yağ filmi ile yüzey pürüzlerinin penetrasyonu çok şiddetli olmadıkları yüklem hallerinde etkili olmaktadır.

Sınır yağlama şartlarında, katkı maddesinin konsantrasyonunun artmasıyla sürtünme katsayısı azalmakta ve yüksek konsantrasyon oranlarında ise minimum bir sürtünme katsayısına yaklaşılmaktadır (Durak 2005).

Sürtünmeyi iyileştiren ve azaltan katkı maddeleri; oksijen, nitrojen, molibden, sülfür, bakır ve diğer birçok bileşik içermektedirler (Leslie 2003).

1.4.4. Aşırı basınç katkıları

Ağır çalışma şartları altında çalışan metal yüzeyler üzerinde aşırı basınç katkı maddeleri (EP) tutunmayı ve kaynamayı önlemektedirler. EP katkı maddeleri kimyasal reaksiyonla etkin olmaktadır. Bu maddeler yük taşıma kapasitesini arttırmakta, aşınmayı kontrol etmekte, sürtünmeyi azaltmakta, ayrıca şiddetli yüzey bozulmalarını önlemektedir. EP katkı maddelerinde en çok kullanılan bileşikler; sülfür, fosfor, klor, organik fosfat bileşikleridir. Metal yüzeyler üzerinde meydana gelen tabakanın, kopma mukavemeti büyük ve kayma gerilmeleri küçüktür. EP katkı maddeleri reaksiyon sıcaklığından önce tesirli değildir. Bu yüzden metal yüzeylerle çevre sıcaklığında reaksiyona girmezler. Metal yüzeylerle çok yüksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyona girerek kayma mukavemetini düşürürler. Bu tabakalar; kurşun sülfür, demir klorürdür. Metal yüzeyler ile kimyasal reaksiyona giren EP'ler organik sülfür, fosfor veya klorlu bileşikler, sülfür-fosfor ve sülfür-fosfor-boron bileşikleri içerirler. Kimyasal reaksiyon çok yüksek sıcaklıklarda meydana gelmektedir(300–1000°C). EP'ler ile metal yüzeyler arasındaki kimyasal reaksiyon bu alan ile sınırlıdır (Durak 2005, Taylor 1993, Leslie 2003).

1.4.5. Pas ve korozyon önleyiciler

İçten yanmalı motorların paslanmasını önlemek amacıyla yağa ilave katkı maddeleri eklenmektedir. Bu katkı maddeleri polar organik bileşiklerdir. Metal yüzeyle kimyasal reaksiyona girmeden film oluştururlar ve metal yüzeyin su ve hava ile temasını keserler. Bunun sonucunda su buharı ve korozyif ortamdaki asitlerin, motor bileşenlerinin yüzeylerine zarar vermesi önlenmiş olmaktadır (Durak, 2005). Korozyon, önemli motor bileşenlerinin zarar görmesini sağlar ve sızıntıya sebep olabilir. Ayrıca kayan yüzeylerde aşınmayı hızlandırır. Silindirler içerisinde yanma ile oluşan partiküllerin yağın içine girmesi aşınmayı hızlandırmakta ve yağın temas ettiği diğer parçaları da aşındırmaktadır. Korozyon, asidik ürünlerin metal yüzeye erişmeden önce nötralize edilmesi ve korozyif maddelerin yüzeye temas etmesini güçlü tutunma

yeteneğine sahip pasifleştirici bir filmle önlenmesi gibi iki yöntemle en aza indirgenebilmektedir (Taylor, 1993).

Pas ve korozyon önleyici katkı maddeleri; aminler, hayvansal yağlar ve bazı hayvansal yağ asitleri ile sülfonat gibi bileşikler, aktif sülfür, fosfor veya nitrojen içeren organik bileşikler, organik sülfidler, metal tuzları, fosforik asit ve sülfürleşmiş mumlar, bazik silikatlar, nitritler ve molekül ağırlıkları düşük bazik aminler, hidroksilamin gibi bileşiklerden meydana gelmektedir (Taylor, 1993).

1.4.6. Antioksidanlar

Kullanım yerleri göz önüne alındığında yağlar sık sık havayla temas etmektedirler. Bunun sonucunda bir seri kompleks, oksidasyon reaksiyonuna girmektedir. Yağın oksitlenmesi sonucu viskozitesi artmakta, asidik artıklar ve karbonlu maddeler oluşmaktadır. Bu birikintiler bir yalıtkanlık meydana getirdiklerinden motor sıcaklığı artmaktadır. Sonuçta ise piston segmanları gibi motor parçalarının görevlerini tam olarak yerine getirmeyip çeşitli arızalara yol açmaktadır (Durak, 2005). Fenol ve amin bileşenlerinin bir çeşidi anti oksidanlara örnek olarak verilebilir ve anti oksidan derecesi deterjan, alkil salikatların belirli tipleri ile sağlanabilir (Taylor, 1993). Antioksidan bileşikler olarak; sülfür, fosfor ve nitrojen gibi bileşikler içeren organik aminler, sülfidler, hidroksi sülfidler, fenoller gibi maddelerle birlikte çinko, kalay veya baryum gibi bileşikler de kullanılmaktadır (Leslie, 2003).

1.4.7. Deterjanlar ve dispersanlar

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu, karbon ve oksidasyon ürünleri olan çamur, lak ve bazı katı parçacıklar oluşmaktadır. Deterjanlar ve dispersan maddeleri yağ içinde çeşitli sebeplerle meydana gelen bu maddeleri dağıtmak veya süspansiyon haline getirmek için kullanılmaktadır. Böylece gerek yağlama devresinin tıkanmasına ve gerekse piston, segman, subap gibi elemanların yüzeyleri üzerinde çamur veya reçine tabakalarının teşkiline mani olmaktadır (Durak, 2005). Meydana gelen oksidasyon ürünleri, çamur, reçine gibi maddeler yağ kanallarının tıkanmasına, isten dolayı motorlarda jel oluşumunu, yağ pompası girişi ve külbütör muhafazasında ciddi hasarlar meydana getirir (Taylor, 1993). Sülfonik asitlerin baryum ve kalsiyum tuzları, sentetik sülfonik asitler, çeşitli fenolik türevlerin tuzları, baryum, kükürt ve fosfor ihtiva eden

polimerler deterjan katkı maddesi olarak % 2-10 oranlarında motor yağlarında geniş ölçüde kullanılmaktadır (Leslie, 2003). Ancak deterjan katkı maddeleri tortu oluşumunu tam olarak önleyememektedir. Bu nedenle metal içermeyen külsüz katıklar geliştirilmiştir. Bunlar dispersan katkı maddeleridir. Bu katkı maddeleri de polimer esaslı olup, ilave edildikleri madeni yağ içinde düşük sıcaklıkta çalışma şartlarında tortu teşekkülünü önlemekte veya geciktirmektedir. Dispersanların başlıca fonksiyonları çözünürlüğü artırmak, fazla maddeleri askıda tutarak tortu oluşumunu önlemektir. Organik dağıtıcıların asidik maddeleri nötrleştirme özellikleri yoktur (Durak, 2005). Mono-süksinimit, bi-süksinimit ve süksinat esterleri gibi kimyasallar dispersan olarak kullanılmaktadır (Taylor 1993, Leslie 2003,).

1.4.8. Akma noktası düşürücüler

Akma noktası, yağın belirli koşullar altında soğutulduğunda akabildiği en düşük sıcaklıktır. Yağdaki vaks miktarı akma noktasını belirlemektedir. Yağların temel maddesi olan hidrokarbonlar düşük sıcaklıklarda katılaşmaktadırlar. Akma noktası düşürücü katkı maddeleri yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir ve vaks kristallerini modifiye ederek kristal büyümesini engellemiş olurlar. Başka bir deyişle, düşük sıcaklıklarda yağ akışını önleyen vaks kristal yapısının oluşumunu önlemektedir. Yağın tipine bağlı olarak, donma noktası yaklaşık olarak 11°C ila 17°C düşürülebilir. Günümüzde yağların akma noktası -40°C'ye kadar düşürülmüştür. Polimetakrilatlar ve polifümeratlar akma noktası düşürücü katkılarda kullanılan kimyasallardan bazılarıdır (Taylor 1993, Leslie 2003, Durak 2005).

1.4.9. Köpük önleyiciler

Yağlama uygulamaları köpük oluşumuna sebep olan çeşitli sallanmalara maruz kalırlar. Köpüklenmeye; sisteme kaçak olarak sızan hava neden olmaktadır. Hava yağ içinde solüsyon halinde bulunuyorsa sakıncalı değildir. Fakat solüsyon basınç altında ise ve basınç aniden düşürülürse hava bu solüsyondan ayrılarak köpük meydana getirmektedir. Fazla miktardaki köpük, etkin olmayan bir yağlama ile sonuçlanır. Ayrıca, köpürme pompalara zarar vermekte, köpüğün emilmesinden dolayı basınç düşmekte ve güç kaybına neden olmaktadır. Köpük önleyici katkı maddeleri yağın köpürmemesi ve havadan kolayca ayrılması için kullanılmaktadırlar. Bu tip katkılar,

köpük oluşumunu hava kabarcıklarının yağdan kolay ayrılmaları için yüzey tansiyonunu düşürmek suretiyle görev yaparlar. Polisiloksan, polimetil siloksan köpük önleyici kimyasallardan bazılarıdır (Taylor 1993, Durak 2005).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bor bileşikli yağlama ürünleri, endüstriyel yağlama ve motor yağı katkı maddesi olarak geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yapılan çalışmalar; bor katkısının aşınma gerçekleşen sistemlerde verimlilik, iyi film oluşturabilme, yüksek sıcaklık direncine sahip olma ve sistemi kendinden yağlama vb. özelliklerinden dolayı araştırılması ve geliştirilmesi kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.

Braithwaite ve ark., iki yeni özdeş motorun rodaj süresinde aynı şartlarda yaptıkları karşılaştırmalı test çalışmalarında, bu motorların ilkinde motor yağı olarak molibden disülfür süspansiyonu, diğer motorda ise klasik SAE 20W50 motor yağı kullanmışlardır. Deneyler sonucunda aşınma oranları, segman profillerinin belirlenmesi ve segman yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskopu (SEM) ile analizlerini yapmışlardır. Çalışmada, birinci motorun rodaj döneminde katılan molibden disülfür katkısının aşınma mekanizmasının modifikasyonunda etkili olduğu, temas halindeki yüzeylerin metal-metal sürtünmesini azalttığı ifade edilmiştir. Rodaj döneminde geleneksel başlangıç yağları kullanıldığında, yüzey topografyasındaki değişimde meydana gelen adhesif veya abrasif aşınma prosesinden ziyade plastik deformasyon sonucu oluştuğu açıklamıştır. Çalışma sonucunda MoS₂ kullanılan motorda, SAE 20W50 yağı kullanılan motora göre aşınma miktarının ciddi bir şekilde azaldığını ifade etmişlerdir (Braithwaite ve ark., 1999).

Durak ve ark., yaptıkları çalışmalarda; yağlama yağına katkı maddesi olarak borik asit ilavesini araştırmışlardır. Deneylerde sade baz yağ ve hacimce %2 konsantrasyon oranlı borik asit ilaveli yağ karışımı ile 260, 360 ve 460N sabit yüklerde ve 50, 100, 300, 600, 900 ve 1200d/d hızlar parametre olarak belirlemişlerdir. Her bir parametre için 2.5 dakika'lık test süresi boyunca sürtünme katsayılarını ölçmüşlerdir. Yapılan testler 25°C (± 2), yani ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, borik asit ilaveli madeni yağ karışımıyla yapılan deneylerde elde edilen test sonuçlarının tümünde sürtünme katsayılarında önemli düşüşler gözlemlenmiştir. 260N yük altında 50 d/d'da en iyi sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Burada % 44,13'lük bir azalma gözlenirken 360 N yük altında 900d/d'da % 32,43 ve 460N yük altında yine 50d/d'da % 11,63'lük bir azalma gözlenmiştir (Durak ve ark., 2003).

Durak, karter yağı olarak kullanılan madeni yağa eklenen yağ katkı maddelerini, çalışmasında ayrıntılı bir biçimde incelemiştir. Ticari amaçlı satılan çeşitli katkı maddelerinin, sabit yüklü kaymalı yataklardaki sürtünme, aşınma ve yük taşıma

kabiliyetine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, katkı maddesi ilavesiyle yatakta meydana gelen sürtünme ve aşınmayı azaltmak, yağ filminin yük taşıma kapasitesini de artırmak mümkündür. Kullanılan yağ katkı maddesinin karışım oranı, katkı maddesinin cinsine ve yatak çalışma şartlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Yine çalışma sonucunda katkılı yağ karışımıyla aşınma davranışını iyileştirmenin mümkün olduğu belirtilmektedir. Çevre dostu olan kolza yağı gibi bitkisel yağları da yağlama yağlarında sürtünme azaltıcı katkı maddesi olarak kullanmak mümkündür (Durak, 2006).

Düzcükoğlu ve ark., yaptıkları çalışmada; farklı yüklerde ve belirli bir hızda çalışan pin-on disk sisteminde, kontak bölgesinde, film tabakası içerisinde mevcut bulunan borik asit vasıtasıyla giderek artan basınç değerine rağmen kayma sürtünme katsayısında 0.10'dan 0.02 değerine kadar düşme olduğu, bunun ise %80 lik bir azalmaya tekabül ettiği, ayrıca aşınmanın da azaldığı gözlemlenmiştir. (Düzcükoğlu ve ark., 2009)

Erdemir ve ark., yaptıkları çalışmada; bor katkılı yağlayıcıları incelemiştir. Bor katkılı yağların düşük sürtünme ve aşınma sağlamak için kayma yüzeyleri ile çok iyi etkileşime sahip olduğunu görmüşlerdir. Borik asit %0.1 gibi düşük konsantrasyonlarda; yağlar, gresler ve fuellerle karıştığında yağlanmış kayma yüzeyleri altında aşınmayı ve sürtünmeyi azaltıcı yüksek kapasitesinin olduğunu doğrulamışlardır. Bor asitin kayma yüzeyleri ile etkileştiğini belirtmişlerdir. Bu yüzeyleri bor partiküllerinin aşınmaya karşı koruduğunu ve düşük sürtünme sağladığını, ayrıca düşük sürtünme sınır filmleri oluşturduğunu görmüşlerdir (Erdemir ve ark., 2009).

Jiping ve ark., geliştirdikleri özel bir metot ile MoDTC/ZDDP ve ZDDP tribo filmlerinin lokal sürtünme katsayılarını ve çizik (aşınma) derinliğini atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanarak nano boyutta incelemiştir. İki tribo filmde de sürtünme açısından olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Sürtünme katsayısı 0,35'ten 0,16'ya, çizik derinliği ise 60 nanometreden 10 nanometreye kadar düştüğü saptanmıştır. MoDTC/ZDDP tribo filminin ZDDP'ye göre daha düşük bir sürtünme katsayısı meydana getirdiğini (0,084'e karşılık 0,104), ayrıca film kalınlığının da daha ince olduğu (3,2 nm'ye karşılık 6,4 nm) gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlarda MoDTC/ZDDP tribo filminin katı yağlayıcı olarak MoS₂ içerdiği öne sürülmüştür (Jiping ve ark., 2004).

Karabacak Y. E., çalışmasında sürtünme kaybının belirlendiği test aparatı üzerinde bor katkılı yağlama yağları incelenmiştir. Bu amaçla iki tipteki bor katkısı, baz

yağa ayrı ayrı, farklı oranlarda katılmasını incelemiş ve sonuçlar tribofilm, sınır ya da karışık yağlama göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın bir sonucu olarak, deneyler, değişik deney şartları altında bor bileşiklerinin, sürtünme katsayısını %10 ila %50 arasında azalttığını gözlemlenmiştir. Optimum katkı oranlarının, borik asit için %3 ve bor nitrür için %4 olduğu belirtilmektedir. Deneylerinde, ayrıca, 170 kw'lık bir dizel motor kullanılmıştır. Deneylerin sonucunda, borik asit ve bor nitrür katkılı yağların sayesinde yakıt tüketiminde sırasıyla %3,6 ve %2,7 oranında bir azalma olduğu belirtilmektedir (Karabacak, 2013).

Ma ve ark., yaptıkları çalışmada, doymuş borik asit-su solüsyonunda çöken kristalleri ve kontrollü nemde havaya maruz kalan bor oksit yüzeylerini incelemişlerdir. Bu yüzeylerin modül, setlik ve kayma gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Borik asit solüsyonu ve nemli havaya maruz kaldığında oluşan bor oksitteki yüzey katmanlarından çöken kristallerin dış yüzeylerinin mekanik yapılarının sürtünme ve aşınmaya karşı oldukça dirençli olduğu saptanmıştır. Ayrıca aşınma oranlarındaki farklılıktan dolayı, iki yüzeyin benzer olmadığı belirtilmektedir (Ma ve ark., 1999).

Vipper ve ark., motor yağı katkı maddelerinin etkinliğini saptamak için bir traktör diesel motorunda testler yapmışlardır. Testlerde SAE 30 madeni yağına sürtünme iyileştirici katkısı olarak dört farklı madde kullanmışlardır. Bunlar sırasıyla Molibden ditiofosfat, külsüt azot içeren katkı, Molibden disülfür dispersiyonu ve Grafit ultra dispersiyonudur. Bu katkılar sayesinde, sırasıyla %50-60, %25-35, %10-15 ve %5-15 oranlarında sürtünmede iyileşme tespit edilmiştir. Ayrıca katkılı yağların, traktör diesel motoru ile yapılan yakıt sarfiyatı testlerinde ise sırasıyla %2-3, %~1, %0 ve %0 oranlarında düşüş sağladığı belirtilmiştir (Vipper ve ark., 2001).

Waleska ve ark., yaptıkları çalışmada; sınır şartlar altında çeşitli yağlayıcıların sürtünme ve aşınma üzerindeki etkisini, pim-disk (pin-on-disc) yöntemi ve dört top aşınma testi kullanarak araştırmışlardır. Bu deney düzeneklerini, dört hidrokarbon akışkanının sürtünme ve aşınma karakteristiklerini karşılaştırmak için kullanmışlardır. Akışkan olarak dört farklı hidrokarbon akışkanı (iki sentetik ve iki petrol bazlı) ve üç farklı bitki yağı (normal soya yağı, yüksek oleik soya yağı, epoksitlenmiş soya yağı) kullanılmıştır. Soya yağı %25 oleik asit yan zincirleri içermektedir. Yüksek oleik soya yağı ise %85 oranında oleik asit yan zincirleri içermektedir. Çalışmada A, B, C şeklinde üç farklı katkı kullanılmıştır. Organosülfür fosfor aşınma önleyici katkı A, fosfordiyotat B ve amin fosfat ise C olarak adlandırılmıştır. Test sonuçlarına bakıldığında hidrokarbonun moleküler boyutta artması ile sürtünme katsayısının ve aşınmanın

düştüğü görülmüştür. Etkin zincir uzunluğu arttıkça sürtünme ve aşınmanın azaldığı görülmektedir. Ayrıca test edilen üç bitkisel yağ içerisinde oksidasyon stabilitesi en yüksek epoksitlenmiş bitkisel yağ olmuştur. Ancak yine bu yağ aşınma sonuçlarında en kötü sonucu vermiştir. En iyi sonucu veren ise yüksek oleik soya yağı olmuştur. Bitkisel üç yağa daha sonra ağırlıkça %1 oranında A, B, C katkıları eklenmiştir. C, üç yağda da iyi sonuç verirken, A ve B sadece iki doymamış yağda iyi sonuç göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, sınır yağlama koşulları altında yağların performansı üzerinde, baz akışkan ve katkıların kimyasal yapılarının önemi gösterilmiştir. Çalışmalar sonucunda, hem baz akışkanın hem de katkının, ilave edilen katkıların etkinliğinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Waleska ve ark., 2005).

2.1.Bor

Bor elementi periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunur ve atom numarası 5'tir. Kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşan bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Bor toprakta ortalama 10-20 ppm içermekle birlikte, deniz suyunda 0.5-9.6 ppm, tatlı sularda ise 0.01-1.5 ppm aralığındadır. Bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikler olarak daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Yüksek sıcaklıkta bor su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, sıcaklığa ve konsantrasyona bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur.

Bor ürünleri kullanım alanı olarak uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji sektörü, metalurji ve inşaat gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ancak bor ürünlerinin tüketiminin %80'e yakını cam, seramik-frit, tarım ve deterjan sektörlerinde yoğunlaşmıştır.

Bor mineralleri, bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren minerallerdir. Ülkemizde yaygın olarak bulunan bor mineralleri; tinkal, kolemanit ve üleksit'dir. Dünya kolemanit rezervinin tamamına yakını ülkemizde bulunmaktadır (<http://www.etimaden.gov.tr/>).

Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, ABD ve Rusya'da bulunmaktadır. Ülkemiz, dünya toplam bor rezervi sıralamasında %72'lik pay ile ilk sıradadır. Dünyadaki önde gelen bor üreticileri; Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü (Türkiye) ve Rio Tinto (ABD)'dur. Bu iki öncü kuruluş dünya bor üretiminin yaklaşık %70'ini gerçekleştirmektedir.

2.1.1. Bor Bileşikleri

Borun en çok tüketilen türevi rafine bor ürünleridir. Rafine boraks ürünleri (Boraks penta ve dekahidrat, susuz boraks) üretim tesislerinin toplam dünya kurulu kapasitesi 1.600.000 ton dolayında olup, bunun 452.000 tonu Türkiye'de bulunmaktadır. Türkiye'nin boraks penta ve dekahidrat üretimi ise yıllık 135.000 ton B_2O_3 düzeyindedir; bu üretim düzeyi dünya üretiminin %23'ünü oluşturmaktadır. Dünya borik asit üretim kapasitesi ise 800.000 ton dolayındadır. Kurulu kapasitenin %25'i US boraks'a, %11'i Eti Holding AŞ'ye aittir. Türkiye'nin borik asit üretimi 30.000 ton B_2O_3 dolayında olup, dünya üretiminin ancak %11'ini oluşturmaktadır. (D.P.T.,2000)

Çizelge 2.1. Rafine Bor bileşikleri

Ürün adı	Formülül	B_2O_3 (%)
Boraks penhidrat	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	47,8
Boraks dekahidrat	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	36,5
Susuz boraks	$Na_2B_4O_7$	69,3
Borik asit	H_3BO_3	56,5
Susuz borik asit	B_2O_3	100,0
Sodyum perborat	$NaBO_3 \cdot 4H_2O$	22,0
Sodyum metaborat	$Na_2B_2O_4 \cdot 4H_2O$	64,2
Sodyum oksiborat	$Na_2B_8O_{13}$	81,8

2.1.2. Borik Asit

Borik asit, diğerk isimleriyle borasis asit, ortoborik asit ya da acidyum boryum; genellikle antiseptik, böcek ilacı ve koku gidericilerde kullanılan beyaz kristal renkli, suda çözünen bir inorganik asittir. Hammaddesi olan boraks'ın en geniş kaynaklar ülkemizde bulunan borik asit, sülfürik asidin yan ürünü olarak ortaya çıkmıştır.

Kristal yapılu bir madde olan borik asit (H_3BO_3), moleköl ağırlığı 61,83 gr/mol, B_2O_3 içeriğı %56,3, ergime noktası 169°C, özgül ağırlığı 1,44, oluşum ısısı -1089 kJ/mol, çözüme ısısı 22,2 kJ/mol'dür. Oda sıcaklığında sudaki çözünlüğü azdır, fakat sıcaklık yükseldikçe çözünlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristal hale getirmek için genellikle doymun çözeltiliyi 80°C'den 40°C'ye soğutma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit kullanım alanları çok çeşitli olmasına karşın başlıca; cam, seramik ve cam yünü sanayisinde kullanılmaktadır. Genellikle borik asit, bor minerallerinin sülfürik asit ile asitlendirilmesi ile elde edilmektedir. Türkiye'de borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Etibor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından yapılmaktadır.

2.1.3. Borik Asit'in Bulunuşu

Borik asit çoğu zaman çözeltilerde bulunur fakat bazen de mineral halde bulunabilir. Buhar püskürten volkanların yakınında bulunabilen borik asit, laboratuarlarda bor halojenürlerin hidrolizinden elde edilir. Ticari maksatlı borik asit, boraks çözeltilisine klörür veya Sülfürik Asit ilavesiyle elde edilir. Ticari borik asit %99.9 saflıktadır.

2.1.4. Borik Asit'in Kullanım Alanları

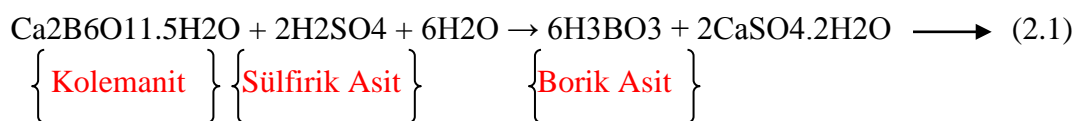
Yanmaz kumaşlarda, ısıya dayanıklı camlarda, elektroliz banyolarında, deri üretiminde, porselen parlatmada ve çelikleri sertleştiricilerde kullanılan borik asit son zamanlarda yağlayıcı katkı maddelerine bileşen olarak da kullanılmaktadır. Gargaralarda, göz damlalarında, cilt losyonları ve kozmetiklerde sulu çözeltileri

kullanılmaktadır. Borik asit ve tuzları, birçok ticari böcek öldürücü ve ahşap koruyucularının bileşeni olarak da kullanılır. İlaç sanayinde ve kozmetik sektöründe borik asit pH tamponu, orta derecede antiseptik ajan ve emülsifiye edici olarak kullanılır. Ayrıca merhemlerde, banyo tuzlarında, kremlerde ve şampuanlarda da kullanılmaktadır. Borik asit ilaçlı sabunlara ilave maddesi olarak eklenmektedir. Isıya dayanıklı, yüzey sertliği yüksek camların üretiminde kullanılır. Seramiklerin yüzeylerindeki kaplama malzemelerinin akışkanlıklarını artırıp, yoğunluklarını ve doymunlaşma ısılarını düşürmek içinde borik asit kullanılmaktadır. Gübrelerde kullanılan ortoborat yapımında kullanılan borik asit, istenmeyen otların temizlenmesi için tarım ilacı yapımında da kullanılmaktadır. Elektrolit olarak nikel kaplamada kullanılır. Sodyum oktoborat olarak bilinen borik asit ve borakstan elde edilen çözelti ile işlem görmüş ahşap malzemeler yavaş yavaş kurutulduğunda, bozulmadan ve çürümeden uzun süre kullanılabilir. Borik asit bunlardan başka, kereste, kauçuk, deri ve nişasta ürünlerinde koruyucu olarak kullanılan bir maddedir.

2.1.5. Borik Asit'in Üretim Yöntemleri

Kolemanitten borik asit üretimi; Türkiye'de kolemanitten üretilen borik asitin üretimi Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğünde yapılmaktadır. Üretim tekniği temelde, kolemanitin sülfürik asit ile reaksiyona sokulmasından ibarettir. Reaksiyon sonucu jips ve borik asit oluşur. Oluşan jips çevre kirliliğine neden olmaktadır.

Ülkemizde, kolemanitin ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$) sülfürik asit (H_2SO_4) ile reaksiyonu sonucu üretilen borik asit eldesi aşağıdaki (katı-sıvı) reaksiyonda gösterildiği gibi gerçekleşmektedir.



Üretimde, Kolemanitin boyutu 0,2mm'den küçük olacak şekilde, değirmenlerde öğütülür. Daha sonra sülfürik asitle reaksiyona sokularak çözeltiliye alınır. Bu reaksiyon 80-100°C'de gerçekleşmektedir.

Filtrasyon öncesinde kolemanit, sülfürik asitle çözeltiliye alındıktan sonra, kimyasal reaksiyon sonucunda jips çamuru oluşmaktadır. Jips çamurunun ortamdaki

uzaklaştırmak için çözeltiyi basınçlı filtrelerde süzmek gerekir. Burada iki aşamalı süzme yapılır. İlk aşamada 15-20 dk. boyunca tüm çözelti süzülür. İkinci aşamada ise başka bir basınçlı filterede 3 saate yakın süzülür. Son olarak elde edilen jips çamuru artık havuzuna gönderilir.

Kristalizasyon işleminde elde edilen kolemanit çözeltisi, sabit bir debi ile kristalizatöre iletilir. Daha sonra çözelti, özel spreylemlerle püskürtülerek kristalizatöre yayılır. Böylece, oluşan kristallerin boyutu arttırılarak, işlemin daha verimli devam etmesi sağlanmış olur.

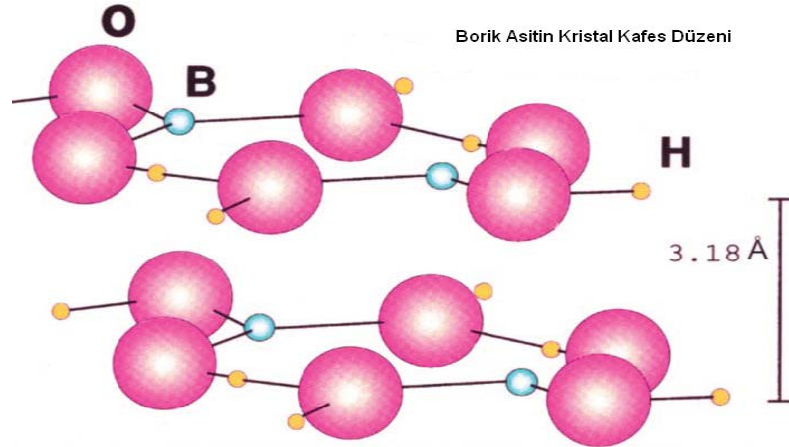
Santrifüj aşamasında çözelti kristalizatöre 80-90°C sıcaklıkta girdikten sonra 40-45°C sıcaklıkta çıkararak santrifüje beslenir. Burada çözelti kristallerinden ayrılır.

Kurutma işleminden önce kristaller bir miktar nemlidir. Bu şekilde satış işlemine sunulamayacağı için akışkanın yataklı kurutucularla kurutulması gerekmektedir. Kurutucu içine alınan hava belli bir sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra, malzeme alttan ısıtılarak kurutulması sağlanır. Son olarak kurutucudan çıkan ürün torbalanarak satılır.

2.1.6. Borik Asit ve Yağlayıcı Olarak Kullanılması

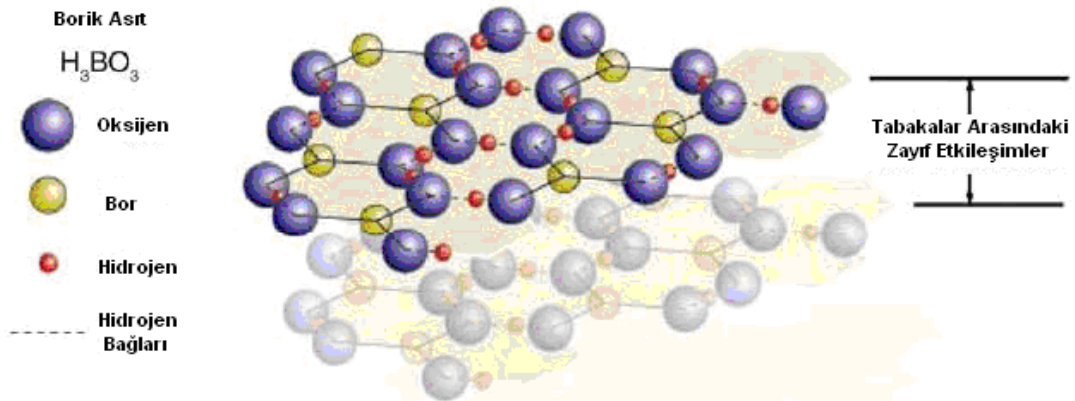
Tribolojik özellikler açısından bor bileşikleri benzersiz bir kombinasyona sahiptir. Ayrıca çevreye ve sistem içerisinde çalışan makine elemanlarına verdiği zararın az olduğu düşünülmektedir (Baldwin, 1977). Bu nedenlerden dolayı bor esaslı yağlayıcılar ve yağ katkı maddeleri ile ilgili araştırmalar son yıllarda artış göstermektedir. Bor bileşikleri özellikle sınır yağlama şartlarında yağ katkısı, katı yağlayıcı ve yüzey kaplayıcı maddesi olarak incelenmiştir. Nemli ortamlardaki bor oksit bileşikleri havadaki su ile reaksiyona girerek borik asit oluşturmak suretiyle katı yağlayıcı olarak görev yaparlar. Oluşan borik asidin moleküler düzeni molibden disülfite benzeyen tabakalı bir yapıda olduğundan ve bu tabakalar arasında zayıf bir kimyasal bağ bulunduğundan dolayı söz konusu tabakalar bir biri üzerinden rahatça kayar. Bu da sürtünmenin azalması demektir (Lovell, 2006).

Uygulamada yağlayıcı ve yağ katkı maddesi olarak en çok kullanılan bor bileşikleri hegzagonal bor nitür ve borik asittir. Her iki bileşikte tabakalı bir moleküler yapıya sahiptir (Şekil 2.1.).



Renksiz kristal veya toz şeklinde bulunan borik asit suda çözünür. Çevreye herhangi bir zararı olmamakla birlikte takım tezgahlarında kesme sırasında soğutucu olarak kullanılır. Kesme esnasında katı bölgeye gönderilen borik asit tabakalı yapısından dolayı sürtünme kuvvetini azaltarak takımı korur. Borik asit takımların aşınmasını azaltır. Alüminyum ve çeliğe uygundur (Damera, 2008).

Bor, hidrojen ve oksijen atomları birbirine güçlü bir şekilde bağlanarak tabakaları oluştururlar. Belirli bir mesafede aralarındaki bu iki tabakayı birbirine bağlayan bağ Van der Waals bağlarıdır (Şekil 2.2.). Bu tabakalı yapısı aradaki zayıf bağın kolayca kopması suretiyle tabakalar birbiri üzerinden rahatça kayar. Oluşan bu tabakalı yapı sürtünme ve aşınmanın azalmasını sağlar (Erdemir, 2009).



Borik asit iyi bir katı yağlayıcı olmakla birlikte, mikrometre ya da nanometre düzeyinde farklı toz boyutlarında ve çeşitli oranlarda tüm sıvı yağlara ve greslere katkı olarak katılabilir. Bunun üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Erdemir 1995, Erdemir 2009). Borik asit düşük yoğunluğu nedeniyle, katıldığı yağın içerisinde uzun süre dağılımını koruyup katkı özelliğini devam ettirebilir (Erdemir, 2009).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ticari amaçlı kullanılan bor katkılı yağlayıcıların, oda sıcaklığı 50°C ve 80°C yağ sıcaklığında katkı olarak eklenmesiyle yağlama performanslarının nasıl değişim gösterdiği incelenmiştir. Sürtünme katsayısı, aşınma gibi tribolojik özelliklerinin araştırılması için Bilye-Disk (ball on disc) test düzeneğinde deneysel çalışma yapılmıştır. İçten yanmalı motor parçalarında meydana gelen sürtünme ve aşınmanın en az seviyelere indirilmesi ve bunların sonucunda oluşan maddi ve mekanik kayıpların minimum seviyeye düşürülmesi amaçlanmıştır. Sıhatsiz bir yağlama sonucunda motor parçalarındaki malzeme kayıpları ve bu malzemelerin onarım veya değişimi düşünüldüğünde bu kayıpların ülke ekonomisine verdiği zararlar önemsenmelidir. Bu bakımdan yağlama yağına sıvılaştırılmış bor katkısı eklenerek motor parçalarının ömürlerinin uzatılması ve bunun sonucu olarak motor performansının uzun süreler etkin olması amaçlanmıştır.

Deneysel olarak sürtünme, aşınma gibi tribolojik değerlerin belirlenmesi genellikle model deney düzenekleri üzerinde yapılmaktadır. Aşınma ve sürtünme dirençlerinin ölçümünde genel olarak Pim-Disk (Pin on disc) veya Bilye-Disk (Ball on disc) deney test düzeneği kullanılmaktadır. Bu test düzeneklerinde bağlı hareket, yükleme şekli, yükleme aralığı, yük, hız aralığı, numune şekli ve temas ettiği yüzeyin boyutları, ortam şartları parametre olarak belirlenebilmektedir. Bu deney düzenekleri oldukça basit, universal ve ekonomik olduklarından birçok hareketli makine elemanlarının, fren balatalarının ve farklı yağlayıcıların tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Motor karter yağlayıcısı olarak standart SAE 10W40 madeni yağ kullanılmıştır. Kullanılan madeni yağ çoğu motor üreticilerinin ve endüstriyel standartların gereksinimlerini karşılamaktadır. Bu yağın özellikleri Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir (<http://www.opet.com.tr>).

Çizelge 3.1. 10W40 Madeni yağın tipik özellikleri

Yoğunluk	15°C'de →	0.8755 kg/lit
Viskozite	40°C 'de →	88.44 cSt
Viskozite	100°C'de →	13.1 cSt
Viskozite İndeksi		148
Parlama Noktası		230°C
Akma Noktası		(-45°C)

Bilye-Disk deney test düzeneğinde, aşınma numunesi olarak rulmanlarda kullanılan 100Cr6 çelik bilye kullanılmıştır. Bu bilyeler rulman türlerinin çeşitli kısımlarının yapımında kullanılan çelik malzemedir. Rulmanlarda yer yer meydana gelen çok yüksek çekme, basınç, devamlı titreşim ve her bölgesinden aşınma etkilerini karşılamak durumundadır. Bu nedenle özel kimyasal bileşimin yanında, tam sertleştirme ve yüzey serleştirme işlemlerine de tabi tutulmaktadır. Kullanım alanları; bilyeli yataklar, röleli yataklar, iğneli yataklar, özel makara, ray tekerleği, rulman, bilye, role, halkalar, tablalar, yuvarlanmaya ve kaymaya çalışan parçalar olarak sıralanabilir. Bilye-Disk deney düzeneğinde kullanılan çelik bilyenin teknik özellikleri Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. 100Cr6 çelik bilye teknik özellikleri

Malzeme No.	DIN	SAE / AISI	C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo
13.505	100 Cr6	6440K	0.90-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	0.030	0.025	1.35-1.60	-

Deney test düzeneğinde iki farklı disk kullanılmıştır. İlk olarak kimyasal bileşimi Çizelge 3.3.'de verilen, önemli bir endüstriyel kalitesi olan AISI 8620 çeliğinden hazırlanan 120mm çapında 16mm kalınlığındaki disk kullanılmıştır (Şekil 3.1.). Deneyde kullanılan bu disk talaşlı imalat ile işlendikten sonra yüzeyleri sementasyon ve sertleştirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Yüzey sertliği 56 HRC olarak tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri ortalama 0,20-0,30µm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 3.3. AISI 8620 sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.17-0.23	0.15-0.40	0.60-0.90	0.35	0.35	0.35-0.65	0.15-0.25	0.40-0.70



Şekil 3.1. AISI 8620 Sementasyon Çeliği

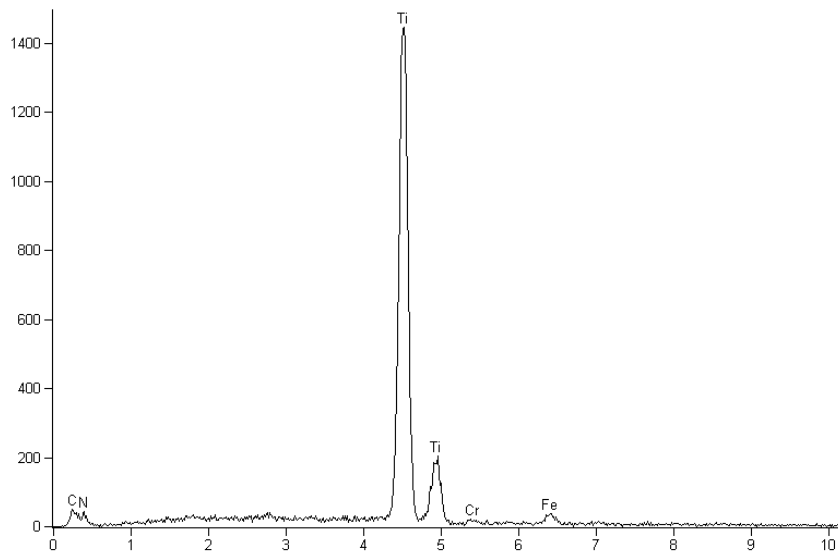
İkinci disk malzemesi olarak ise PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi) tekniği ile TiN (Titanyum nitrür) kaplanmış soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Kalkan yapmış olduğu çalışmasında, PVD-Kadodik Ark metodu ile TiN, CrN ve CrN/TiN kaplanmış, plazma nitrasyon yapılmış ve kaplanmamış DIN 1.2379 Soğuk İş Takım çeliğinin aşınma performansları pin-on disk test cihazında (Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Triboloji Laboratuvarı), kuru sürtünme çalışma şartlarında incelenmiştir. Sonuç olarak, pin-on disk deney test cihazında çalışma şartlarında yapılan deneylerde, PVD yöntemi ile kaplanmış numunelerin diğer numunelere göre aşınma miktarı ve aşınma oranlarında azalma, numunelerin yüzeyinde oluşan abrasif çizilmelerin azaldığı tespit edilmiştir. (Kalkan, 2008) Fiziksel buhar çökertme yöntemi, vakum altında bulundurulmuş malzemelerin buharlaştırılarak ve sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ile kaplanacak olan ana malzeme yüzeyine (atomsal ve iyonik olarak) biriktirilmesi esasına dayanır (Hazar, 2004). TiN kaplamanın çok önemli faydaları bulunmaktadır. Son zamanlarda gelişen teknolojiyle modern araç motorlarının silindir yüzeyleri TiN kaplanmaktadır. Yüksek sertlik ve aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklık mukavemeti TiN kaplamanın bazı önemli özelliklerindedir. Deneylerde kullanılan TiN kaplanmış soğuk iş takım çeliğinin (Disk-2) kimyasal bileşimi Çizelge 3.4.'de, XRD görüntüsü Şekil 3.3.'te verilmiştir (Kalkan, 2008). Şekil 3.2.'de görülen Disk-2 120mm çapında 15mm kalınlığındadır ve yüzey pürüzlülük değerleri ortalama 0,32-0,45µm olarak ölçülmüştür. Sertlik değeri 3500HV'dir.

Çizelge 3.4. TiN kaplanmış DIN 1.2379 Soğuk iş takım çeliğinin kimyasal analizi

ISO/DIN	AISI	C	Si	Mn	V	Mo	Cr
1,2379	D2	1,55	0,3	0,4	0,8	0,8	11,8



Şekil 3.2. PVD Tekniği ile TiN Kaplanmış Soğuk İş Takım Çeliği



Şekil 3.3 TiN kaplanmış deney numunesi XRD görüntüsü (Kalkan, 2008)

Deneylerde kullanılan Bormax®, sıvılaştırılmış bor katkısının içeriği gizlidir. Bu katkının aşınmayı belirli bir oran düşürdüğü, yakıt sarfiyatını azalttığı ve motor ömrünü uzattığı üretici firma tarafından öne sürülmektedir. Borik asit çözeltisi olduğu ve içerisinde bir miktar su barındırdığı verilen bilgiler arasındadır. Araştırma sonuçlarında

Bormax® katkısının EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) sonuçları incelenmiştir (Şekil4.3.). Bormax® içerisinde %0,5 borik asit olduğu saptanmıştır. Burada alınan test numunesi içerisinde bulunan elementlerin isimleri ve oranları verilmektedir.

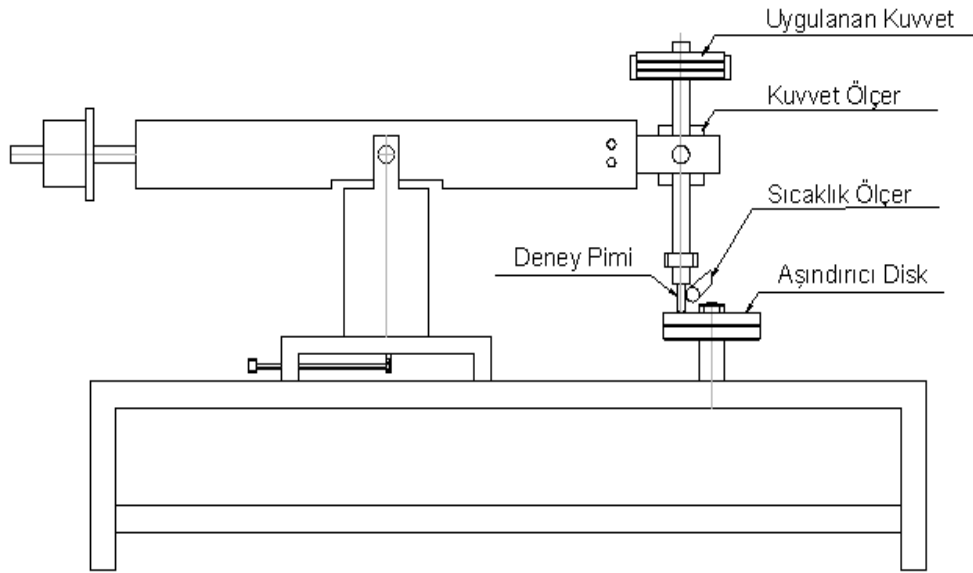
Sıvılaştırılmış bor katkılı madeni yağın tribolojik özelliklerinin incelenmesi için Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Aşınma Laboratuvarı'nda bulunan Bilye-Disk deney düzeneğinden faydalanılmıştır. Aşınma cihazının parçaları; 2,2 kW' lık AC motor, 2,2 kW' lık Delta marka devir ayarlayıcı, numunenin üzerinde sürtüdüğü disk, destekleme kolu, pens mekanizması, tabla, kızak mekanizması, ağırlıkları dengeleme parçası, değişken ağırlıklar, yük hücresi verilerin bilgisayara aktarımını sağlayan karttan oluşmaktadır. Bu deney düzeneği Şekil 3.4., Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'da görülmektedir.



Şekil 3.4. Bilye disk deney test düzeneği



Şekil 3.5. Bilye disk deney seti

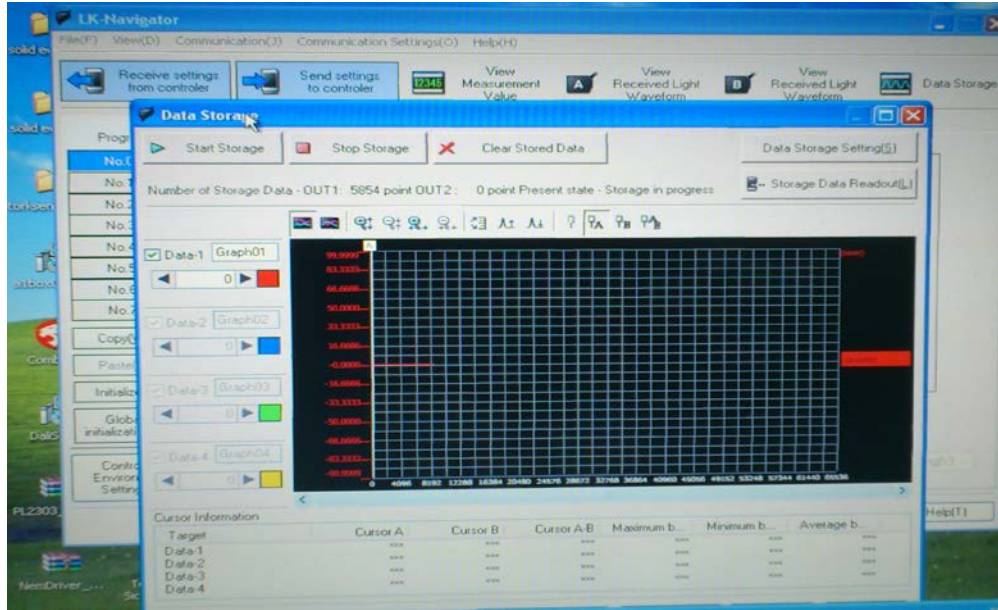


Şekil 3.6. Bilye disk deney test düzeneği şematik görünümü (Kalkan, 2008)

Deney test düzeneğinde, bilye ve disk üzerindeki anlık derinlik Keyence marka lazer (Şekil 3.7.), LK-Navigator arayüz programı (Şekil 3.8.) vasıtasıyla kaydedilmiştir. Elde edilen değerler, arayüz programına μm birimi olarak alınmış ve bu programın özelliği vasıtasıyla dalga genlikleri tek bir ortalamaya dönüştürülmüştür. Lazerin ışığı bilyenin bağlı olduğu eksen üzerindeki mil üzerine düşürülmüş ve test düzeneği etkileşim noktasından hassas bir şekilde ölçülmüştür. Lazer anlık derinlik ölçümü 50mm'ye kadar ulaşabilmektedir.



Şekil 3.7. Lazer mesafe ölçüm cihazı

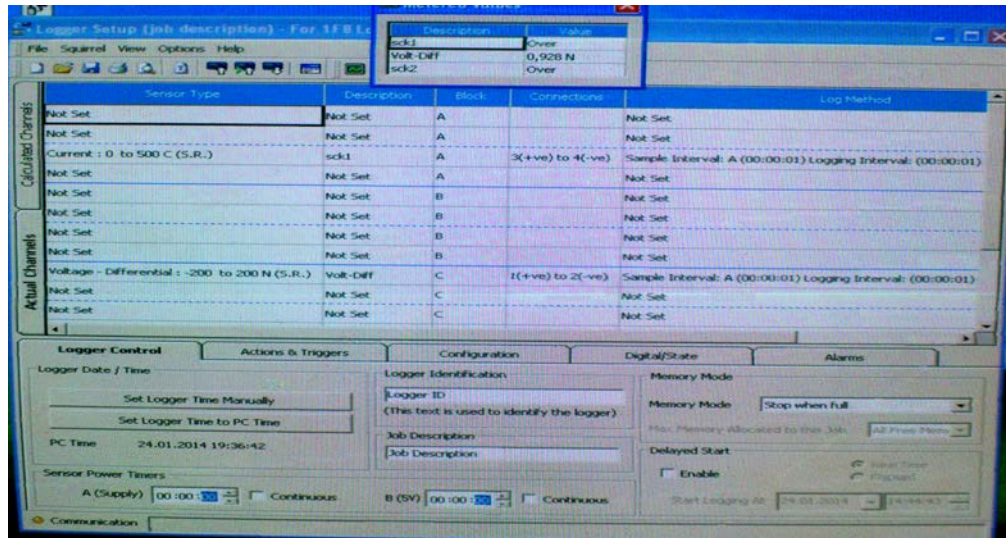


Şekil 3.8. LK-Navigator program arayüzü

Sürtünme katsayısı hesabı çok yönlü, genel amaçlı, 8 adet analog girişine sahip Squirrel data logger (Şekil 3.9.) ile kayıt altına alınmış ve SquirrelView arayüz programı (Şekil 3.10.) kullanılarak saniyede 10 değer okuma kaydedilmiştir.



Şekil 3.9. Squirrel data logger



Şekil 3.10. SquirrelView program arayüzü

Deneylerde kullanılan madeni yağ ve bor katkılı madeni yağın viskoziteleri sıcaklıkla değişim göstermektedir. Kullanılan Bilye-Disk deney test cihazında, harici kontrol ünitesi bulunan rezistanslı bir yağ ısıtma sistemi bulunmaktadır. Bu ısıtma sistemi ile beraber, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda, madeni ve bor katkılı madeni yağlarla sürtünme deneyleri yapılırken, sistemde bulunan termometre ile yağların sıcaklığı sürekli kontrol edilmiştir. Deneylerin her bir sıcaklıktaki test sürelerince, yağ sıcaklıklarının sabit kalması bu termostatlı ısıtma sistemi ile sağlanmıştır.

Aşınma sonrası bilye aseton sıvısı ile temizlenerek 0,0001gr hassasiyetindeki elektronik terazi (Şekil 3.11.) ile ağırlık kaybı ölçülmüştür. Sementasyon çeliği olan Disk-1 hem bilyede hem de disk üzerinde aşınma meydana getirdiği için disk

tartılmıştır. Ancak TiN kaplanmış soğuk iş takım çeliği olan Disk-2'de en ufak aşınma belirtisi görülmemiştir.



Şekil 3.11. Hassas Terazi (0,0001gr hassasiyetli)

3.1. Deney Prosedürü

Bu çalışmada, ilk olarak AISI 8620 sementasyon çelik diski (Disk-1) için 2,5 m/s ve 3,5 m/s hızlarda ve 60N yükte, oda sıcaklığı, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda 10W40 madeni yağ ve %10 Bormax® katkılı madeni yağ ile aynı yağlama rejiminde farklı deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney süresi Disk-1 için 12000 m olarak belirlenmiştir.

İkinci deney diski olarak kullanılan TiN kaplanmış soğuk iş takım çeliği (Disk-2) için ise, 2,5 m/s ve 3,5 m/s hızlarda, 60N yükte, oda sıcaklığı, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda 10W40 madeni yağ ve %10 Bormax® katkılı madeni yağ için farklı deneyler yapılmış ve deney süresi 12000 m olarak belirlenmiştir (Çizelge 3.4.).

Çizelge 3.4. Deneysel Parametreleri

Kullanılan-Disk	Yük	Hız-1	Hız-2	Mesafe	Sıcaklık
Disk-1 (AISI 8620)	60 N	2,5 m/s	3,5 m/s	12000 m	(Oda-50-80)°C
Disk-2 (TiN Kaplama)	60 N	2,5 m/s	3,5 m/s	12000 m	(Oda-50-80)°C

İlk aşamada; 1. Disk deney düzeneğinde, ticari olarak kullanılan 10W40 madeni yağ ile oda sıcaklığında ($25^{\circ}\text{C} \pm 2$) çalıştırılmıştır. İkinci deneyde ise harici ısıtıcı ile madeni yağ 50°C 'ye kadar ısıtılmıştır. Bu ısıya ulaşıldıktan sonra deneye başlanmıştır. Deney esnasında madeni yağın ısı 45°C 'ye düştüğünde harici ısıtıcı devreye girmiş, ısı değeri 55°C 'ye ulaştıktan sonra otomatik olarak devreden çıkmıştır. Üçüncü deney öncesinde haznedeki madeni yağ boşaltılarak yenisiyle değiştirilmiştir. Daha sonra madeni yağ 80°C 'ye kadar ısıtılmış ve ısıtıcı devre dışı bırakılarak deney yapılmıştır. Madeni yağın ısı deney esnasında 75°C 'ye düştüğünde ısıtıcı devreye girerek madeni yağın ısını 85°C 'ye çıkarmış ve devreden çıkmıştır.

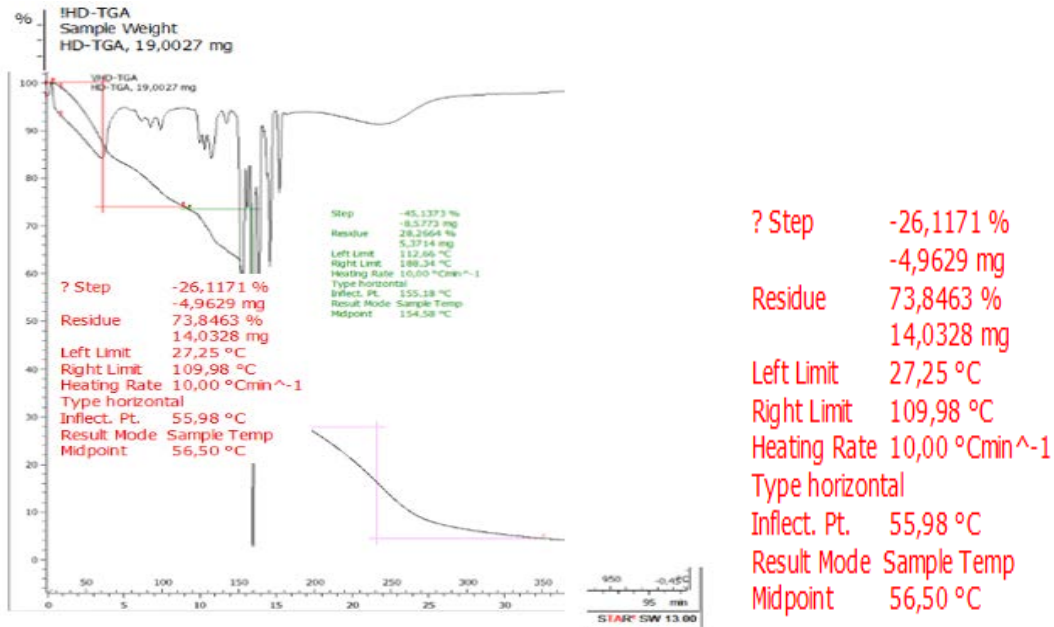
İkinci aşamada ise sıvılaştırılmış bor katkısı %10 oranında madeni yağa eklenmiş ve deney test düzeneği boşta 20 dakika karışması için çalıştırılmıştır. Daha sonra ilk deney oda sıcaklığında ($20^{\circ}\text{C} \pm 2$) gerçekleştirilmiştir. İkinci deneyde ise %10 oranında bor katkılı madeni yağın ısı harici ısıtıcı ile 50°C 'ye yükseltilecek deney tekrar edilmiştir. Deney esnasında bor katkılı madeni yağın ısı 45°C 'ye düştüğünde harici ısıtıcı devreye girmiş, ısı 55°C 'ye ulaştıktan sonra otomatik olarak devreden çıkmıştır. Üçüncü deney öncesinde haznedeki bor katkılı madeni yağ boşaltılmış ve yeni karışım oluşturularak deney test düzeneği boşta 20dk karışması için çalıştırılmıştır. Daha sonra bor katkılı madeni yağ 80°C 'ye kadar ısıtılmış ve ısıtıcı devre dışı kalarak deneye başlanmıştır. Bor katkılı madeni yağın ısı deney esnasında 75°C 'ye düştüğünde ısıtıcı devreye girerek karışımın ısını 85°C 'ye çıkarmış ve devreden çıkmıştır. Tüm deneyler en az üçer defa tekrar edilmiş ve sonuç olarak ortalamaları alınıp değerlendirilmiştir. Her sıcaklık için farklı karışım hazırlanmış ve yenisiyle değiştirilerek tekrar edilmiştir. Ayrıca her bir deney için yeni bilye numunesi kullanılmıştır.

Deney sonrası bilye ve disk yüzeylerindeki değişimleri ve meydana gelen aşınma tiplerini görebilmek için, aşınan yüzeyler mikroskopta incelenmiş ve SEM'leri çekilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarda öncelikle, Bilye-Disk deney test düzeneğinde bilye olarak 100Cr6 çelik bilye, disk olarak ise AISI 8620 sementasyon çeliği (Disk-1) kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde Disk-1 yüzeyinin oldukça aşındığı saptanmıştır. İkinci bir disk olarak yüzey sertliği oldukça fazla olan PVD yöntemiyle TiN kaplanmış soğuk iş takım çeliğinin (Disk-2) kullanılma nedeni de aşınmanın yalnız bilye üzerinde olması istegindedir. İkinci diskin kullanılmasıyla disk üzerindeki aşınma meydana gelmemiş ve bilye ağırlığında, sürtünme katsayısı değerleri paralelinde aşınma miktarına bağlı olarak ağırlık kayıpları elde edilmiştir.

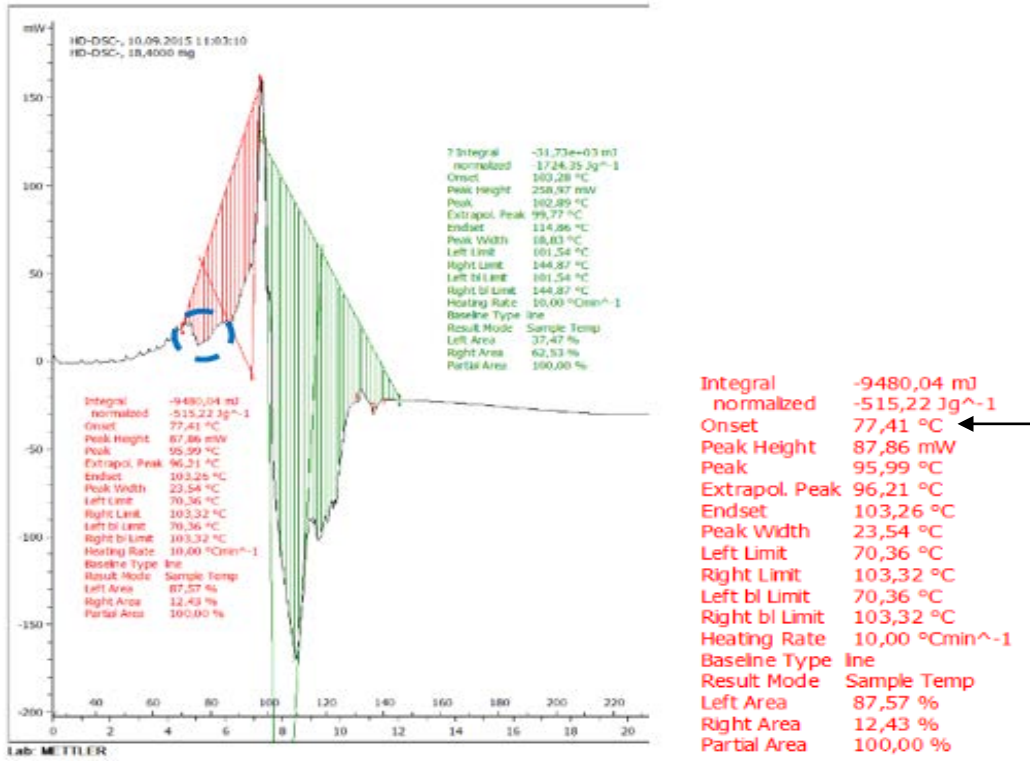
Yapılan çalışmada yağ katkısı olarak kullanılan Bormax® ve buna benzer katkıların, motor soğuk iken katıldığında ve belirli sıcaklıklarda katıldığında aşınma performanslarına ne gibi etkiler gösterdiği saptanmıştır. Bu ve buna benzer katkılar kimi zaman, katkı oranları, karışım zamanı ve karışım özellikleri belirlenemez ise faydadan ziyade sisteme zarar verebilmektedir. Özel olarak hazırlanan borik asit katkılı ürünün Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ve Differential Scanning Calorimetry (DSC) analizleri 20°C/min ısıtma hızlarında numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. TGA ve DSC değerleri Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Bormax® katkı maddesinin TGA sonuçları

TGA sonuçlarına bakıldığında alınan numunenin 27,25°C ile 109,98°C arasında %26,1171 oranında bir kayıp olduğu görülmektedir. Karışım içerisindeki su ve benzeri

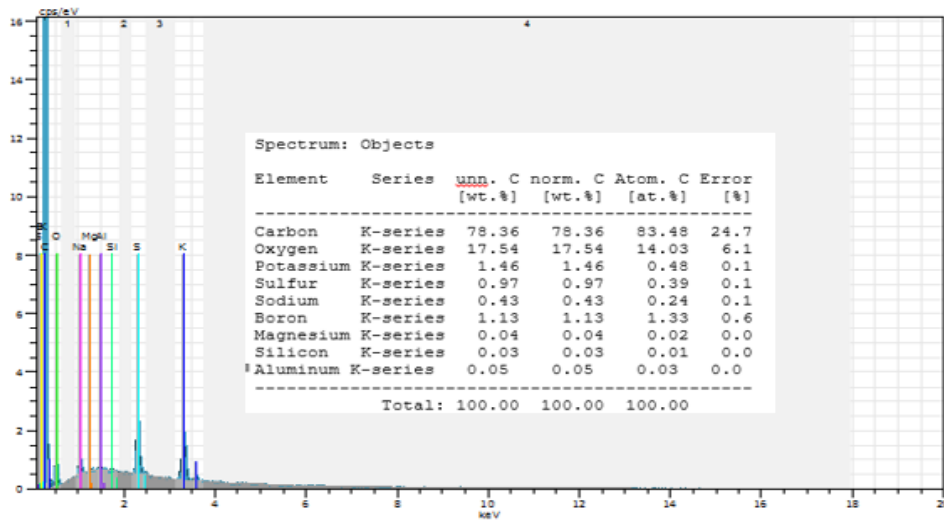
maddelerin bu sıcaklıklar arasında dönüşüm sağladığı düşünülmektedir. Sıcaklığın artışı ile birlikte katkı içerisinde bulunan su ve türevi etken maddeler sistem içerisinde uzaklaştığı görülmektedir. Nitekim deney sonuçlarında da sıcaklığın etkisi ile katkı kullanılan deneylerde sonuçlar daha iyi değerlere ulaşmaktadır. Fakat yaklaşık 110°C'den sonra bozulmanın çok hızlı bir şekilde gerçekleştiği TGA sonuçlarında görülmektedir.



Şekil 4.2. Bormax® katkı maddesinin DSC sonuçları

DSC sonuçlarına bakıldığında alınan numunenin proses hızına bağlı olarak neredeyse sabit olan değerler daha ince bir pik göstermektedir (Şekil 4.2.). Bu pik değeri, 77,41°C'de aktivasyon enerjisi olduğu görülmektedir. Burada Bormax® ticari katkısının bu sıcaklık değerine ulaştığında bir dönüşüme uğradığı ve borik asit oluşturduğu düşünülmektedir.

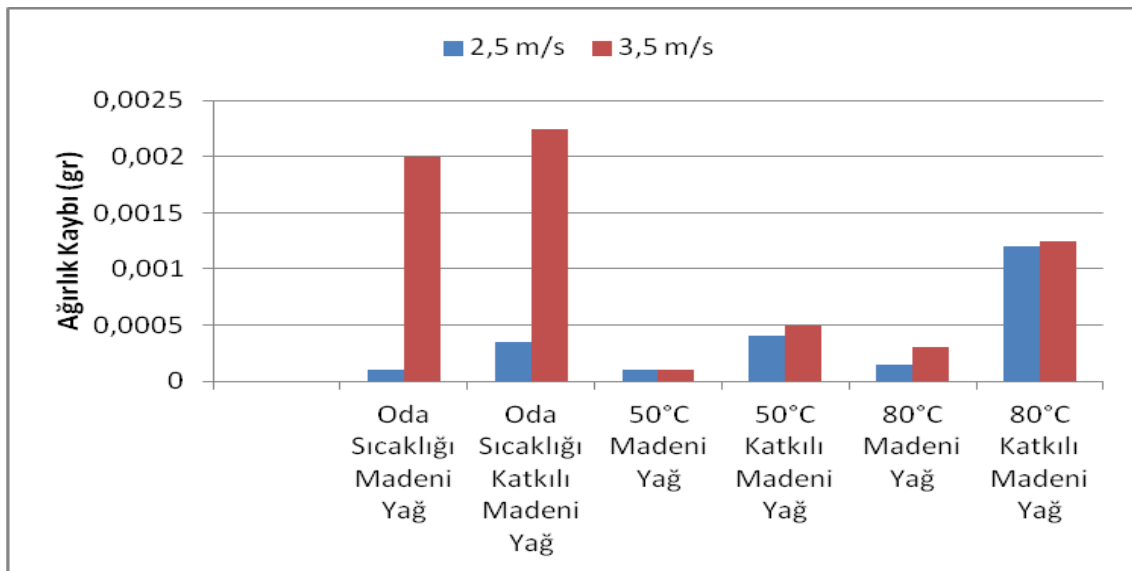
Şekil 4.3.'de Bormax® katkısının EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) sonuçları görülmektedir. Burada alınan test numunesi içerisindeki elementlerin isimleri ve oranları verilmektedir. Bormax® katkısı hazırlanırken 200ml içerisine %0,6 boron ilave edildiği EDS sonuçlarında görülmektedir.



Şekil 4.3. Bormax katkısının EDS sonuçları

4.1. Bilye Ağırlık Kaybı

Disk-1 kullanılan deneylerde, sabit kayma mesafesi, aynı yük ve iki farklı çevre hızında elde edilen bilye ağırlık kayıpları Şekil 4.4.'de verilmiştir. Şekil 3.1. incelendiği zaman Disk-1 kullanılan tüm deney şartlarında 2,5 m/s hızda disk üzerinde daha fazla aşınma görülürken, 3,5 m/s hızlarda ise bilye üzerindeki aşınmalar daha fazla olmuştur.

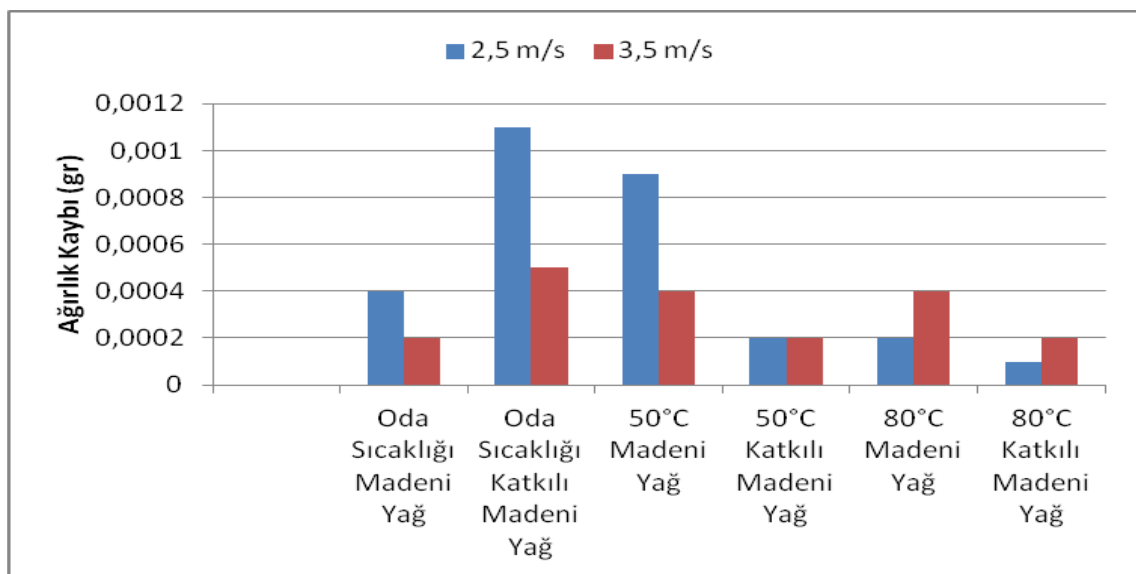


Şekil 4.4. Disk-1'de kullanılan bilyenin ağırlık kaybı

Disk-2 kullanılan deneylerde, sabit kayma mesafesi, aynı yük ve iki farklı çevre hızında elde edilen bilye ağırlık kayıpları Şekil 4.5.'de verilmiştir. İkinci deney diskisi olan Disk-2 kullanılmasıyla aşınma disk üzerinde meydana gelmemiş ve aşınmanın bilye üzerinde oluşması sağlanmıştır.

Sıcaklık bir maddenin moleküllerinin kinetik enerjisinin bir ölçüsüdür, dolayısıyla sıcaklık artışı moleküler düzeydeki hareket yada titreşim enerjisinin de artışı demektir (Durak, 2006). Sıcaklığın artışıyla birlikte madeni yağın ve %10 oranındaki katkılı madeni yağın kullanıldığı deneylerde bilye ağırlık kayıpları düşüş göstermektedir. Burada, sıcaklığın artmasıyla birlikte yağ filmi moleküllerinin sıcaklıklarının, dolayısıyla hareketlerinin artması ve sonuç olarak yağın viskozitesinde önemli ölçüde düşüş gerçekleşmesi, ayrıca yağın incilmesi etken gösterilebilir. Yine madeni yağa sabit oranda eklenen bor katkısının, sıcaklığın artışıyla birlikte ağırlık kaybındaki olumlu etkisi Şekil 4.5.'de açık bir şekilde görülmektedir. Burada özellikle 2,5 m/s hızda gerçekleştirilen bor katkılı madeni yağ deneyinde 80°C 'de en düşük aşınma değerini vermiştir.

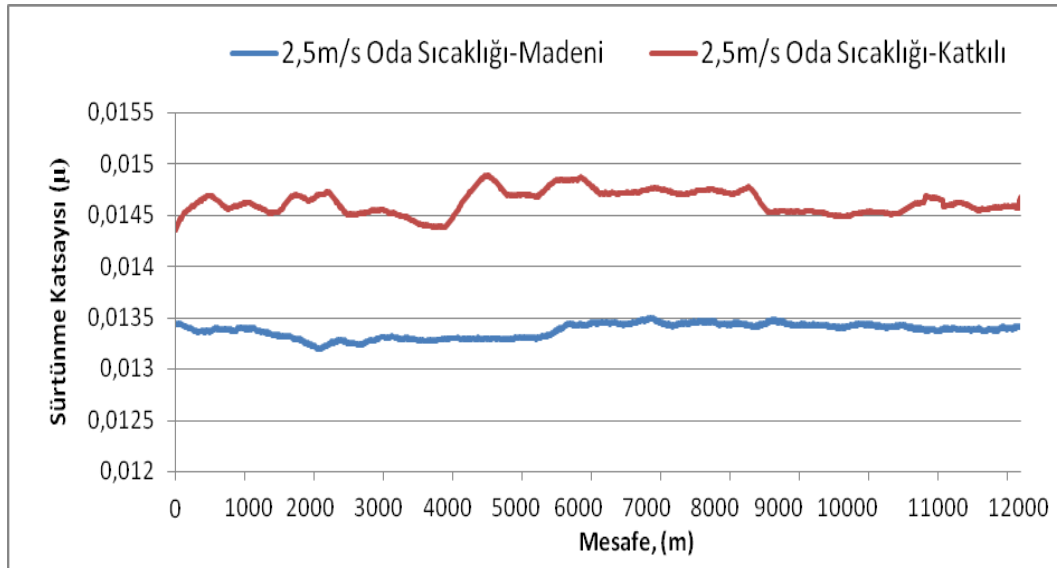
Sonuç olarak kullanılan madeni yağın sıcaklıkla viskozitesi azalmakta ve yağlama özelliği artmaktadır ve ayrıca bor katkısı bu oranı daha da düşürmektedir.



Şekil 4.5. Disk-2'de kullanılan bilyenin ağırlık kaybı

4.2. Sürtünme Katsayısı

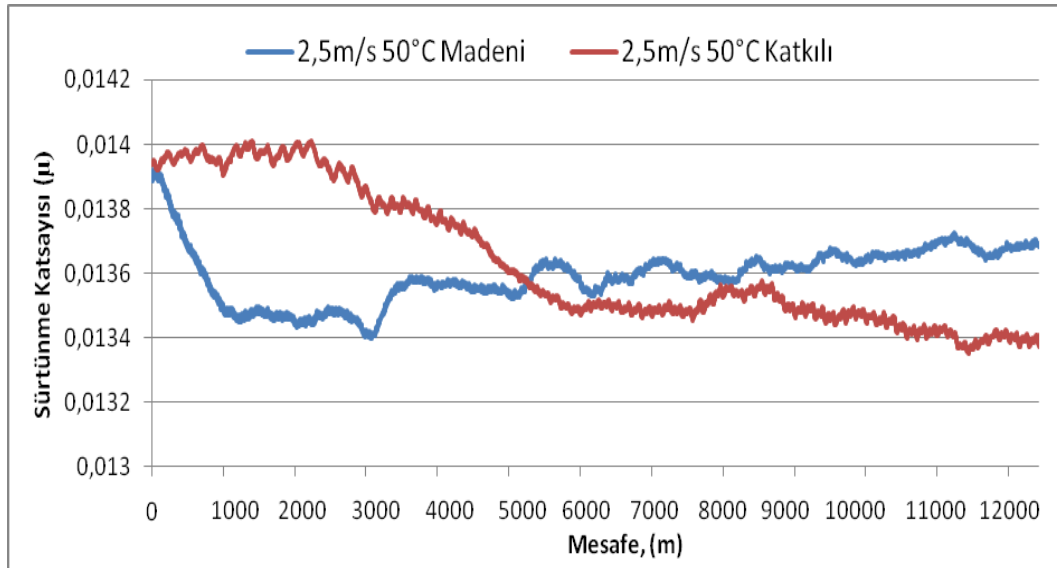
Bilye-Disk deney setinde madeni ve katkılı madeni yağ ile yağlama sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı ölçümleri test sürelerine bağlı olarak grafik halinde oda sıcaklığı, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda Disk-1 için Şekil 4.6.-Şekil 4.11.'de, Disk-2 için ise Şekil 4.13.-Şekil 4.18.'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Oda sıcaklığında, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları

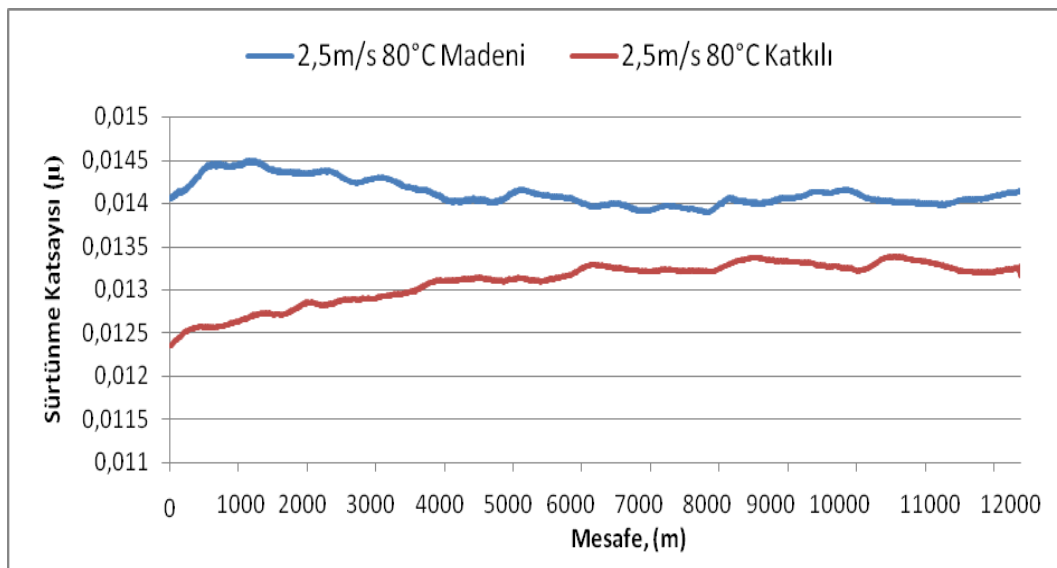
60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile oda sıcaklığında sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Deneyler sonucunda sürtünme katsayısı değerleri Şekil 4.6.'da görülmektedir. Burada, madeni yağ ile yapılan deneylerde sürtünme katsayısı değerleri yaklaşık $\mu_{ort}=0,0135$ iken, madeni yağa bor ilavesinden sonra $\mu_{ort}=0,0145$ değerleri elde edilmiştir. Bor katkısı bir çözeltilidir ve içerisinde belirli bir oranda su bulunduğu bilinmektedir. Burada suyun madeni yağın yağlama özelliğini bozduğu ve sürtünme katsayısını %7 oranında arttırdığı düşünülmektedir. Üretici firmanın motor rölanti devrinde iken 20dk boşa çalıştırıldıktan sonra etki göstereceği ibaresi, katkı içerisindeki su miktarının buharlaşıp içerisindeki borun madeni yağ ile homojen bir yapı oluşturması ile gerçekleşeceğini kanıtlamaktadır. Ayrıca TGA sonuçları da bu sonucu desteklemektedir.

Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi, 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 50°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır.



Şekil 4.7. 50°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları

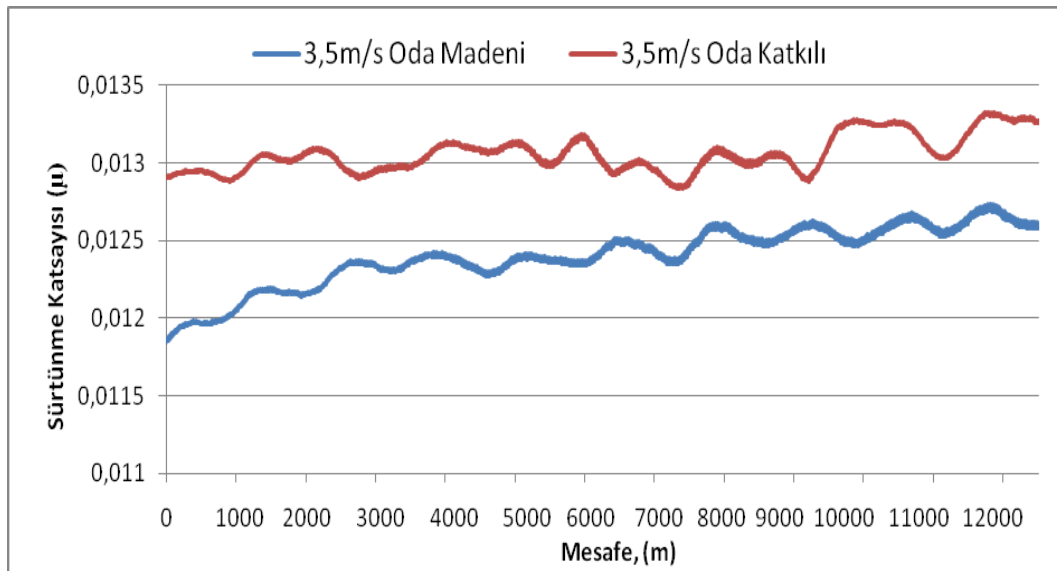
Burada başlangıçta madeni yağ ile yapılan deneylerde sürtünme katsayısı daha düşük seyrederken, katkı kullanılan deneylerde sistem içerisindeki yağın katkı ile homojen bir yapıya dönüşmesiyle (5000m sonra) sürtünme katsayılarının yer değiştirdiği Şekil 4.7.'de açıkça görülmektedir. Katkılı madeni yağın homojen yapıya dönüşmesi ve sıcaklığın etkisiyle bor atomlarının moleküller arası çekim kuvvetinin azalması sürtünmeyi önemli derecede azaltmış ve $\mu=0,0134$ mertebesine kadar düşürmüştür. Buna ek olarak bilyedeki abrasif çizgilerin bor molekülleri ile dolması yüzey bozulmalarını düşürdüğü düşünülmektedir. Nitekim SEM raporlarında bor katkılı deneylerin hepsinde, madeni yağ ile yapılan deneylerdeki yüzey bozulmalarından oldukça iyi sonuç verdiği görülmüştür.



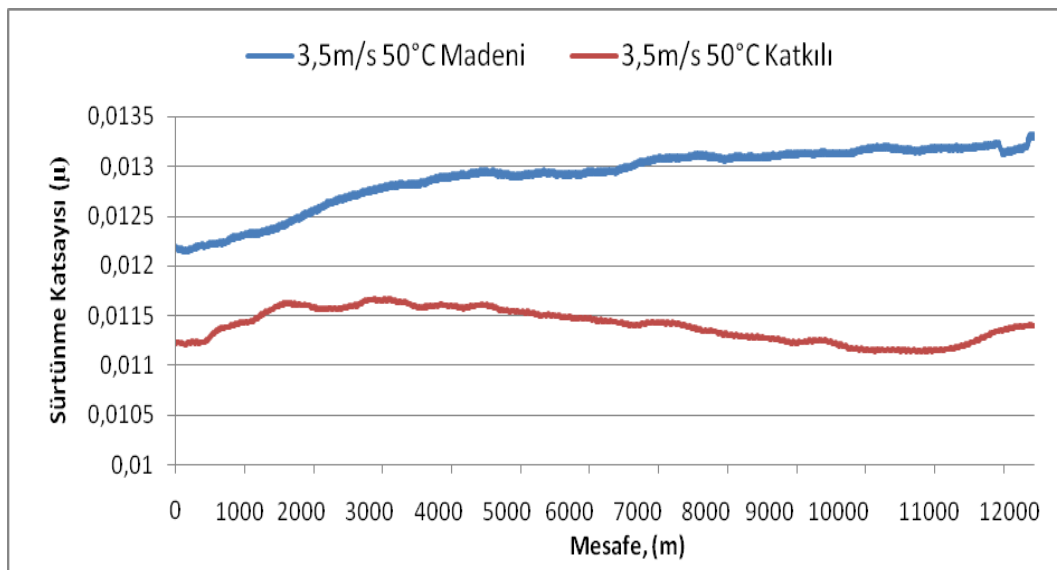
Şekil 4.8. 80°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları

Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi, 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 80°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır.

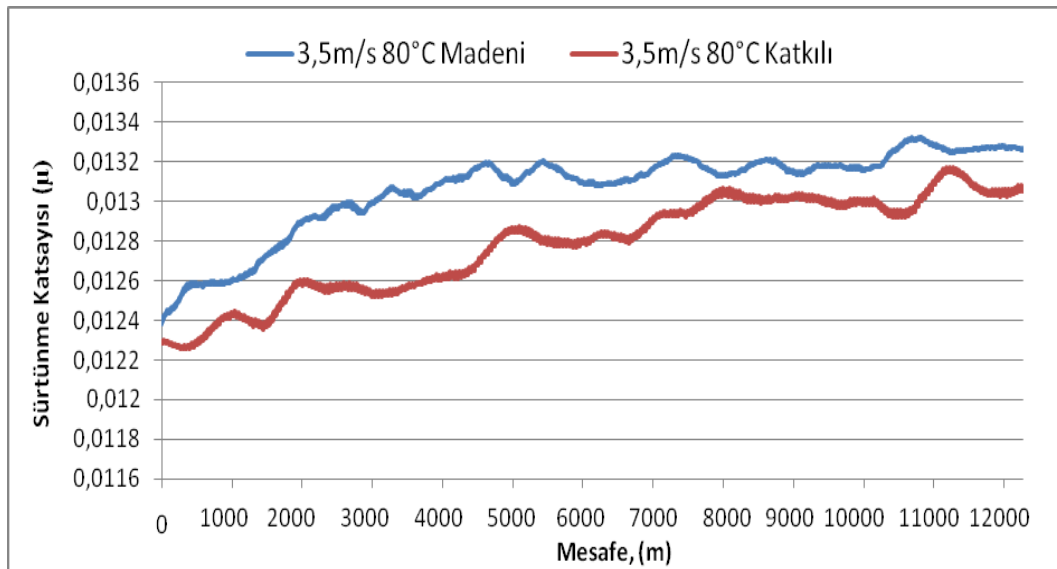
Durak ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarda motor yağlarının sıcaklıkla viskozitelerinin dolayısıyla sürtünme katsayılarının ve yağlama performanslarının önemli ölçüde değiştiğini savunmaktadır (Durak, 2006). Bor katkısı Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi artan sıcaklıkla beraber sürtünme katsayısına yaptığı önemli etkiyi yani sürtünmedeki azalma etkisini devam ettirmektedir. Burada katkı kullanılan deneyde $\mu_{ort}=0,0125$ sürtünme katsayısı en düşük değeri göstermektedir.



Şekil 4.9. Oda Sıcaklığında, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkıli madeni yağın sürtünme katsayıları

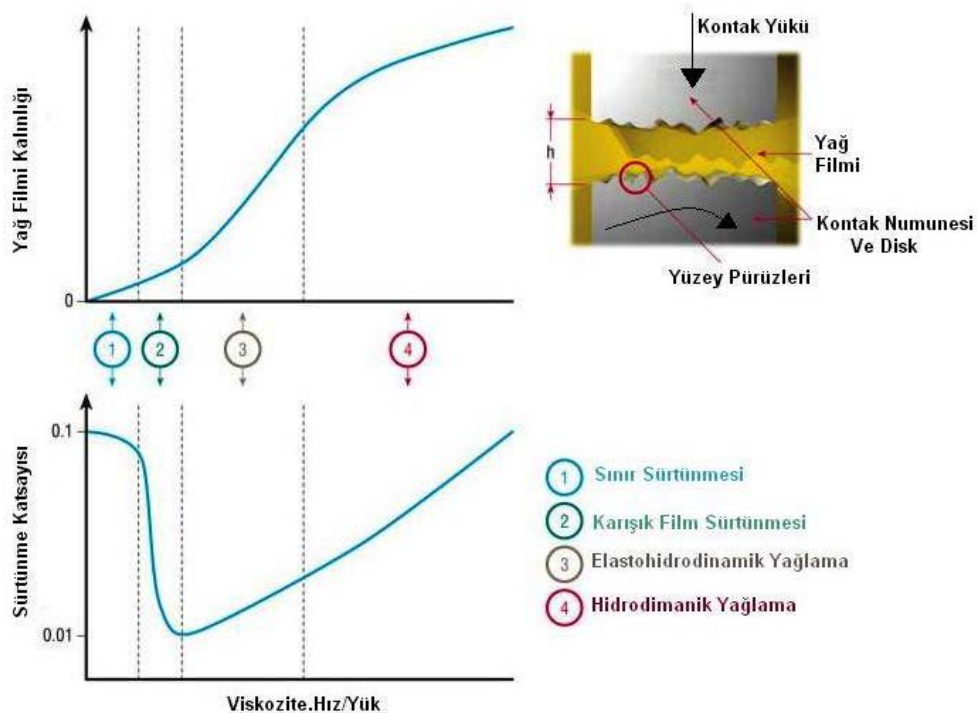


Şekil 4.10. 50°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkıli madeni yağın sürtünme katsayıları



Şekil 4.11. 80°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları

Şekil 4.9.-4.10.- 4.11.'de görüldüğü gibi, 60N yük altında 3,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ, sırasıyla oda sıcaklığı, 50°C ve 80°C'de sisteme ikişer farklı deney uygulanmıştır.



Şekil 4.12. Temas yüzeylerindeki Stribeck Diyagramı ve yağlama rejimlerinin dağılımı (Bloch, 2009).

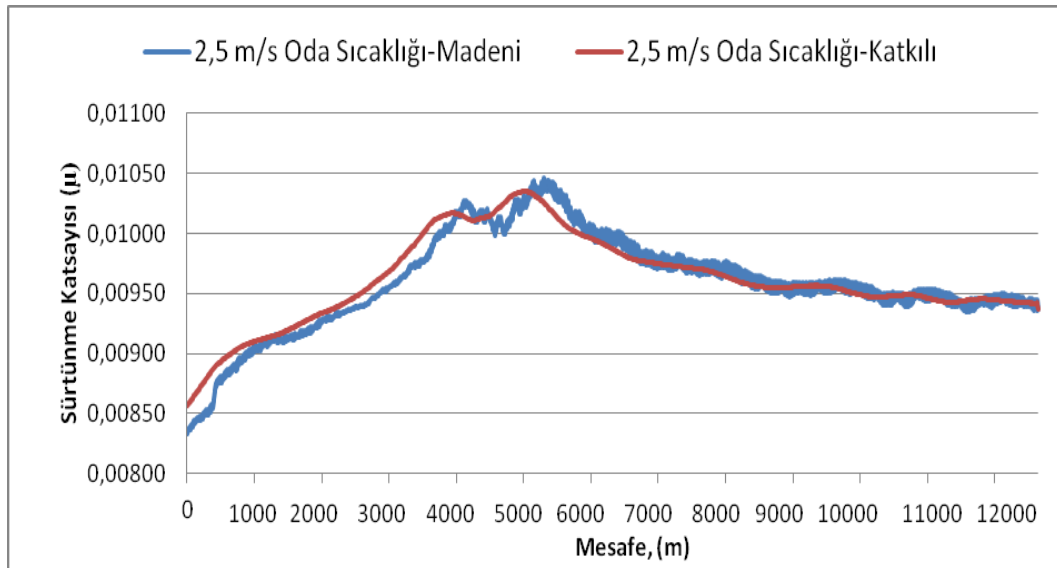
Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi normal şartlarda sistem hidrodinamik yağlama rejiminde çalışırken, yük artışı, devir sayısı azalışı veya sıcaklık artışı nedeniyle viskozite değerinin düşmesi halinde yağ filmi incelir. Bunun sonucunda sistemdeki

yağlama rejimleri de; elastohidrodinamik, karışık ya da sınır sürtünme bölgesine taşınır. Burada sistem Hidrodinamik yağlama bölgesinde çalışsa bile elastohidrodinamik yağlamaya maruz kalır (Bloch, 2009).

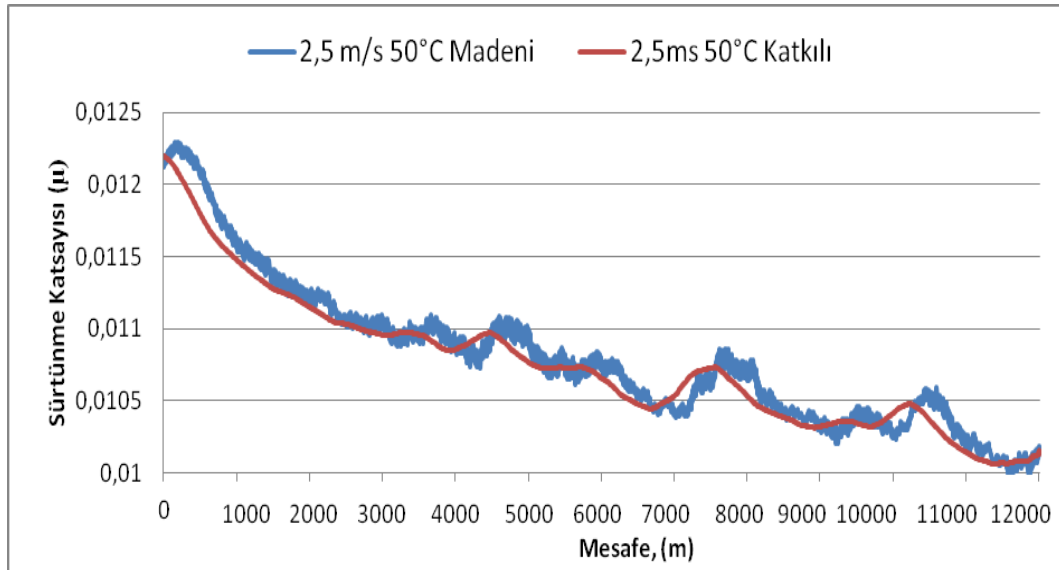
Yapılan deneylerde deney aşındırma numunesi olan 100Cr6 çelik bilye yüzey alanı küçük olduğundan, oluşan yağ filmi göz önünde bulundurulduğunda, hızın da etkisiyle sistemde elastohidrodinamik yağlamanın mikro düzeyde oluştuğu düşünülmektedir. Burada sürtünme katsayısı önem arz etmektedir. 3,5 m/s'de yapılan deneylerde başlangıçta düşük sürtünme katsayıları elde edilirken zamanla bu değerlerin arttığı görülmektedir. Burada en düşük sürtünme katsayısı değerleri 50°C'de bor katkılı madeni yağ deneylerinde kaydedilmiştir ($\mu_{ort} \sim 0,0113$). Oda sıcaklığında katkının madeni yağ ile homojenlik göstermediği, 80°C sıcaklıkta ise yağ filminin incelendiği, hızdaki artışın da (3,5m/s) etkisiyle sürtünme katsayısını arttırdığı düşünülmektedir.

Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.'de görüldüğü gibi madeni ve bor katkılı madeni yağın kullanıldığı deneylerde sürtünme katsayıları benzer özellik göstermektedir.

Kalkan, TiN kaplanmış disk ile yaptığı çalışmasında; kayma hızı arttıkça TiN kaplamanın aşınma direncinin arttığını savunmaktadır (Kalkan, 2008). TiN kaplanmış numunenin yüzey sertliği oldukça yüksektir ve yüzey pürüzlülük değeri düşüktür. Düşük devirlerde sınır sürtünme şartlarında bile aşındırma oranı düşüktür. Ayrıca kimyasal stabilitesi yüksek olduğundan aşındırılan malzemeye yapışmamakta ve kayganlık özelliği göstermektedir. Bu nedenlerden dolayı 2,5m/s'de gerçekleştirilen deneylerde TiN kaplama aşındırma kontak numunesi olan 100Cr6 çelik bilye oda sıcaklığında ve 50°C' de birbirine yakın sürtünme katsayısı değerlerini vermiştir.

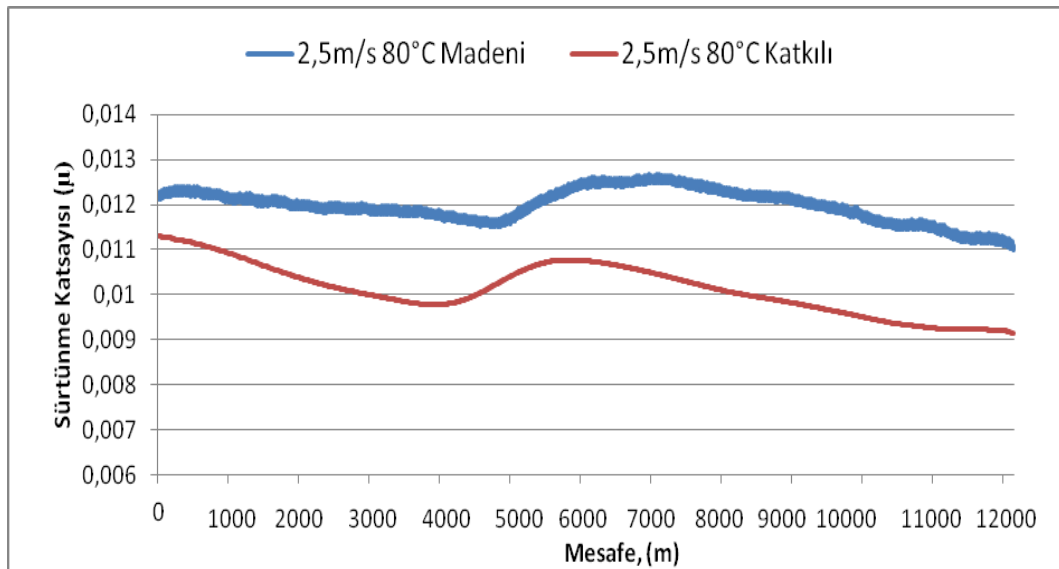


Şekil 4.13. Oda sıcaklığında, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları



Şekil 4.14. 50°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları

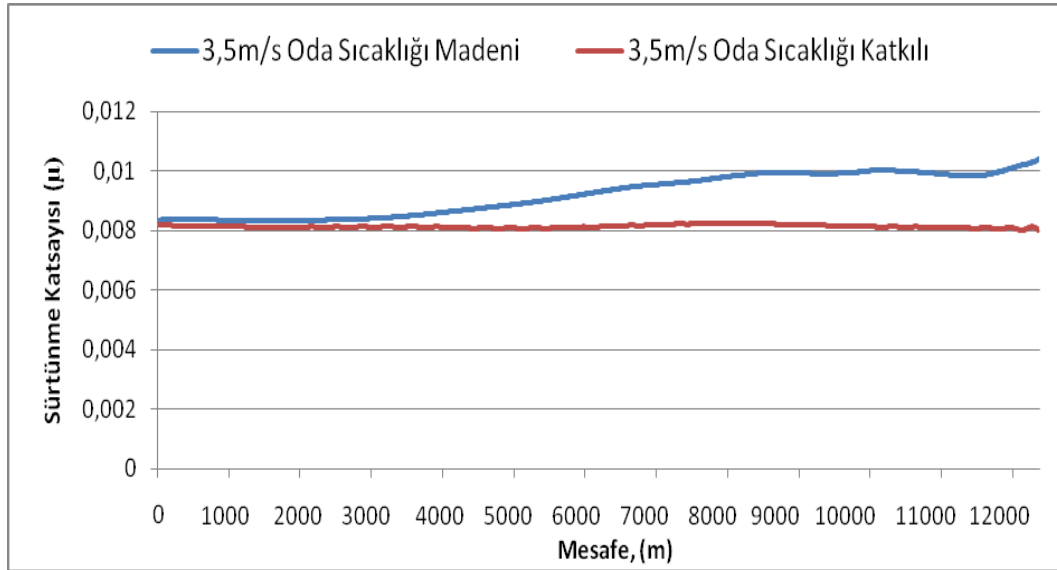
80°C’de gerçekleştirilen Şekil 4.15. deneylerinde, sıcaklığın etkisiyle yağın incilmesi, yani viskozitenin düşmesiyle sürtünme katsayıları farklılık göstermiştir. Burada farklı yağlama rejimlerinin etkisiyle bor moleküllerindeki zayıf olan Van der Waals bağlarındaki katmanlı yapının kopması ve bor moleküllerinin abrasif çizgileri doldurma özelliğinden dolayı bor katkılı madeni yağın sürtünme katsayısının ($\mu_{ort} \sim 0,01$) daha iyi sonuç verdiği düşünülmektedir. Sürtünme katsayılarında madeni yağa göre bor katkılı madeni yağın %20 oranında bir düşüş gösterdiği hesaplanmıştır.



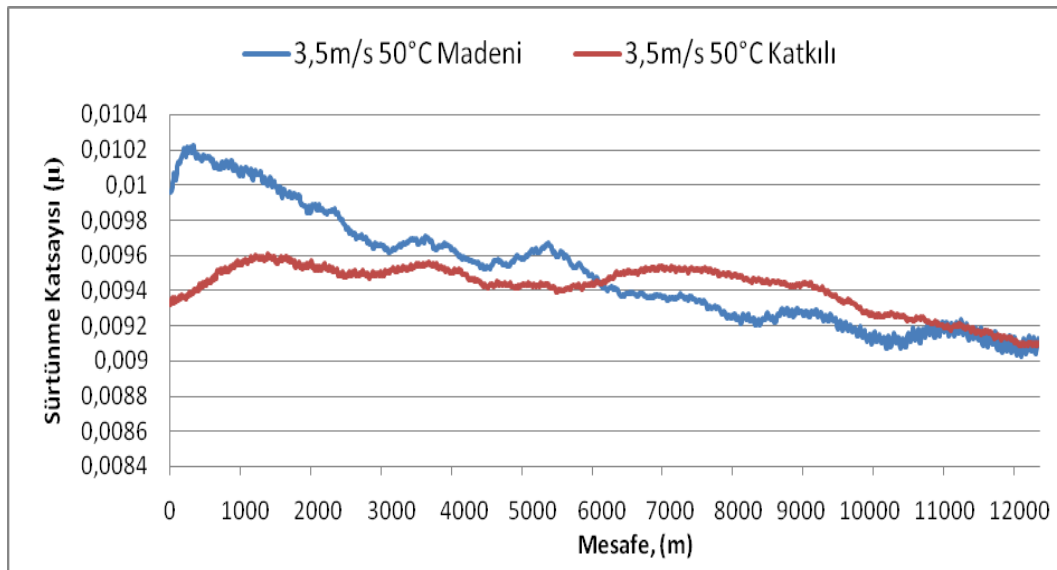
Şekil 4.15. 80°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları

Disk-2’de hızın artırılmasıyla genel olarak sürtünme katsayılarında düşüş olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni olarak TiN kaplamanın yüksek devirlerde aşınma

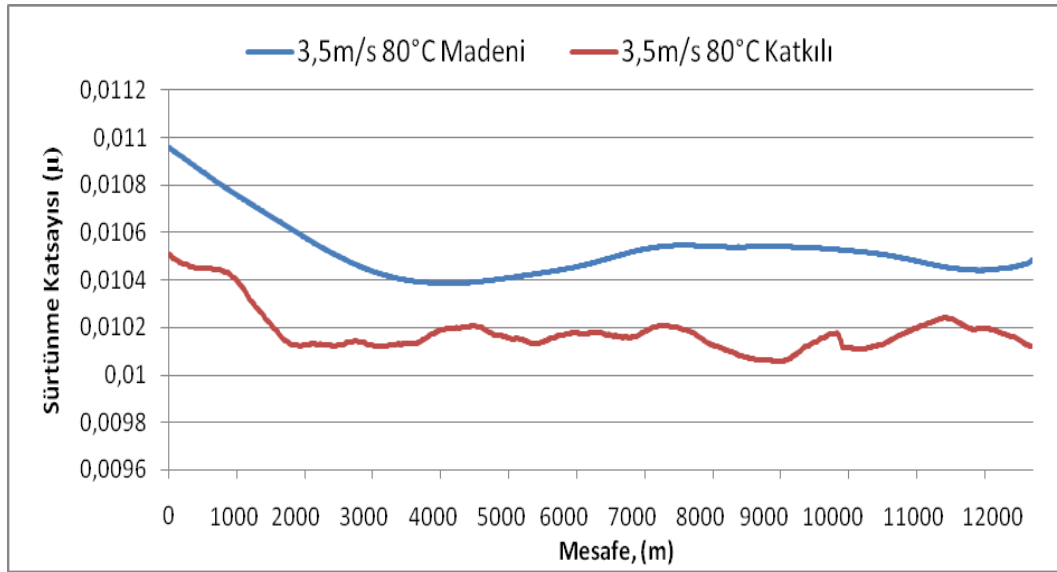
direncinin arttığı, kayganlık özellik gösterdiği ve ısıyı kontak bölgesinde biriktirmeyip çevresine yaydığı etken olarak gösterilebilir.



Şekil 4.16. Oda Sıcaklığında, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları



Şekil 4.17. 50°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları



Şekil 4.18. 80°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın sürtünme katsayıları

Yapılan tüm çalışmalar göstermektedir ki; bor bileşikli katkıları madeni yağın yağlama performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bormax® (borik asit çözeltisi) ağırlıkça %10 oranında madeni yağa eklenip 60N yük altında 2,5 m/s ve 3,5 m/s devir hızlarında oda, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda denenmiştir. 50°C’de madeni yağa göre en iyi performans elde edilmiş, oda sıcaklığında yağın yağlama özelliğini bozduğu düşünülmüş, 80°C’de ise yüksek sıcaklığın etkisi ile 50°C’ye göre sürtünme katsayısı artmış fakat madeni yağ ile yapılan aynı deney şartlarından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

4.3. Aşınma Miktarı

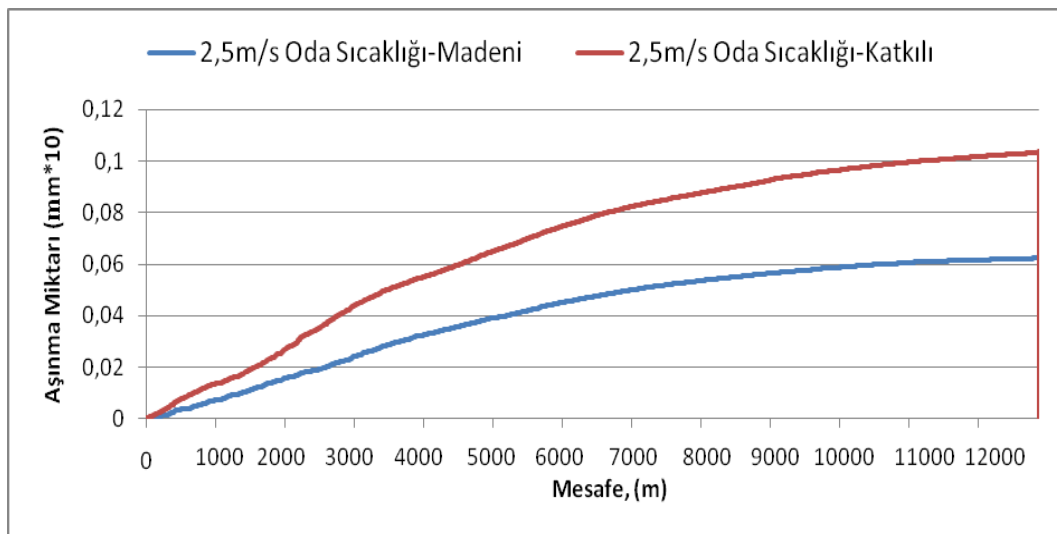
Bilye-Disk deney setinde madeni ve katkılı madeni yağ ile yağlama sonucunda elde edilen aşınma miktarı ölçümleri test sürelerine bağlı olarak grafik halinde; Oda sıcaklığı, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda Disk-1 için Şekil 4.19. - Şekil 4.24.’de, Disk-2 için ise Şekil 4.25. - Şekil 4.30.’da verilmiştir.

Aşınma miktarı birbirine değen yüzeyler arasındaki etkileşimden dolayı, yüzeylerdeki malzeme taşınımı olarak bilinir. Burada; disk numunesi ile bilye numunesi temas yüzeylerindeki malzeme taşınımı söz konusudur. Sistem üzerinde aşınmanın en yaygın türü olan adhesiv aşınmaya her aşamada rastlamak mümkündür. Bu aşınma tipi benzer kristal kafes yapısına sahip metallerin hareket ve sürtünmeleri nedeniyle sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerde kaynamaya neden olmaktadır. Buradaki kaynamadan maksat malzemelerin yüksek sıcaklıktan dolayı birbiriyle bağ

oluşturmalarıdır. Disk-1 numune yüzeyi ve bilye numune yüzeyi üzerindeki pürüzler zamanla etkileşim göstermişlerdir. Hatta çok düzgün yüzeylerde bile (Disk-2) bu aşınma tipi görülmektedir. Deney test düzeneğinde kullanılan 60N yük sonucu (yükleme), pürüz tepelerinde meydana gelen gerilmeler plastik deformasyona neden olmakta ve sonuç olarak aşınma miktarını belirlemektedir. Bilye yüzeyi başlangıçta noktasal plastik deformasyona uğrarken zamanla bu tüm yüzeye yayılmaktadır.

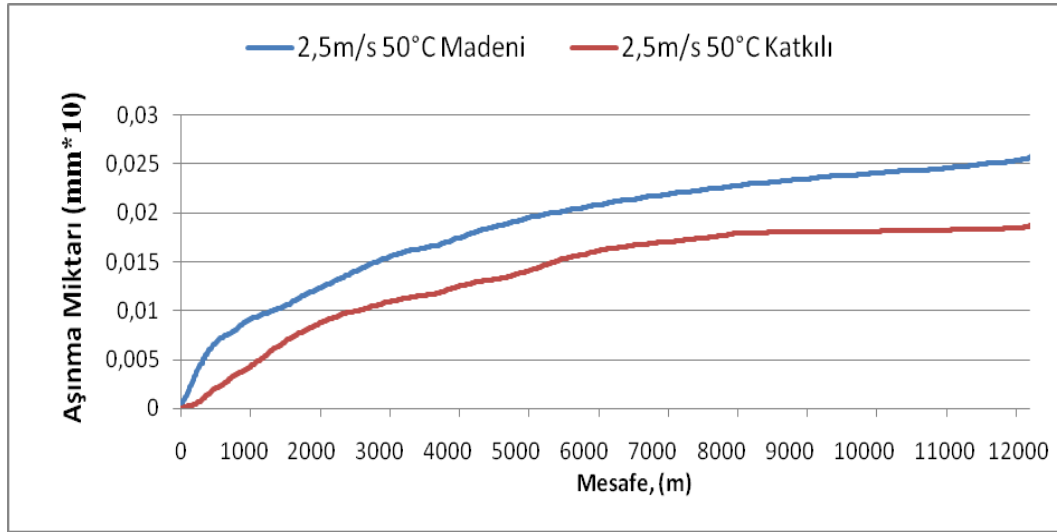
Disk-1 kullanılan deneylerde aşınma esnasında kırılmalar çoğu zaman iki yüzeyde de gerçekleşmiştir. Ayrıca yüzeylerden kopan parçacıklar abrasif aşınma da oluşturmaktadır. Disk üzerindeki bilye, hep taze abrasif üzerinde kaymaktadır. Burada, bilye disk üzerini radyal şekilde aşındırarak gerçekleşmekte ve spiral bir iz bırakmaktadır. Aşınma miktarı mesafe olarak ölçüldüğünden iki taraflı aşınma, sonuçlarımıza engel teşkil etmemektedir.

Genel olarak bor katkısı 50°C ve 80°C'de aşınma miktarını madeni yağ kullanılan deneylere göre önemli ölçüde düşürmüştür. Borik asit, yağlayıcı olarak kullanıldığında önemli bir özelliği olan artan kontak basıncı ile yağlama kapasitesini arttırmaktadır. Kontak basıncının artması ile yüzeyler arasında ince film tabakası oluşmakta ve sürtünme katsayısını azaltmaktadır (Erdemir, 1991-1999). Bunun nedeni artan kontak basıncı moleküler düzeyde tabakalar arasında oluşan Van der Waals bağlarını daha kolay koparmakta ve söz konusu tabakaların dönüş yönüne doğru birbiri üzerinden kaymalarını kolaylaştırmaktadır (Erdemir, 2009).



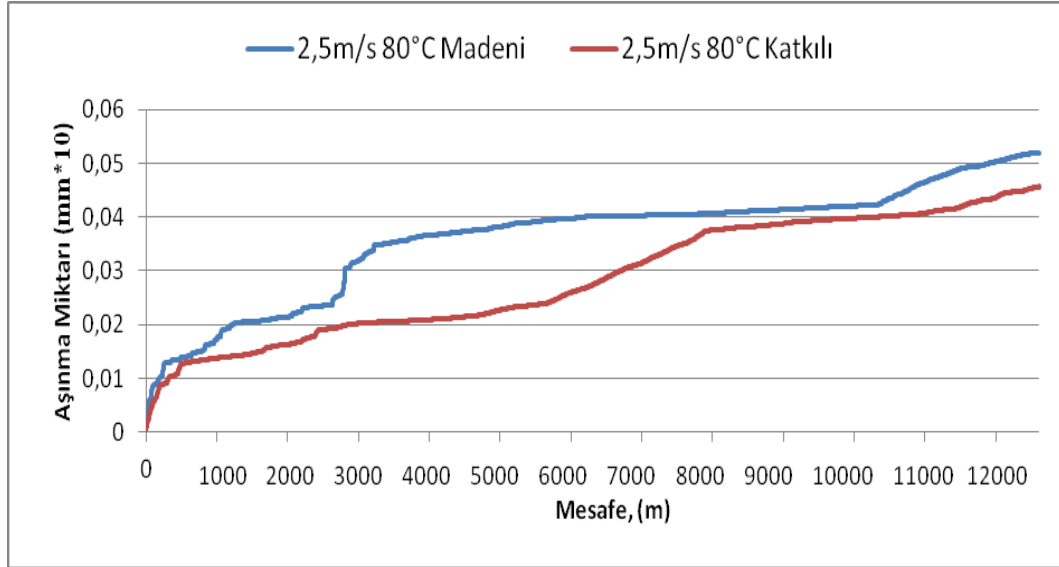
Şekil 4.19. Oda Sıcaklığında, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.19.'da 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile oda sıcaklığında sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Burada, madeni yağ ile yapılan deneylerde aşınma miktarının daha düşük çıktığı deney sonuçlarında görülmektedir. Bu sonuç sürtünme katsayısı değerleri paralelinde gerçekleşmiştir. Daha önce belirtildiği gibi, bor katkısı bir çözeltilidir ve içerisinde belirli bir oranda su bulunduğu bilinmektedir. Burada suyun madeni yağın yağlama özelliğini bozduğu ve aşınma miktarını arttırdığı düşünülmektedir.



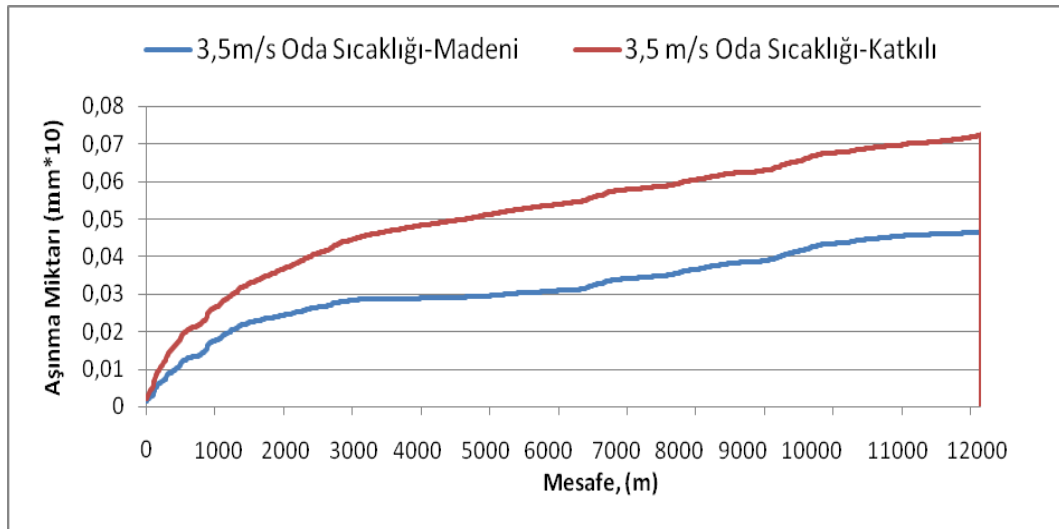
Şekil 4.20. 50°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.20.'de 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 50°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Burada Disk-1 ile yapılan deneyler arasındaki en düşük aşınma miktarı bor katkılı madeni yağ ile yapılan deneyde (0,018) hesaplanmıştır. Optimum çalışma şartlarının Şekil 4.20.'de yapılan deney şartlarında gerçekleştiği düşünülmektedir.



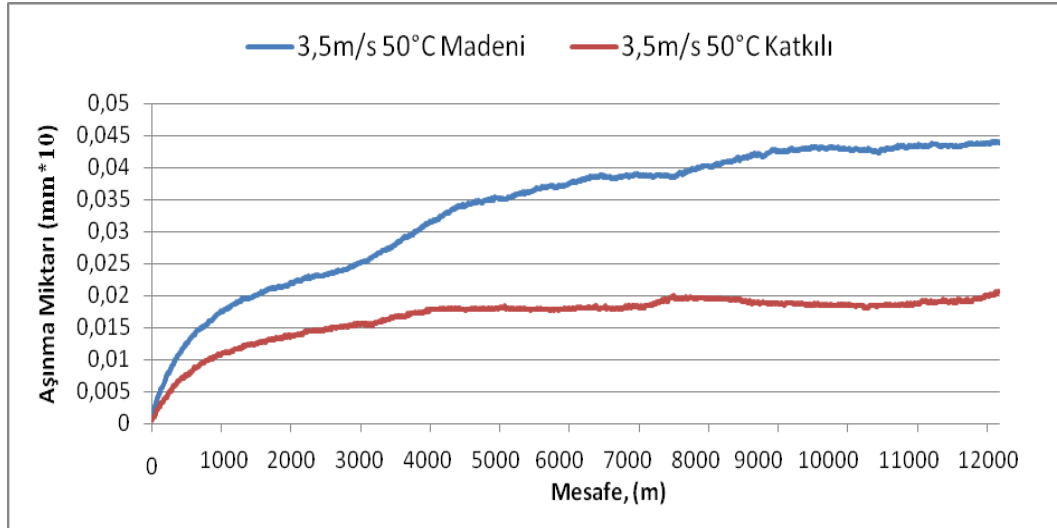
Şekil 4.21. 80°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.21.'de 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 80°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Aşınma miktarı bor katkılıda, madeni yağ ile yapılan deneye oranla daha düşük çıkmasına karşın 50°C'de yapılan deneylerden yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.



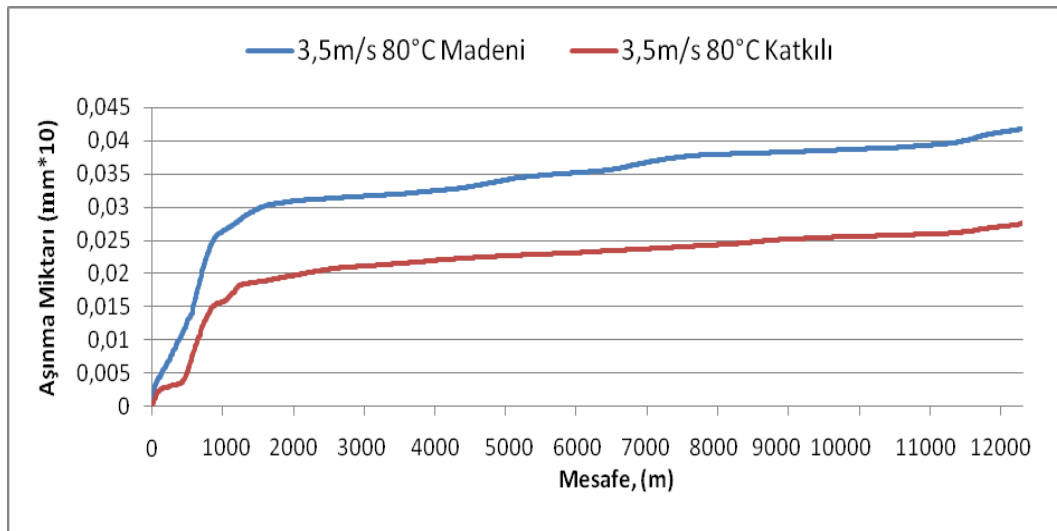
Şekil 4.22. Oda sıcaklığında, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.22.'de 60N yük altında 3,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile oda sıcaklığında sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Burada, bor katkılı madeni yağ ile yapılan deneylerde aşınma miktarının daha yüksek çıktığı deney sonuçlarında görülmektedir. 2,5 m/s'de oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde olduğu gibi burada da bor katkısının belirli bir sıcaklıkta ve sürede madeni yağ içerisinde homojen bir yapıya dönüşeceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.23. 50°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.23.'de 60N yük altında 3,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 50°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Burada 2,5m/s'de gerçekleştirilen deneye oranla aşınma miktarı bir miktar artmıştır (0,02), fakat 3,5m/s'de gerçekleştirilen deneyler arasında en düşük aşınma miktarı yine 50°C'de gerçekleştirilen bor katkılı madeni yağ kullanılan deneylerde görülmüştür.

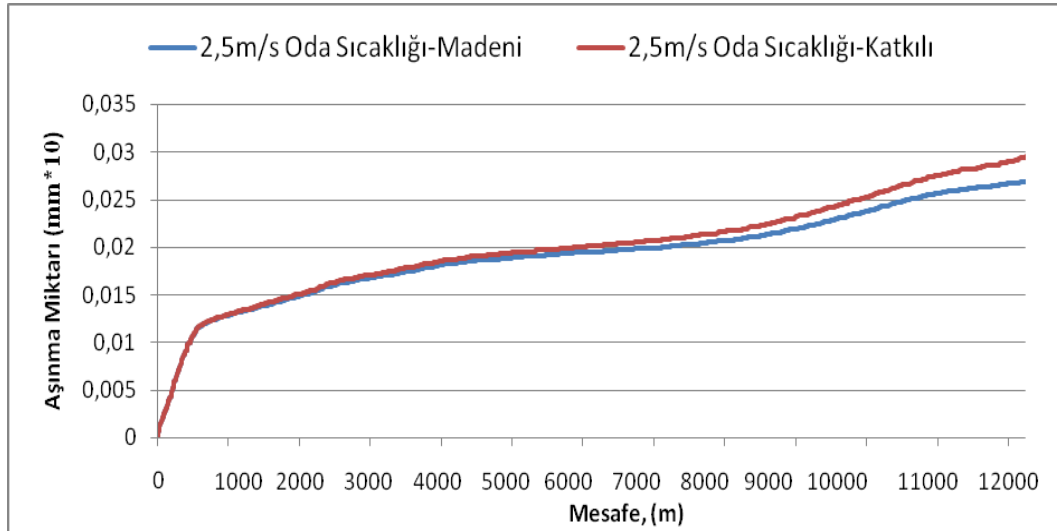


Şekil 4.24. 80°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.24.'de 60N yük altında 3,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 80°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Aşınma miktarı bor katkılıda, madeni yağ ile yapılan deneye oranla daha düşük çıkmıştır.

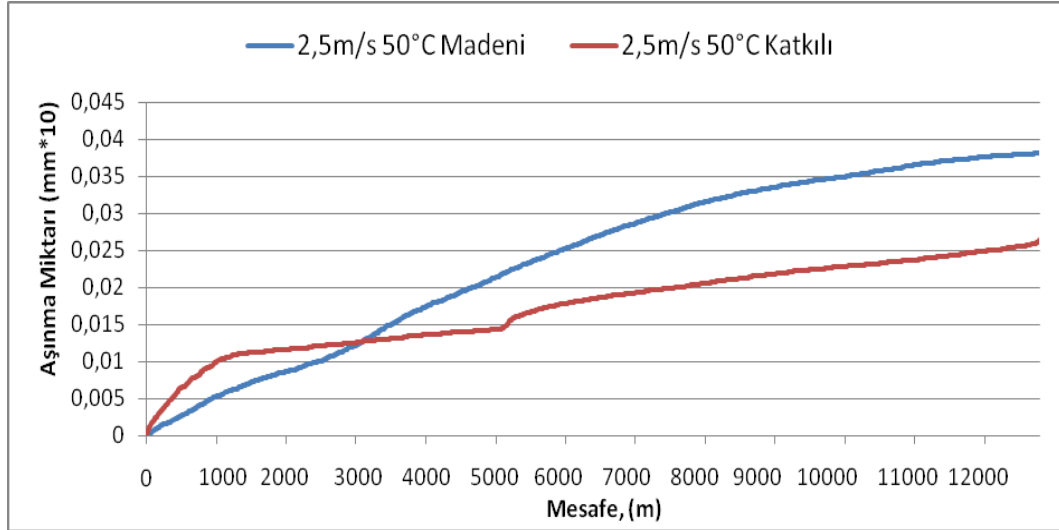
Disk-2 kullanılan deneylerde aşınma esnasında kırılmalar çoğu zaman bilye yüzeyinde gerçekleşmiştir. Disk üzerinde aşınma yok denecek kadar az oluşmuştur.

Bilye yüzeyinden kopan parçacıklar kendi yüzeyinde tek taraflı abrasif aşınma meydana getirmiştir. Disk üzerindeki bilye, hep taze yüzey üzerinde kaymaktadır. Bunun sonucu olarak bilye numunesi yüzeyi Disk-1 kullanılan yüzeye oranla daha fazla aşınmıştır ve aşınma miktarı genel olarak daha yüksek çıkmaktadır.



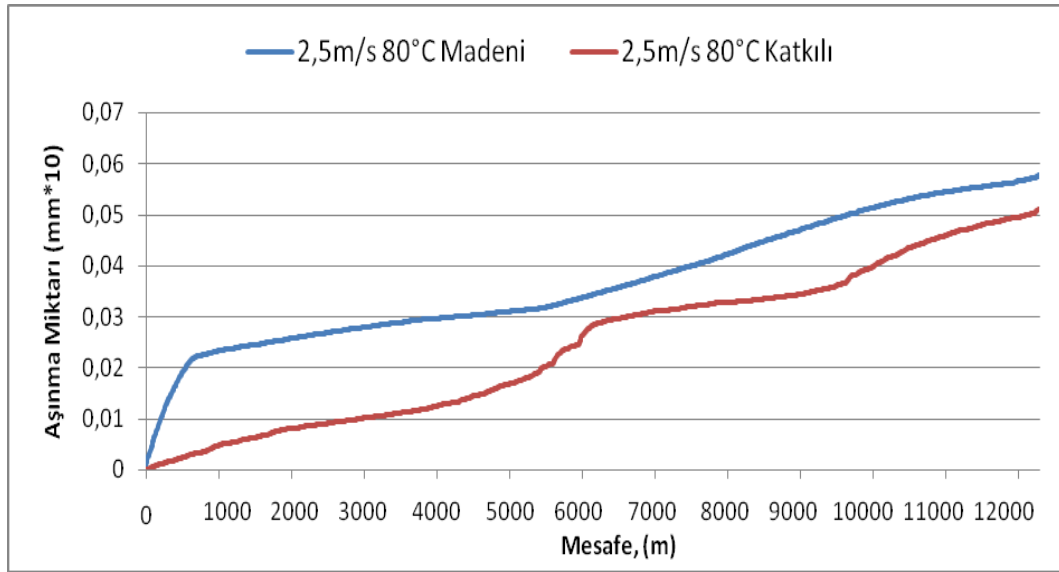
Şekil 4.25. Oda Sıcaklığında, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.25.'de 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile oda sıcaklığında sisteme iki farklı deney uygulanmıştır. Burada, madeni yağ ile yapılan deneylerde aşınma miktarının daha düşük çıktığı deney sonuçlarında görülmektedir. Fakat deney sonuçları birbirine çok yakındır. TiN kaplanmış diskin yüzey sertliğinin yüksek olması ve yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması aşındırma oranını düşürmekte ve aşınma miktarının birbirine yakın çıkmasını sağlamaktadır. Nitekim bu sonuç sürtünme katsayılarıyla da benzerlik göstermektedir. Fakat ısının etkisi bu sonucu değiştirmekte ve 50°C'de farklılıklar dikkat çekmektedir. Ayrıca kimyasal stabilitesi yüksek olan Disk-2 aşındırılan malzemeye yapışmamakta ve kayganlık özelliği göstermektedir. Bu nedenlere bağlı olarak deney sonuçları birbirlerine yakın çıkmaktadır.



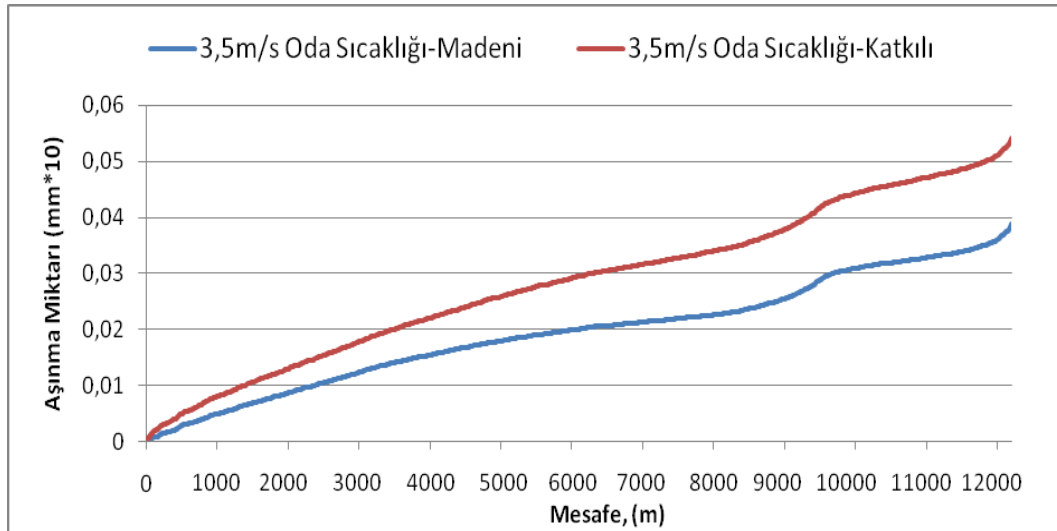
Şekil 4.26. 50°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.26.'de 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 50°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır.



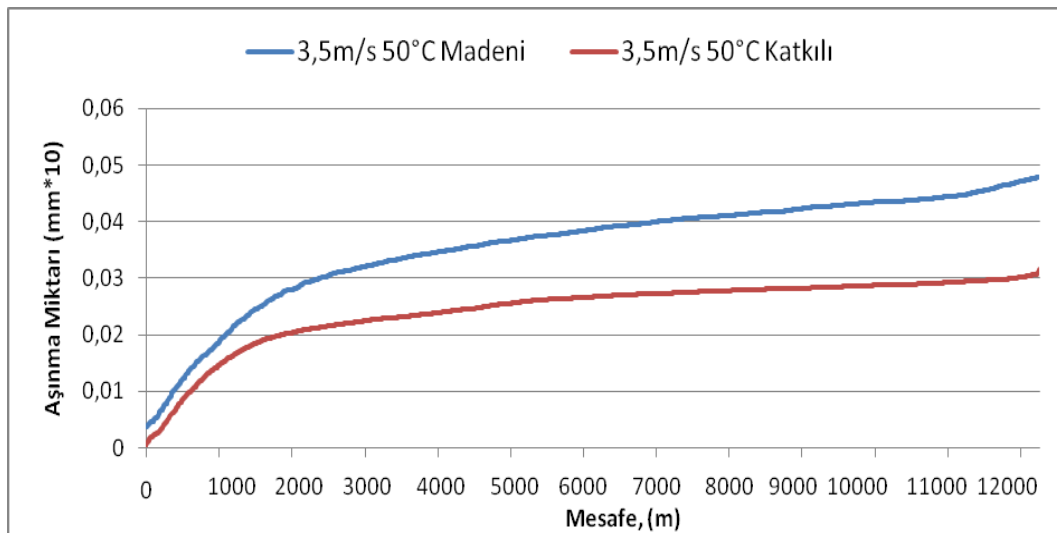
Şekil 4.27. 80°C sıcaklıkta, 2,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.27.'de 60N yük altında 2,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 80°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır.



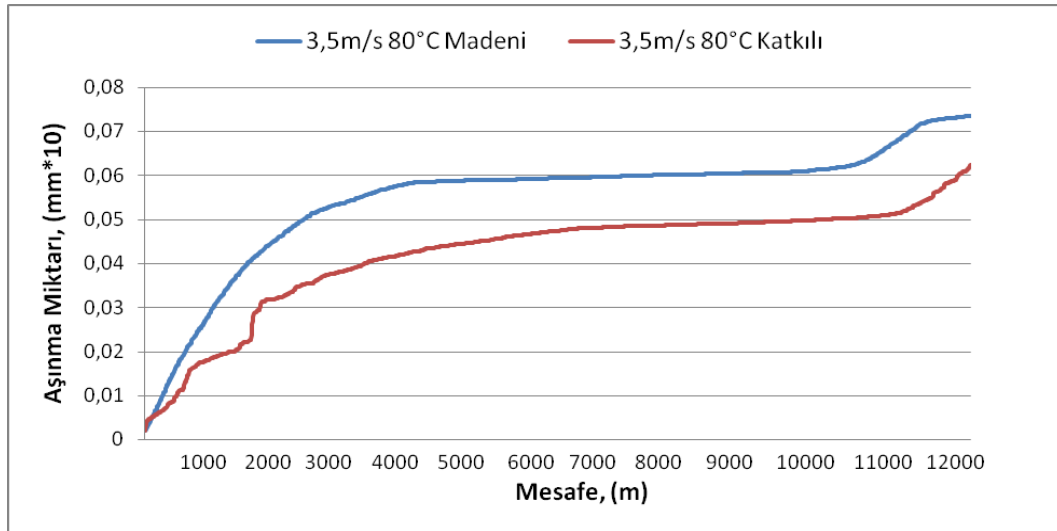
Şekil 4.28. Oda Sıcaklığında, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.28.'de 60N yük altında 3,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile oda sıcaklığında sisteme iki farklı deney uygulanmıştır.



Şekil 4.29. 50°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

Şekil 4.29.'da 60N yük altında 3,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 50°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır.



Şekil 4.30. 80°C sıcaklıkta, 3,5 m/s hızda, madeni ve katkılı madeni yağın aşınma miktarları

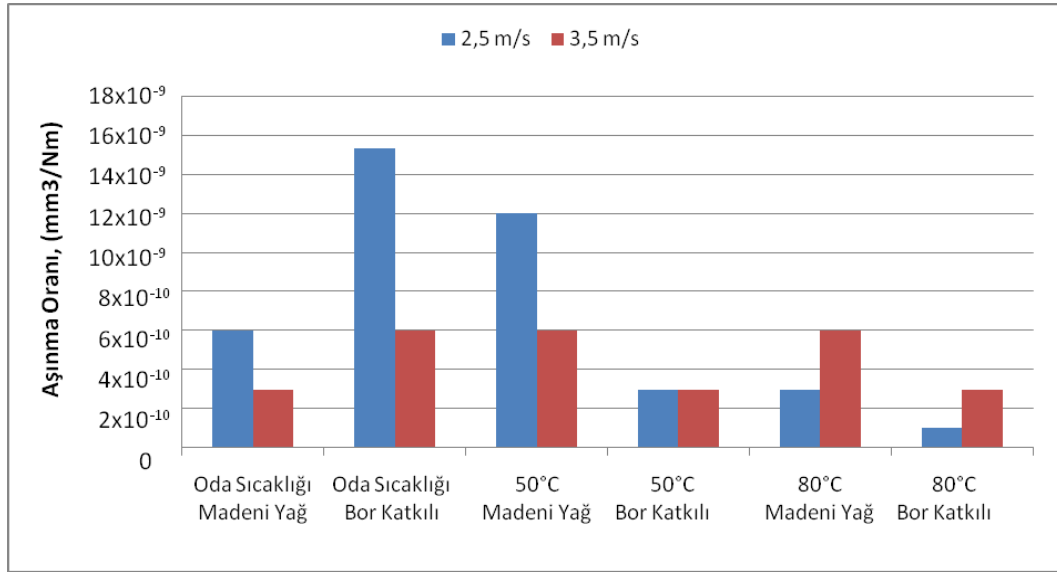
Şekil 4.30.'de 60N yük altında 3,5 m/s hızda madeni ve %10 oranında bor katkısı eklenmiş madeni yağ ile 80°C'de sisteme iki farklı deney uygulanmıştır.

Aşınma miktarı üzerine yapılan tüm çalışmalar göstermektedir ki; bor bileşikli katkıları madeni yağın yağlama performansını olumlu yönde etkilemekte ve aşınma miktarını düşürmektedir. Bormax® katkısı ağırlıkça %10 oranında madeni yağa eklenip 60N yük altında 2,5 m/s ve 3,5 m/s devir hızlarında oda, 50°C ve 80°C sıcaklıklarda denenmiştir. 50°C'de madeni yağa göre en iyi performans elde edilmiş, oda sıcaklığında yağın yağlama özelliğini bozduğu düşünülmüş, 80°C'de ise yüksek sıcaklığın etkisi ile 50°C'ye göre aşınma miktarı artmış fakat madeni yağ ile yapılan aynı deney şartlarından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

4.4. Bilye Aşınma Oranı

Madeni yağ ve madeni yağa hacimce %10 oranında Bormax® katkısı konulduğu durumlarda sabit yük ve sabit devirlerde, Disk-2'de kullanılan bilye numunesinin aşınan yüzeyinde meydana gelen aşınma oranları Şekil 4.31.'de görülmektedir. Burada;

Aşınma Oranı, $(\text{mm}^3/\text{N.m}) = \text{Kayıp Hacmi, (mm}^3) / \text{Normal Yük (N) x Toplam Sürtünme Mesafesi, (m)}$



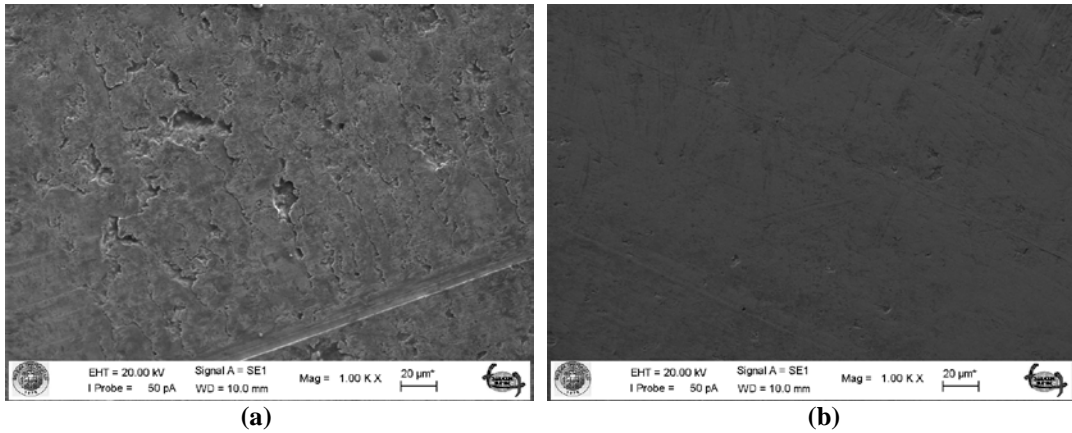
Şekil 4.31. Disk-2’de kullanılan bilyenin aşınma oranı, (mm³/Nm)

Madeni yağa katılan bor katkısı, madeni yağ ile yapılan deneylere kıyasla 50°C ve 80°C’de aşınma oranlarını azaltmıştır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde ise bor katkılı madeni yağın aşınma oranının madeni yağ ile yapılan deneylere göre yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma oranı oda sıcaklığındaki deneylerde 2,5 m/s 'de yüksek iken sıcaklığın artışıyla 3,5 m/s 'de daha yüksek olduğu görülmektedir.

4.5. Bilye Aşınma Davranışı

Bu kısımda gerçekleştirilen tüm deneylerdeki aşındırılan bilye numunelerinin SEM analizleri karşılaştırılarak incelenmiştir. Analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

Bilye numunelerinin yüzeyleri (Şekil 4.32.-4.39.) incelendiğinde; madeni yağ kullanılan numunelerde, aşınma yüzeylerinde daha derin izlerin meydana geldiği görülmektedir. Bu numunelerde meydana gelen aşınma tipinin adhesif aşınmanın yanı sıra abrasif aşınmaların olduğu anlaşılmaktadır. Bilye yüzeyinden kopan parçacıkların derin çizikler oluşturduğu, hatta yırtılmalara sebep olduğu görülmektedir. Katkı kullanılan deney numunelerinde ise yüzey pürüzlülükleri madeni yağ kullanılan deneylere göre oldukça az ve daha küçük oldukları görülmektedir. Ayrıca TiN kaplanmış disk numunesinin yüzey pürüzlülük değerinin küçük olması ve sertlik değerinin yüksek oluşu yüzey bozulmasını olumlu yönde etkilemiş ve Disk-1’e göre yüzey bozulmasını geciktirdiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.36., Şekil 4.37., Şekil 4.38., Şekil 4.39.).

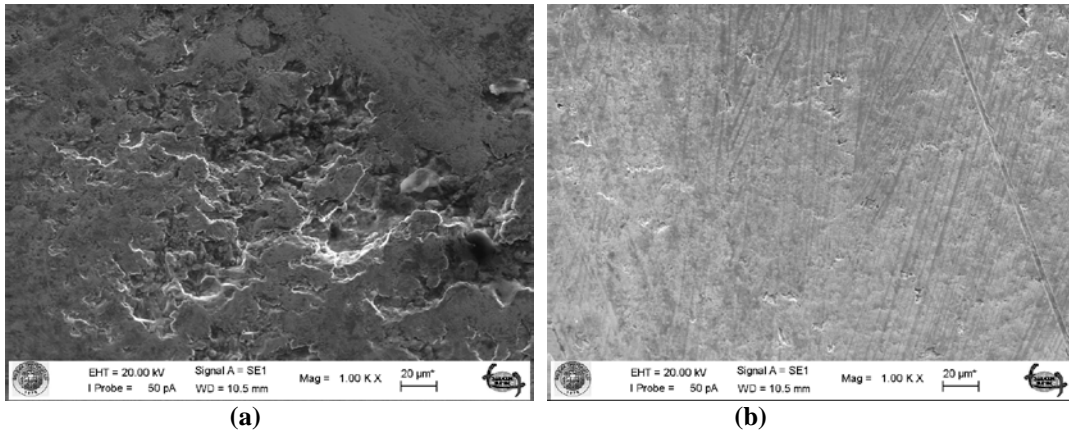


Şekil 4.32. Oda sıcaklığında, 2,5 m/s hızda, 1.00 K X büyütülmüş, Disk-1’de kullanılan bilye SEM görüntüleri

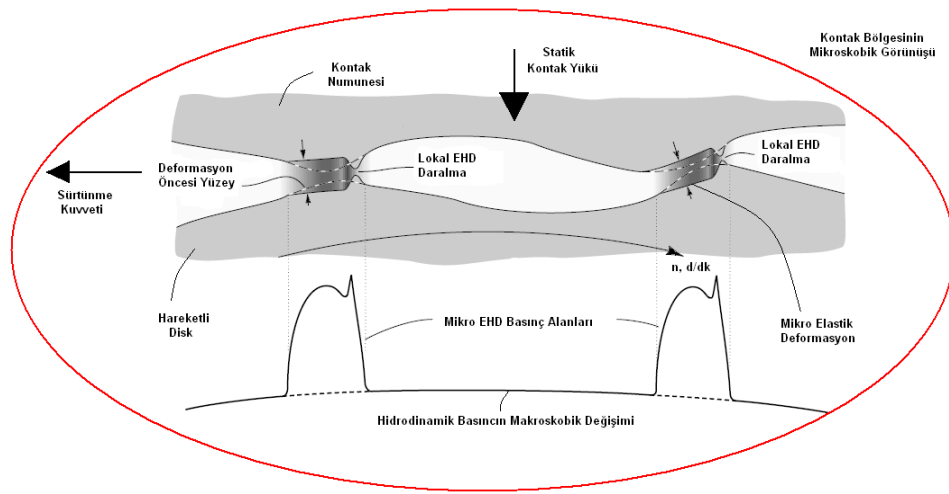
- a) Madeni yağın aşınma davranışı
- b) Katkılı madeni yağın aşınma davranışı

Şekil 4.32.’de 2,5m/s kayma hızı ve 60N deney yükünde, madeni ve bor katkılı madeni yağ ile yapılan deneylerde kullanılan bilye üzerinde oluşan aşınma izleri, SEM sonuçlarında görülmektedir. Burada deneyler oda sıcaklığında gerçekleşmiştir, fakat yüksek kayma hızının ve yükün de etkisiyle sıcaklık kontak bölgede artmış ve bilye numunesinde adhesif ve abrasif aşınma tipleri oluşmuştur. Madeni yağ ile yapılan deneylerde oluşan yüzey bozulması bor katkısı kullanılan deneylere göre oldukça fazladır.

Borik asit tek başına katı bir yağlayıcı olmasının yanı sıra mikro metre ya da nano metre düzeyinde farklı toz boyutlarında ve çeşitli oranlarda tüm sıvı yağlara ve greslere katkı olarak katılabilir ve birçok çalışmada da katılmıştır. Borik asit, düşük yoğunluğu nedeniyle, katıldığı yağın içerisinde uzun süre dağılımını koruyup katkı özelliğini devam ettirmektedir (Erdemir, 2009). Burada bor katkısının oluşan çizik ve çukurcukların içerisini doldurup tampon olma özelliğinden söz edilebilir. Bu da yüzey bozulmasını engellediği gibi bozulma süresini de uzatmaktadır.



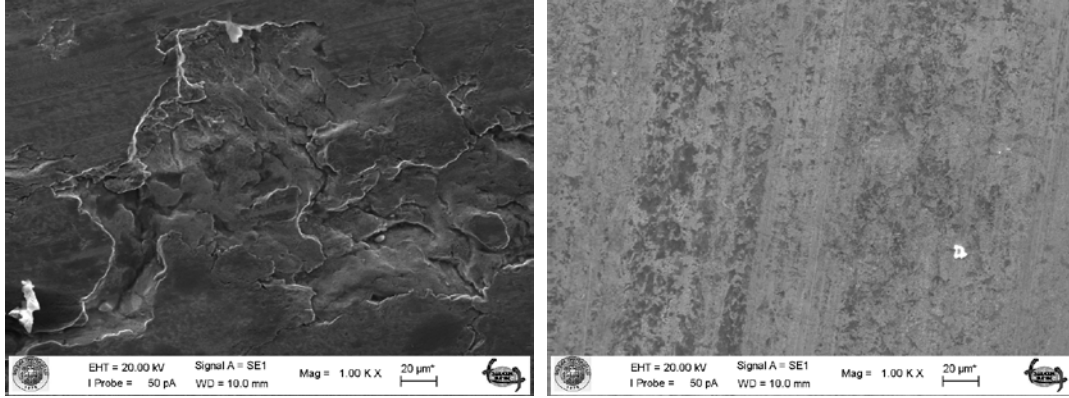
Şekil 4.33. 50°C’de, 2,5 m/s hızda, 1.00 K X büyütülmüş, Disk-1’de kullanılan bilye SEM görüntüleri
a) Madeni yağın aşınma davranışı
b) Katkılı madeni yağın aşınma davranışı



Şekil 4.34. Hidrodinamik ve karışık yağlama rejimleri içerisinde gerçekleşen bölgesel mikro elastohidrodinamik temaslar (Stachowiak, 2001).

Şekil 4.34.'de makro boyutta hidrodinamik veya karışık yağlama rejiminin içerisinde bölgesel mikro elastohidrodinamik yağlamanın oluşumu belirtilmiştir. SEM çekimi gerçekleştirildikten sonra incelenen numune yüzeyi oldukça küçüktür. Burada oluşan mikro elastohidrodinamik olgusu sonucunda sürtünme katsayısının etkileri derin yırtılmalar ve çukurlara sebebiyet vermiştir. Madeni yağ kullanılan deneylerde bu etki oldukça belirgin iken, bor katkılı madeni yağ kullanılan deneylerde etkisi az ve belirsizdir. Şekil 4.30.'da görüldüğü gibi sıcaklığın etkisi sürtünme altındaki yüzey bozulmalarını daha da arttırmıştır. Burada madeni yağ kullanılan deneylerde yüzeylerin elastik deformasyonu, oluşan yüksek basıncın yağlayıcı dinamik viskozitesi üzerindeki etkisi derin yırtılmaların oluşumuna neden olmuştur(Şekil4.32.(a), Şekil4.33.(a), Şekil4.35.(a)). Bor katkılı madeni yağ kullanılan deneylerde ise (Şekil4.32.(b), Şekil4.33.(b), Şekil4.35.(b)) ince yağ filmi içerisinde bulunan mikro borik asit

molekülleri temas yüzeylerinde yuvarlanma etkisi oluşturmuş, oluşan boşluk ve çizikleri doldurmuştur. Böylece yüzey bozulmaları gecikmiş ve bilye numunesinin elastik deformasyonu daha küçük değerlerde gerçekleşmiştir.



(a)

(b)

Şekil 4.35. 80°C'de, 2,5 m/s hızda, 1.00 K X büyütülmüş, Disk-1'de kullanılan bilye SEM görüntüleri

a) Madeni yağın aşınma davranışı

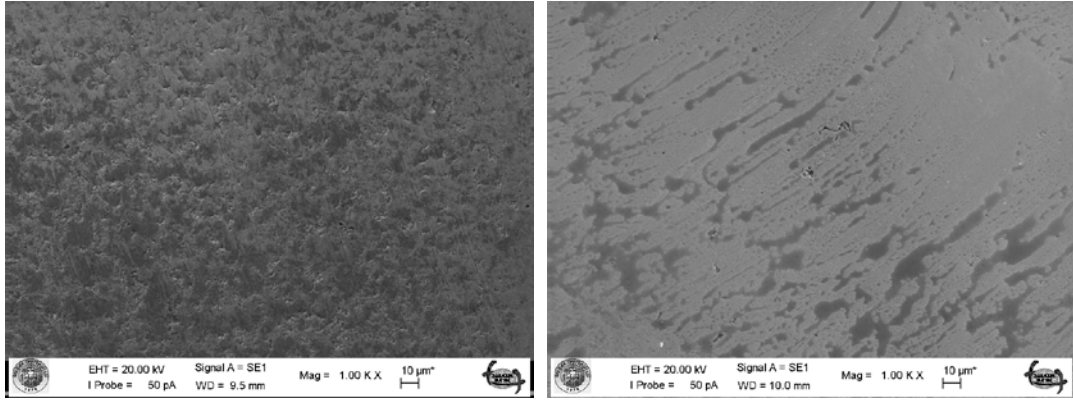
b) Katkılı madeni yağın aşınma davranışı

Disk-2'de kullanılan test numuneleri kayma yönünde, Disk-1'de kullanılan numunelerdeki aşınma izlerine göre daha küçük ve daha hafif oldukları görülmektedir. Disk-1 kullanılan deneylerde abrasif aşınmanın yoğun olduğu görülürken, Disk-2 de abrasif aşınmanın daha az olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedeni Disk-1 yüzeyinde aşınma oluşumu ve kopan parçacıkların bilye yüzeyinde abrasif çiziklere sebep olmasından kaynaklanmaktadır. Disk-2 yüzeyinde aşınma oluşmamıştır. Aşınmanın yalnız bilye yüzeyinde oluşması yüzey bozulmasının tek taraflı olmasını sağlamıştır. Bu nedenle Disk-2'de kullanılan bilyelerde farklı kayma hızı ve sıcaklıklarda yüzey bozulmalarının daha küçük mertebelerde olduğu görülmektedir.

TiN, bir aşırı sert seramik malzemedir. Son zamanlarda giderek artan bir oranda motor parçalarında kullanılmaktadır. Bunun asıl sebebi yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve ısı yalıtıcı özelliğidir. Çünkü motorlarda ısı kayıplarının minimuma indirilmesi ve motor sıcaklıklarının artırılarak en yüksek verimi almak hedeflenmektedir (Kalındağ, 2006). TiN kaplanmış numune de bor katkısının yağlayıcı olarak kullanılması sonucu sürtünme katsayısı $\mu=0,008$ mertebelerine kadar düşmüştür. Bu sürtünme katsayısı müthiş denebilecek bir seviyededir. TiN kaplamanın aşınma mukavemetinin yüksek olması, ısı yalıtkanlığı bu sonuca etken olarak düşünülmektedir.

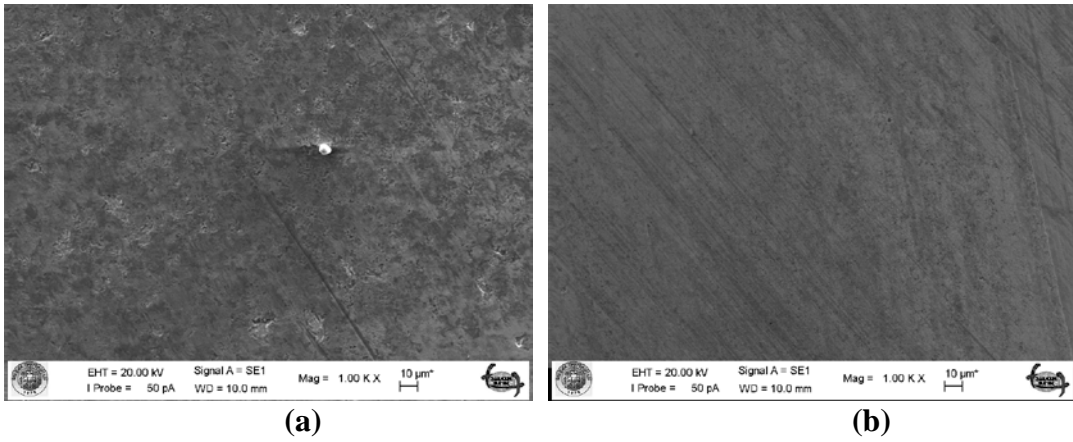
Şekil 4.36.'da 2,5m/s kayma hızı ve 60N deney yükünde, oda sıcaklığında madeni ve bor katkılı madeni yağ ile yapılan deneylerde kullanılan bilye üzerinde

oluşan aşınma izleri, SEM sonuçlarında görülmektedir. Madeni yağ ile yapılan deneylerde oluşan yüzey bozulması bor katkısı kullanılan deneylere göre fazladır. Borik asit moleküllerinin TiN kaplanmış diskte kullanılan bilye yüzeyinde de yüzey bozulmasını azalttığı görülmektedir.



Şekil 4.36. Oda sıcaklığında, 2,5 m/s hızda, 1.00 K X büyütülmüş, Disk-2’de kullanılan bilye SEM görüntüleri

- a) Madeni yağın aşınma davranışı
- b) Katkılı madeni yağın aşınma davranışı

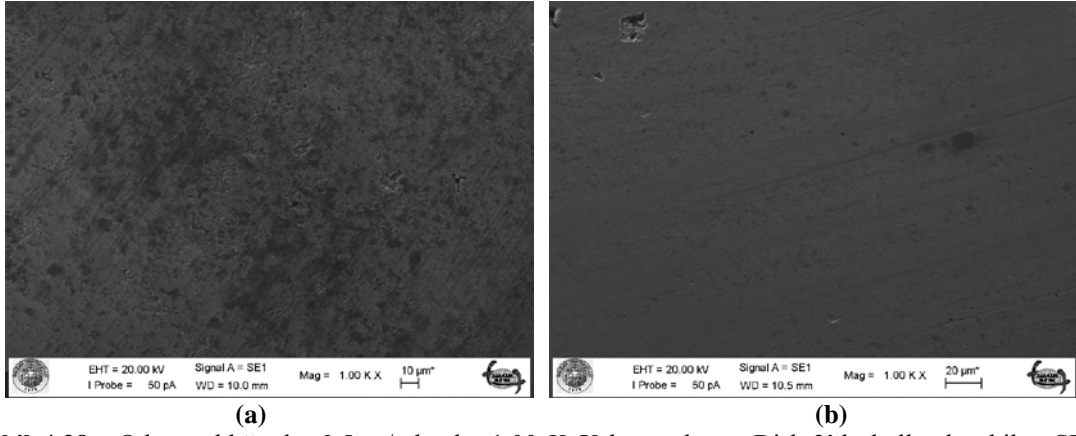


Şekil 4.37. 80°C’de, 2,5 m/s hızda, 1.00 K X büyütülmüş, Disk-2’de kullanılan bilye SEM görüntüleri

- a) Madeni yağın aşınma davranışı
- b) Katkılı madeni yağın aşınma davranışı

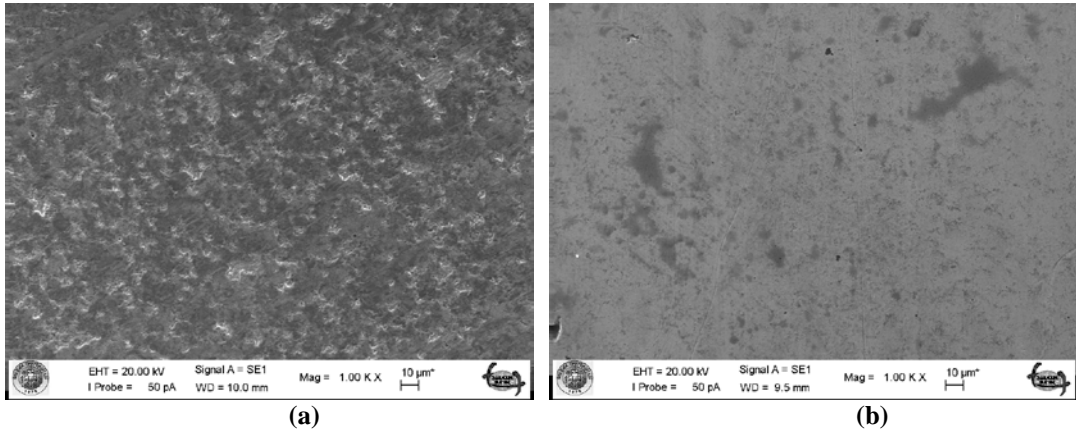
Borik asit yağ içerisinde çözülmüş ya da nanopartikül formunda, aşınma önleyici, sürtünme düzenleyici ve korozyon önleyici olarak bilinmektedir(Shah, 2009). Şekil 4.37.’de 2,5m/s kayma hızı ve 60N deney yükünde, 80°C’de madeni ve bor katkılı madeni yağ ile yapılan deneylerde kullanılan bilye üzerinde oluşan aşınma izleri, SEM sonuçlarında görülmektedir. Bu iki SEM fotoğrafı karşılaştırıldığında madeni yağ ile yapılan çalışmada numune yüzeyinin daha fazla deformasyona uğradığı görülmektedir.

Bor katkısının yüksek deney sıcaklığında da olumlu etkisi açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.38. Oda sıcaklığında, 3,5 m/s hızda, 1.00 K X büyütülmüş, Disk-2’de kullanılan bilye SEM görüntüleri

- a) Madeni yağın aşınma davranışı
- b) Katkılı madeni yağın aşınma davranışı



Şekil 4.39. 50°C’de, 3,5 m/s hızda, 1.00 K X büyütülmüş, Disk-2’de kullanılan bilye SEM görüntüleri

- a) Madeni yağın aşınma davranışı
- b) Katkılı madeni yağın aşınma davranışı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, tüm deneylerin incelenip değerlendirilmesi sonucunda elde edilen analiz ve yorumlar şöyledir;

1. Bilye-Disk deney test cihazında, Disk-1 kullanılan deneylerde bilye ile disk malzemelerinin sertlik değerleri birbirlerine yakın olduğundan aşınma iki yüzeyde de gerçekleşmiştir.

2. 60N yük altında 2,5m/s ve 3,5m/s hızlarda, 12000m deney sürelerinde, **oda sıcaklığında** gerçekleştirilen deneylerde, bor katkısı herhangi bir etki göstermemiş, aksine sürtünme katsayılarında ve aşınma miktarlarında artış görülmüştür.

3. Yine aynı parametrelerde **50°C**' de gerçekleştirilen deneylerde, bilye ağırlık kaybının ve sürtünme katsayısının bor katkılıda daha düşük olduğu, yani katkının etkisini belirli bir sıcaklığın üzerinde gösterdiği gözlemlenmiştir.

4. **80°C**'de ve aynı parametrelerde gerçekleştirilen deneylerde, ağırlık kaybının ve sürtünme katsayısının madeni yağ ile yapılan deneylere göre bor katkılıda ortalama %10 oranında daha düşük olduğu hesaplanmıştır.

5. Firmanın, motor çalışırken katkı eklenmeli ve 20dk boşta çalıştırılmalı ibaresi, motorun sıcaklığı ve çevrimi ile belirlenen süre zarfında yağın katkı ile homojen bir yapı sağladığını göstermektedir. Bu süre zarfında katkı içerisinde var olduğu bilinen su miktarının buharlaşması ile bor katkısının etkinliğini daha belirgin gösterdiği söylenebilir. Ayrıca TGA sonuçlarına bakıldığında alınan numunenin 27,25°C ile 109,98°C arasında %26,1171 oranında bir kayıp olduğu görülmektedir. Bu sonucu destekler niteliktedir.

6. Deney setinde belirli bir süre sonunda (Şekil 4.7.), bor katkılı yağın madeni yağa göre sürtünme katsayısındaki düşüş katkının etkinliğini belirli bir sıcaklığın üzerinde gösterdiği şeklinde yorumlanabilir.

7. Bilye-Disk deney setinde uygulanan yükler aynı, hızlar farklı olduğunda sürtünme katsayısı hidrodinamik yağlama rejiminde hızın artışına bağlı olarak düşüş göstermektedir.

8. Aynı sabit yük, aynı hız ve üç farklı sıcaklıkta (Oda Sıcaklığı, 50°C ve 80°C) yapılan deney sonuçlarında 50°C' deki sürtünme katsayısının diğerlerine göre yaklaşık %10 oranında daha küçük bir değere sahip olduğu test sonuçlarından görülmektedir.

9. Bilye numuneleri ağırlık kayıpları yönünden incelendiğinde oda sıcaklığı ve 50°C’de hızdaki artışla kayıp azalırken 80°C’de hızın artışıyla kayıplarda artış görüldüğü tespit edilmiştir. Burada düşük sıcaklıklarda hızın artışıyla yağın kama etkisi oluşturduğu ve bu etkinin ağırlık kaybını azalttığı düşünülmektedir.

10. Bilye-Disk deney setinde elde edilen sürtünme katsayıları incelendiğinde, Disk-1’deki sonuçlar 0,012-0,015 arasında ölçülürken, PVD yöntemiyle TiN kaplanmış olan Disk-2’de sürtünme katsayısında azalma gösterip 0,008-0,01 mertebelerinde ölçülmüştür. Bu da PVD kaplamanın sürtünme katsayısının azaltılması üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

11. Madeni yağ ve bor katkılı madeni yağ ile yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen SEM fotoğrafları incelendiğinde madeni yağ ile yapılan çalışmalarda bilye numunesinin daha fazla aşındığı, derin çizikler oluştuğu, yüzeylerde çatlaklar ve yırtılmaların meydana geldiği görülmektedir. Bor katkılıda ise yüzeylerin daha az bozulduğu görülmektedir.

12. Sonuçlar göz önüne alındığında genel olarak bor katkılı yağın sürtünmenin azaltılması, aşınmanın önlenmesi üzerinde pozitif etkilerinin bulunduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca temas eden yüzeyler üzerinde koruma sağladığı ve yüzey bozulmalarını geciktirdiği söylenebilir.

5.2 Öneriler

1. Bilye-Disk deney test cihazında, bilye ağırlığının net hesaplanabilmesi için, bilye malzemesinin disk malzemesinden sert bir malzeme olması sağlanmalıdır.

2. Gelecek çalışmalarda daha büyük kat etme mesafeleri ile aşınma özellikleri hakkında daha detaylı sonuçlar elde etmek mümkündür.

3. Bilye-Disk deney setinde daha geniş hız, yük, farklı bilye ve disk malzemelerinde, farklı sıcaklıklar vb. gibi parametrelerde çalışmalar sürdürülebilir. Ayrıca farklı katkı maddelerinin ve taşıt yağlarının kullanılması halinde aynı deneylerin yapılması ile çeşitli sonuçlar elde etmek mümkündür.

4. Pim-Disk, Bilye-Disk gibi farklı test düzenekleri ile aşınma ve sürtünme yönünden madeni yağların incelenmesi mümkündür. Ancak dünyada yapılan çalışmalar ve yağ otoriteleri bu tip deneysel çalışmaların özellikle içten yanmalı motorlarda yapılması gerektiğini önemle vurgulamaktadır. Bu nedenle gelecekte yapılan çalışmaların geliştirilmesi ile sonuçların daha reel olması sağlanabilir.

5. Literatürde ticari yağ katkı maddeleri ile ilgili özellikle yeni motorlarda bu tip ürünlerin kullanılmaması gerektiği bilgisi yer almaktadır (www.ford-trucks.com). Bu nedenle araştırmaların daha kapsamlı yapılması önerilir.

6. Yine dizel motor üreten bir firma da, motorlarında yakıt katkı maddelerinin kullanılmasını tavsiye etmemektedir. Bu katkı maddelerinin zamansız bir şekilde bozunabileceği, yağlama özelliklerini değiştirebileceği ve bununda motorda hasara sebebiyet verebileceği vurgulanmaktadır (<http://kohlerengines.com>). Bu nedenle ileriki çalışmalar dizel ve benzinli motorlarda farklı şekillerde gerçekleştirilebilir.

7. Bu tip katkıların aşınmış, yağ yakan taşıtlarda boşlukların kapatılması yönünden yararlı olacağı düşünülerek kullanılması tavsiye edilebilmektedir. Bu öneri baz alınarak farklı ömürlerdeki taşıt motorlarında deneyler gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Akkurt, M., 1990, Makine Elemanları Cilt1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Baldwin, B. A., 1977, Relative antiwear efficiency of boron and sulphur surface species, Wear 11145 (1977) 345-353.
- Bloch H.P., 2009, Practical Lubrication for Industrial Facilities, Second Edition, Fairmont Pres, 2009.
- Braithwaite E. R., Greene, A. B., Train, B. M., (1999), The Influence of MoS₂ on the Mechanism of Piston-Ring Wear During the Running-in Process, Industrial Lubrication and Tribology, Volume 51, Number 6, 1999, 274-286.
- Damera N. R. ve Pasam V. K., Performance Profiling Of Boric Acid As Lubricant In Machining, Soc. Mech. Sci. & Eng., 30,3(2008) 1678-5878.
- D.P.T., 2000, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu: Bor Bileşikleri, Ankara.
- Durak E., 2003, Borik Asitin Katkı Maddesi Olarak Yağlama Yağında Kullanılmasının Araştırılması, BAÜ Fen Bil. Enst. Derg. 5.1, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fak. Mak. Müh., Isparta.
- Durak E., 2006, Yağlama Yağı Katkı Maddeleri”, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta.
- Durak E., Kurbanoğlu C., Bıyıklıoğlu, A., Karaosmanoğlu, F., 2005, Lubricating Oil Additives and Their Functions, Süleyman Demirel Üniversitesi; Karadeniz Teknik Üniversitesi; İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Düzcükoğlu H. ve Acaroğlu M., Lubrication Properties of Vegetable Oils Combined 111with Boric Acid and Determination of Their Effects on Wear, nergy Sources, Part A: 111Recovery, Utilization and Environmental Effects, 32, 3 (2009) 275-285.
- Erdemir, A. 1991, Tribological Properties of Boric Acid and Boric-Acid-Forming Surfaces. Part I: Crystal Chemistry and Mechanism of Self-Lubrication of Boric Acid”, J. of the STLE, Lubrication Engineering, Vol. 47-3, pp. 168-173
- Erdemir, A., 1995, Lubrication from mixture of boric acid with oils and greases, United States Patent 5, 431 , 830 (1995).
- Erdemir, A., Eryılmaz, O. L. ve Fenske, G. R., 1999, Self-replenishing solid lubricant films on boron carbide, Surf. Eng., 15 (1999) 291-295.
- Erdemir A, 2009, Advances in Boron-Based Lubricants and Lubrication Additives, IV. Uluslararası Bor Sempozyumu • IV International Boron Symposium, Ekim 2009, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 205 - 213.

- Hazar, H., 2004, Bir Dizel Motoru Silindir Yüzeyinin Seramik Malzeme İle Kaplanarak Aşınma Davranışının Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bil. Ens., Elazığ.
- Jiping, Y., Kanob, M., Yasudab, Y., 2004, Evaluation of Nanoscale Friction Depth Distribution in ZDDP and MoDTC Tribochemical Reacted Films Using a Nanoscratch Method, Tribology Letters, Vol. 16, No. 1–2, February 2004.
- Kalındağ, M., 2006, CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Korozyon Özellikleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Kalkan N., 2008, PVD Yöntemi ile TiN CrN ve TiN/CrN Kaplanmış Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Performanslarının Deneysel İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Karabacak Y. E., 2013, Bor Katkılı Yağların Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Lan J. H., 2007, Thermal Transport in Hexagonal Boron Nitride Nanoribbons, Physical Review, 79 (2007) 115401.
- Lovell M., 2006, Higgs C. F., Deshmukh P. ve Mobley A., Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants., J. Mat. Pro. Tech., 177 (2006) 87–90.
- Ma, X., Unertl, W. N., Erdemir, A., 1999, The Boron Oxide- Boric Acid System: Nanoscale Mechanical and Wear Properties, J. Mater, Res., Vol. 14, No. 8, pp. 3455-3466, Materials Research Society.
- Öztürk, M., 2005. Kullanılmış Motor Yağı ve Bertarafı, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Rudnick, L. R. (2003), “Lubricant Additives: Chemistry and Applications”, The EnergyInstitute, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, U.S.A., Marcel Dekker, Inc.
- Sawyer W. G., Schmitz T. L., ve Ziegert J. C., Renewable Tool Coating via Continuous in-situ Deposition, University of Florida Gainesville, 2012.
<http://web.mae.ufl.edu/tribology/Laboratory/WhitePapers/dryMachiningwp.HTML>, 10.08.2014.
- Shah F. U. 2009, Boron Compounds as Additives to Lubricants, Synthesis, Characterization and Tribological Optimization, Luleå university of technology, Printed by Universitetstryckeriet, Luleå, 2009.
- Stachowiak G. W., Batchelor A. W., Engineering Tribology, Elsevier Books, Oxford, 2001.

- Şen, U., 1997, Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve KaplamaÖzellikleri, Doktora tezi _T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul.
- Taylor, C.M., 1993, Yağlama Rejimleri ve İçten Yanmalı Motor, Tribology Series, 26, 287-301, Elsevier Science Publishers, Leeds, England.
- Taylor, C.M., 1998, Automobile Engine Tribology-Design Considerations for Efficiency and Durability, Wear 221, 1998, 1–8, Elsevier.
- Vipper, A., Zadko, I., Karaulov, A., Ermolaev, M., 2001, Antifriction Action of Engine Oil Additives, Scientific and Engineering Centre of —LUKOIL Oil Company, B. Chere-mushkinskaya St., 34, 117218 Moscow,Russia. Lubrication Science, Volume 14, Issue 1, Pages 43-56, John Wiley & Sons, Ltd.
- Waleska Castro, David E. Weller, Kraipat Cheenkachorn, Joseph M. Perez, 2005, The Effect of Chemical Structure of Basefluids on Antiwear Effectiveness of Additives, Tribology International, 38, 321-326, Elsevier.

<http://www.etimaden.gov.tr/> 10.05.2014

http://www.fordtrucks.com/article/idx/18/141/article/Snake_Oil_Is_That_Additive_Really_A_Negative.html 18.05.2014

<http://kohlerengines.com> 15.05.2014

<http://www.opet.com.tr> 17.05.2014

www.wikipedia.org 19.05.2014

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Fırat SERİN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Şereflikoçhisar
Telefon : 05055506523
Faks : -
e-mail : serin_han@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Osman Gazi Lisesi, AKSARAY	2004
Üniversite	: Fırat Üniversitesi, ELAZIĞ	2008
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	-
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009	TSK	Yedek Subay
2010	Akkaya Isı Mak. A.Ş.	Üretim Müd.
2012	EGM	Polis

UZMANLIK ALANI

Otomotiv, İmalat

YABANCI DİLLER

İngilizce